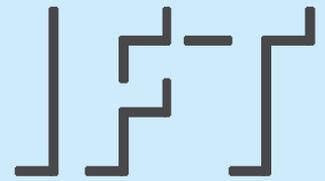


Berichte aus dem

**INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK  
UND LOGISTIK**

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz

**UNIVERSITÄT STUTTGART**



VQ{ æÁiã@

## **Beitrag zur Ermittlung und Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen**

Februar 2021



**Beitrag zur Ermittlung und Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-  
Systemen**

**Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart**

**zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte  
Abhandlung**

**Vorgelegt von**

**Thomas Kriehn**

**aus Heidelberg**

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karl-Heinz Wehking
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz

Tag der mündlichen Prüfung:	05.02.2021
-----------------------------	------------

Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart

Erscheinungsjahr: 2021

## **Danksagung**

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen des Forschungsprojekts „SmartShuttle“ des Instituts für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart und der Fakultät Technische Prozesse der Hochschule Heilbronn.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karl-Heinz Wehking für die Ermöglichung und Unterstützung meines Promotionsvorhabens und die fachlichen Diskussionen und Anregungen.

Zudem danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt und Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz für die Übernahme des Mitberichts.

Prof. Dr.-Ing. Markus Fittinghoff danke ich für die Unterstützung meiner Arbeit und die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen.

Franziska Schloz und Dr. rer. pol. Eno Vangjeli danke ich für die gemeinsame Arbeit am Forschungsprojekt „SmartShuttle“, die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen sowie die Unterstützung.

Dr.-Ing. Matthew Stinson und David Korte danke ich für die Unterstützung bei der Antragsstellung und Vorbereitung des Forschungsprojekts „SmartShuttle“.

Prof. Dr.-Ing. Tobias Loose danke ich für die fachlichen Diskussionen und Anregungen.

Kathleen Große und Jeannine Sartorius danke ich für die Anregungen und eine gute Arbeitsatmosphäre.

Ich danke allen Professoren des Studiengangs Technisches Logistikmanagement der Hochschule Heilbronn, mit denen ich gemeinsam studentische Abschlussarbeiten zum Thema Shuttle-Systeme betreut habe.

Ich danke allen Studierenden, mit denen ich im Rahmen des Forschungsprojekts „SmartShuttle“ und bei Abschlussarbeiten zum Thema Shuttle-Systeme gearbeitet habe.

Für ihre Unterstützung danke ich allen Forschungs- und Industriepartnern, die es im Rahmen des Forschungsprojekts „SmartShuttle“ ermöglicht haben, Einblicke in Shuttle-Systeme zu geben.

Meinem Vater Dr. phil. Ulrich Kriehn und meiner Schwester Barbara Kriehn danke ich für das Lesen der ersten Fassung der Dissertation und die Anregungen. Meiner Frau Janine Kriehn danke ich für den Rückhalt während der Entstehung der Dissertation.

Thomas Kriehn

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>X</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis.....</b>	<b>XII</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>XXXI</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>XXXII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ziel der Arbeit.....	3
1.2 Wissenschaftlicher Beitrag .....	4
1.3 Vorgehensweise .....	5
<b>2 Shuttle-Systeme.....</b>	<b>7</b>
2.1 Eingangsgrößen eines Shuttle-Systems .....	7
2.2 Einordnung der Shuttle-Systeme .....	8
2.2.1 Gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme.....	10
2.2.2 Ganggebundene Shuttle-Systeme .....	12
2.2.3 Weitere Shuttle-Systeme .....	13
2.3 Abgrenzung der untersuchten Shuttle-Systeme .....	14
2.4 Einordnung der Lagerstrategien.....	14
2.4.1 Statische Lagerstrategien .....	15
2.4.1.1 Einlagerstrategien .....	15
2.4.1.1.1 Chaotische Einlagerung.....	15
2.4.1.1.2 Einlagerung nahe E/A-Punkt.....	16
2.4.1.1.3 Weitere Lagerstrategien.....	16
2.4.1.2 Umlagerstrategien.....	16
2.4.1.3 Auslagerstrategien .....	17
2.4.1.3.1 Zufällige Auslagerung .....	17
2.4.1.3.2 Auslagerung nächster Platz am Auslagerungspunkt.....	17
2.4.1.3.3 First in - First out.....	17
2.4.1.3.4 Last in - First out .....	17
2.4.1.4 Ruhepositionsstrategien .....	17

2.4.1.4.1	Warten auf den nächsten Auftrag am Einlagerungspunkt und Gassenanfang..	17
2.4.1.4.2	Warten auf den nächsten Auftrag an der zuletzt befindlichen Position.....	18
2.4.2	Situationsabhängige Lagerstrategien .....	18
2.4.2.1	Einlagerstrategien .....	18
2.4.2.1.1	Durchsatzbasierte Einlagerung .....	18
2.4.2.1.2	Weitere Lagerstrategien.....	18
2.4.2.2	Reihenfolgestrategien .....	18
2.4.2.3	Lagerreorganisation .....	20
2.4.2.4	Weitere Lagerstrategien .....	21
2.5	Abgrenzung der untersuchten Lagerstrategien .....	21
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung .....</b>	<b>22</b>
3.1	Analytische Modellbildung.....	22
3.1.1	Kennzeichnung und Anwendung von Warteschlangensystemen .....	22
3.1.2	Ganggebundene Shuttle-Systeme .....	27
3.1.3	Gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme.....	28
3.1.4	Weitere Shuttle-Systeme.....	30
3.2	Simulationsmodelle .....	31
3.2.1	Ganggebundene Shuttle-Systeme .....	31
3.2.2	Gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme.....	33
3.2.3	Weitere Shuttle-Systeme.....	35
3.3	Zusammenfassung .....	35
<b>4</b>	<b>Ermittlung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen .....</b>	<b>39</b>
4.1	Analytische Modellbildung.....	39
4.1.1	Fahrtzeitberechnung.....	39
4.1.2	Modellierung der Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung .....	40
4.1.3	Gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme.....	43
4.1.3.1	Modellannahmen .....	43
4.1.3.2	Spielzeit .....	44
4.1.3.2.1	Einzelspiel Heber.....	44
4.1.3.2.2	Doppelspiel Heber .....	46
4.1.3.2.3	Einzelspiel Shuttle-Fahrzeug .....	48
4.1.3.2.4	Doppelspiel Shuttle-Fahrzeug .....	57
4.1.3.3	Durchsatz .....	59
4.1.3.3.1	Einzelspiel Heber.....	59
4.1.3.3.2	Doppelspiel Heber .....	60

4.1.3.3.3	Einzelspiel Shuttle-Fahrzeug .....	60
4.1.3.3.4	Doppelspiel Shuttle-Fahrzeug .....	61
4.1.3.4	Warteschlangenmodell .....	61
4.1.3.4.1	Annahmen .....	61
4.1.3.4.2	Zwischenankunfts- und Bedienzeiten.....	63
4.1.3.4.3	M/M/1/K-Warteschlangenmodell.....	70
4.1.3.4.4	M/M/s/K-Warteschlangenmodell .....	73
4.1.4	Zusammenfassung der analytischen Modelle .....	76
4.2	Simulationsmodell .....	77
4.2.1	Forschungsprojekt SmartShuttle.....	78
4.2.2	Simulationsstudien.....	78
4.2.3	Simulationssoftware .....	79
4.2.4	Lösungen zur Parametrierung.....	80
4.2.4.1	Lösung durch Generierung von Simulationsmodellen .....	80
4.2.4.2	Lösung durch Verzicht auf Objekte.....	82
4.2.5	Eingangsgrößen .....	83
4.2.6	Modellbeschreibung .....	83
<b>5</b>	<b>Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen.....</b>	<b>85</b>
5.1	Durchsatzbasierte Einlagerung .....	85
5.1.1	Algorithmen zur Ermittlung der optimalen Zonierung.....	87
5.1.1.1	Ermittlung der Eingangsgrößen .....	87
5.1.1.2	A-Priori-Algorithmus .....	89
5.1.1.3	Evolutionärer Algorithmus .....	93
5.1.1.3.1	Evolutionäre Algorithmen .....	94
5.1.1.3.2	Ablauf des Algorithmus .....	96
5.2	Reihenfolgesortierung der Aufträge .....	96
5.3	Lagerreorganisation .....	98
<b>6</b>	<b>Validierung.....</b>	<b>101</b>
6.1	Validierung Simulationsmodell .....	101
6.2	Validierung des analytischen Modells.....	103
6.2.1	Fehlermaß .....	105
6.2.2	Versuchsplanung.....	107
6.2.2.1	Faktorbildung.....	108
6.2.2.2	Auswahl und Ermittlung der Ausgangsgrößen .....	111
6.2.2.3	Versuchsplan.....	112

6.2.2.4	Auswertung des Versuchsplans .....	113
6.3	Zusammenfassung der Validierung .....	116
<b>7</b>	<b>Anwendung und Auswertung .....</b>	<b>117</b>
7.1	Durchsatzbasierte Einlagerung .....	117
7.1.1	Anwendung der Lagerstrategie Durchsatzbasierte Einlagerung .....	117
7.1.2	Anwendung des A-Priori- und des evolutionären Algorithmus.....	122
7.2	Reihenfolgesortierung der Aufträge .....	126
7.2.1	Anwendung mit Annahme Grenzdurchsatz .....	126
7.2.2	Anwendung mit unterschiedlichen Auftragseingängen .....	127
7.2.2.1	Gang- und ebenengebundenes Shuttle-System .....	127
7.2.2.2	Ganggebundenes Shuttle-System.....	131
7.3	Lagerreorganisation .....	132
7.3.1	Ganggebundenes Shuttle-System.....	132
7.3.2	Gang- und ebenengebundenes Shuttle-System.....	134
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>136</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>141</b>
<b>A</b>	<b>Beispiele .....</b>	<b>149</b>
A.1	Beispiel zur Modellierung der Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung ..	149
A.2	Beispiele zur Berechnung der Umlagerwahrscheinlichkeit in einem doppeltiefen Gang.....	149
<b>B</b>	<b>Wartezeitmodell .....</b>	<b>151</b>
B.1	Einzelspiel Heber und Einzelspiel Shuttle-Fahrzeug.....	151
B.2	Einzelspiel Heber und Doppelspiel Shuttle-Fahrzeug .....	158
B.3	Doppelspiel Heber und Doppelspiel Shuttle-Fahrzeug.....	164
<b>C</b>	<b>Algorithmen.....</b>	<b>169</b>
C.1	Algorithmus zur Implementierung im Simulationsmodell .....	169
C.2	A-Priori-Algorithmus.....	170
C.3	Evolutionärer Algorithmus .....	172
C.4	Algorithmen zur Reihenfolgesortierung der Aufträge .....	174
C.5	Algorithmus Lagerreorganisation .....	175
<b>D</b>	<b>Validierung und Versuchsplan .....</b>	<b>181</b>
D.1	Validierung des Simulationsmodells mit Ergebnissen der Literatur.....	181
D.2	Vollständiger Versuchsplan .....	181

<b>E</b>	<b>Eingangsdaten .....</b>	<b>188</b>
E.1	Eingangsdatensätze Lagerstrategie Durchsatzbasierte Einlagerung .....	188
E.2	Eingangsdatensätze zur Anwendung des A-Priori- und des evolutionären Algorithmus .....	192
E.3	Eingangsdatensätze Lagerstrategie Reihenfolgesortierung, Anwendung mit Annahme Grenzdurchsatz.....	193
E.4	Eingangsdatensätze Lagerstrategie Reihenfolgesortierung, variable Auftragslast ..	193
E.5	Eingangsdatensätze Lagerstrategie Lagerreorganisation, GG-System .....	194
E.6	Eingangsdatensätze Lagerstrategie Lagerreorganisation, GEG-System.....	195

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ein- und Ausgangsgrößen .....	2
Abbildung 2: Vorgehensweise .....	5
Abbildung 3: Ermittlung und Optimierung des Systemverhaltens.....	6
Abbildung 4: Einflussfaktoren auf die Ausgangsgrößen eines Shuttle-Systems .....	7
Abbildung 5: Shuttle-System mit einem Heber pro Gang, in Anlehnung an [1] .....	8
Abbildung 6: Lastaufnahmevorgang Shuttle-Fahrzeug, Reihenfolge des Ablaufs entsprechend der Buchstabenfolge a – e .....	9
Abbildung 7: Doppeltiefes Shuttle-System mit doppeltiefem Gang, Sicht von oben .....	10
Abbildung 8: Gang- und ebenengebundenes Shuttle-System mit zwei Hebern pro Gang, in jeder Ebene befindet sich ein Übergabepplatz zur Einlagerung und einer zur Auslagerung, dreidimensionale Ansicht, in Anlehnung an [1] .....	11
Abbildung 9: Feste Zuordnung der Übergabepplätze in einem System mit vier Lagerebenen, Sicht von vorne, E: Übergabepplatz Einlagerung, A: Übergabepplatz Auslagerung, in Anlehnung an [11] .....	12
Abbildung 10: Zuordnung der Übergabepplätze, Sicht von vorne, links chaotische Zuordnung, rechts feste, abwechselnde Zuordnung, E: Übergabepplatz Einlagerung, A: Übergabepplatz Auslagerung, E v A: Einlagerung oder Auslagerung, rechte Seite in Anlehnung an [11].....	12
Abbildung 11: Ganggebundenes Shuttle-System, dreidimensionale Ansicht, in Anlehnung an [1].....	13
Abbildung 12: Warteschlangensystem mit einer Warteschlange und einer Bedienstation, in Anlehnung an [14].....	22
Abbildung 13: Seriell verkettete Warteschlangensysteme .....	26
Abbildung 14: Warteschlangensysteme mit gegenseitiger Abhängigkeit [19] .....	26
Abbildung 15: Spitzfahrt, in Anlehnung an [1].....	39
Abbildung 16: Trapezfahrt, in Anlehnung an [1].....	39
Abbildung 17: Umlagerung im doppeltiefen Lager, Sicht von Oben, Rechteck mit x = belegt, Rechteck ohne x = leer .....	56
Abbildung 18: Relative Häufigkeit der Zwischenankunfts- und Bedienzeiten, Einzelspiele Heber und Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge .....	65
Abbildung 19: Relative Häufigkeit der Zwischenankunfts- und Bedienzeiten, Einzelspiele Heber (zwei Heber), Einzelspiele Shuttle-Fahrzeuge .....	65
Abbildung 20: Relative Häufigkeit der Zwischenankunfts- und Bedienzeiten, Einzelspiele Heber (ein Heber aktiv), Einzelspiele Shuttle-Fahrzeuge.....	66
Abbildung 21: Relative Häufigkeit der Zwischenankunfts- und Bedienzeiten, Doppelspiele Heber, Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge.....	66
Abbildung 22: Warteschlangensystem mit einer Bedienstation und einer Kapazität von drei Benutzern, beschrieben mit der Terminologie der Warteschlangentheorie .....	69
Abbildung 23: Warteschlangensystem mit einem Heber und einer Kapazität von drei Ladeeinheiten, beschrieben mit den Begriffen des Anwendungsfalls.....	69

Abbildung 24: Warteschlangensystem mit zwei Bedienstationen und einer Kapazität von fünf Benutzern, beschrieben mit der Terminologie der Warteschlangentheorie .....	70
Abbildung 25: Warteschlangensystem mit zwei Bedienstationen und einer Kapazität von fünf Benutzern, beschrieben mit den Begriffen des Anwendungsfalls .....	70
Abbildung 26: Simulationsmodelle, mit der Simulationssoftware geöffnet, links hohes Shuttle-System mit 36 Ebenen, rechts relativ dazu ein niedriges Shuttle-System mit 12 Ebenen .....	81
Abbildung 27: Beispiel für Reihenzonierung (oben links), Spaltenzonierung (oben rechts), Rechteckzonierung (unten).....	86
Abbildung 28: Zusammenwirken A-Priori-Algorithmus und analytisches Modell.....	90
Abbildung 29: Veränderung der Zonenbildung durch den Algorithmus, Reihenfolge der Iterationen: Von oben links nach oben rechts, dann von Mitte links nach Mitte rechts, dann von unten links nach unten rechts .....	93
Abbildung 30: Auftragsreihenfolge mit und ohne Reihenfolgesortierung (in Anlehnung an [51]).....	98
Abbildung 31: Positionsänderung der Ladeeinheiten durch Lagerreorganisation (in Anlehnung an [51]) .....	98
Abbildung 32: Beobachtung einer Kennzahl während des Simulationslaufs .....	104
Abbildung 33: Kennlinien zum Durchsatz eines Hebers und der Shuttle-Fahrzeuge .....	104
Abbildung 34: Stufeneinstellung des Faktors Verteilung der Stufe 2 für die Lagergrößen der Stufe 1 (links) und Stufe 2 (rechts) .....	111
Abbildung 35: Verteilung Fehlermaß für die Ausgangsgröße Durchsatz, gesamter Versuchsplan .....	114
Abbildung 36: Verteilung Fehlermaß über alle Versuche (links) und über die Versuche mit einer Zonierung (rechts), Auslastungsgrad Shuttle-Fahrzeuge.....	115
Abbildung 37: Zonierung für Variante 1 (links oben), Variante 2 und 3 (rechts oben), Variante 4 (links unten).....	118
Abbildung 38: Zonierung (rechts), Variante 1. Durchsatz Zonierung und Chaotische Einlagerung (links), Variante 1 .....	119
Abbildung 39: Optimale Zonen, links durch den A-Priori-Algorithmus definiert, rechts durch den evolutionären Algorithmus (beide Variante 3, Einzelspiele) .....	123
Abbildung 40: Durchsatz Auslageraufträge (links), Auftragsdurchlaufzeit Auslageraufträge (rechts), Variante 1, 250 Aufträge pro Stunde.....	128
Abbildung 41: Durchsatz Auslageraufträge, Variante 1, 350 Aufträge pro Stunde.....	128
Abbildung 42: Auftragsdurchlaufzeit Auslageraufträge (links), Warteschlange Auslageraufträge (rechts), Variante 1, 350 Aufträge pro Stunde.....	129
Abbildung 43: Durchsatz Auslageraufträge (rechts), Auftragsdurchlaufzeit Auslageraufträge (links), Variante 2, 250 Aufträge pro Stunde.....	129
Abbildung 44: Durchsatz Auslageraufträge (rechts), Auftragsdurchlaufzeit Auslageraufträge (links), Variante 2, 450 Aufträge pro Stunde.....	130
Abbildung 45: Positionsänderung der Ladeeinheiten durch Lagerreorganisation .....	133

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lagerstrategien (1 = Einlagerstrategie, 2 = Umlagerstrategie, 3 = Auslagerstrategie, 4 = Reihenfolgestrategie, 5 = Ruhepositionsstrategie, 6 = Nichtbeschäftigungsstrategie, 7 = Ausfallstrategie, 8 = Kinematikstrategie) .....	15
Tabelle 2: Veröffentlichungen zu analytischen Modellen für GG-Systeme, Teil 1, LR = Lagerreorganisation.....	27
Tabelle 3: Veröffentlichungen zu analytischen Modellen für GG-Systeme, Teil 2.....	27
Tabelle 4: Veröffentlichungen zu analytischen Modellen für GEG-Systeme, Teil 1, LR = Lagerreorganisation.....	28
Tabelle 5: Veröffentlichungen zu analytischen Modellen für GEG-Systeme, Teil 2 .....	28
Tabelle 6: Veröffentlichungen zu Simulationsmodellen für GG-Systeme, Teil 1, LR = Lagerreorganisation.....	31
Tabelle 7: Veröffentlichungen zu Simulationsmodellen für GG-Systeme, Teil 2 .....	32
Tabelle 8: Veröffentlichungen zu Simulationsmodellen für GEG-Systeme, Teil 1, LR = Lagerreorganisation.....	33
Tabelle 9: Veröffentlichungen zu Simulationsmodellen für GEG-Systeme, Teil 2.....	33
Tabelle 10: Parameterkategorien.....	83
Tabelle 11: Parameter und Faktoren .....	108
Tabelle 12: Stufeneinstellung für den Faktor Lagergröße.....	109
Tabelle 13: Stufeneinstellung für den Faktor Schnelligkeit, ET = Einfachtief, DT = Doppeltief.....	109
Tabelle 14: Stufeneinstellung des Faktors Verteilung .....	110
Tabelle 15: Stufeneinstellung des Faktors Lagertiefe .....	111
Tabelle 16: Stufeneinstellung des Faktors Spielbildung .....	111
Tabelle 17: Versuchsplan, ohne Darstellung der Ausgangsgrößen (Legende gemäß Tabelle 18).....	112
Tabelle 18: Legende zum Versuchsplan .....	113
Tabelle 19: Ausschnitt des Versuchsplans .....	113
Tabelle 20: Legende zum Ausschnitt des Versuchsplans .....	113
Tabelle 21: GG-System, Chaotische Einlagerung und Durchsatzbasierte Einlagerung im Vergleich, Variante 1 .....	119
Tabelle 22: GG-System, Chaotische Einlagerung und Durchsatzbasierte Einlagerung im Vergleich, Variante 2 .....	119
Tabelle 23: GEG-System, Chaotische Einlagerung und Durchsatzbasierte Einlagerung im Vergleich, Variante 3 .....	120
Tabelle 24: GEG-System, Chaotische Einlagerung und Durchsatzbasierte Einlagerung im Vergleich, Variante 4 .....	120
Tabelle 25: Ergebnisse der Varianten .....	121
Tabelle 26: Ergebnisse, Variante 1 .....	123

Tabelle 27: Ergebnisse, Variante 2, Einzelspiele .....	123
Tabelle 28: Ergebnisse, Variante 2, Doppelspiele .....	124
Tabelle 29: Ergebnisse, Variante 3, Einzelspiele .....	124
Tabelle 30: Ergebnisse, Variante 3, Doppelspiele .....	124
Tabelle 31: Ergebnisse, Variante 4 .....	124
Tabelle 32: Ergebnisse, Variante 5 .....	124
Tabelle 33: Ergebnisse Reihenfolgesortierung .....	126
Tabelle 34: Zeit für Umlagerungen, Varianten 1 und 2 .....	133
Tabelle 35: Durchsatz und Bearbeitungszeit, Varianten 1 und 2 .....	133
Tabelle 36: Bearbeitungszeit Lagerreorganisation.....	135
Tabelle 37: Parameterwerte, Validierung nach VDI-2692.....	181
Tabelle 38: Ergebnisse der Validierung .....	181
Tabelle 39: Vollständiger Versuchsplan .....	182
Tabelle 40: Eingangsdatensatz, Variante 1 .....	188
Tabelle 41: Eingangsdatensatz, Variante 2 .....	189
Tabelle 42: Eingangsdatensatz, Variante 3 .....	189
Tabelle 43: Eingangsdatensatz, Variante 4 .....	191
Tabelle 44: Konstante Parameterwerte .....	192
Tabelle 45: Variable Parameterwerte.....	192
Tabelle 46: Anzahl Positionen für eine unterschiedliche Anzahl an Zonen .....	192
Tabelle 47: Konstante Parameterwerte .....	193
Tabelle 48: Variable Parameterwerte.....	193
Tabelle 49: Konstante Parameterwerte .....	193
Tabelle 50: Variable Parameterwerte.....	194
Tabelle 51: Eingangsdatensatz Lagerreorganisation, GG-System.....	194
Tabelle 52: Parameterwerte.....	195

## Abkürzungsverzeichnis

A *Auslastungsgrad*

D *Durchsatz*

E/A-Punkt *Einlagerungs-/Auslagerungspunkt*

F *Fehlermaß*

FCFS *First come, first serve*

FIFO *First in, first out*

G/G/1 *Warteschlangenmodell mit einem Bediener und einer generellen Verteilung für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und der Bedienzeit*

G/G/2 *Warteschlangenmodell mit zwei Bedienern und einer generellen Verteilung für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und der Bedienzeit*

G/G/s *Warteschlangenmodell mit begrenzter Bedieneranzahl und einer generellen Verteilung für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und der Bedienzeit*

GEG *Gang- und ebenengebunden*

GG *Ganggebunden*

L *Lagergröße*

LE *Ladeeinheit*

LIFO *Last in, last out*

Li-W *Heber Warteschlangenmodell 1 (M/M/1/K (Faktor SP, Stufen 0 und +) oder M/M/sK (Faktor SP, Stufe -))*

Li-WZ *Heber Wartezeitmodell*

LT *Faktor Lagertiefe*

M/G/1 *Warteschlangenmodell mit einem Bediener, Markov-Charakteristik für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und einer generellen Verteilung der Bedienzeit*

M/G/1/K *Warteschlangenmodell mit einem Bediener, begrenzter Benutzeranzahl, Markov-Charakteristik für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und einer generellen Verteilung der Bedienzeit*

M/G/s *Warteschlangenmodell mit begrenzter Bedieneranzahl, Markov-Charakteristik für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und genereller Verteilung der Bedienzeit*

M/M/1 *Warteschlangenmodell mit einem Bediener und Markov-Charakteristik für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und der Bedienzeit*

M/M/1/K *Warteschlangenmodell mit begrenzter Benutzeranzahl innerhalb des Systems, einem Bediener und Markov-Charakteristik für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und der Bedienzeit*

X

- M/M/1/K/P Warteschlangenmodell mit begrenzter Benutzeranzahl innerhalb des Systems, einem Bediener, einem begrenzten Eintritt der Benutzer und Markov-Charakteristik für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und der Bedienzeit
- M/M/∞ Warteschlangenmodell mit unendlicher Bedieneranzahl und Markov-Charakteristik für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und der Bedienzeit
- M/M/s Warteschlangenmodell mit begrenzter Bedieneranzahl und Markov-Charakteristik für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und der Bedienzeit
- M/M/s/∞/∞ Warteschlangenmodell mit begrenzter Bedieneranzahl, unbegrenzter Anzahl Benutzer innerhalb des Systems, unbegrenzter Anzahl an Benutzereintritten ins System und Markov-Charakteristik für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und der Bedienzeit
- M/M/s/K Warteschlangenmodell mit begrenzter Benutzer- und Bedieneranzahl innerhalb des Systems und Markov-Charakteristik für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und der Bedienzeit
- M/M/s/s/∞ Warteschlangenmodell mit begrenzter Bedieneranzahl, begrenzter Anzahl Benutzer innerhalb des Systems, unbegrenzter Anzahl an Benutzereintritten ins System und Markov-Charakteristik für die Zwischenankunftszeiten der Benutzer und der Bedienzeit
- MO Analytischer Modellwert
- POSC Point of Service Completion
- RIO Return to I/O-Point
- SBS/RS Shuttle based storage and retrieval system
- Sfa-W Shuttle-Fahrzeug Warteschlangenmodell (M/M/1/K (Faktor SP, Stufen 0 und +) oder M/M/sK (Faktor SP, Stufe -))
- Sfa-WZ Shuttle-Fahrzeug Wartezeitmodell
- SI Simulierter Wert
- SN Faktor Schnelligkeit
- SP Faktor Spielbildung
- SZ Spielzeit
- V Faktor Verteilung
- W Wartezeit

## Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
$a$	Beschleunigung	$\text{m/s}^2$
$a_L$	Beschleunigung des Hebers	$\text{m/s}^2$
$a_S$	Beschleunigung des Shuttle-Fahrzeugs	$\text{m/s}^2$
$b$	Anzahl der belegten Lagerplätze im Lagerkanal	
$c$	Anzahl überprüfbarer Lagerkanäle an der Position $(p_S + i)$ und $(p_S - i)$	
$D_{DS,DSy,w,x}$	Mittlerer Durchsatz eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	LE/h
$D_{DS,DSy,w,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	LE/h
$D_{DS,DT,DSy,w,x}$	Mittlerer Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge im Gang bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{DS,DT,DSy,w,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{DS,DT,w,x}$	Mittlerer Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge im Gang bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{DS,DT,w,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{DS,DT,w,y}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{DS,DT,x}$	Mittlerer Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge eines Gangs bei einem Doppelspiel (doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{DS,DT,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel (doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h

$D_{DS,w,x}$	Mittlerer Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeug im Gang bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	LE/h
$D_{DS,w,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	LE/h
$D_{DS,DT,w,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{DS,w,y}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	LE/h
$D_{DS,w,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	LE/h
$D_{DS,x}$	Mittlerer Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge eines Gangs bei einem Doppelspiel	LE/h
$D_{DS,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel	LE/h
$D_{DS,y}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers bei einem Doppelspiel	LE/h
$D_{DS,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel	LE/h
$D_{ES,A,DSx,w,y}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung)	LE/h
$D_{ES,A,DSx,w,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers bei einem Einzelspiel in der Ebene $k$ und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung)	LE/h
$D_{ES,A,w,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung)	LE/h
$D_{ES,A,y}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers bei einem Einzelspiel (Auslagerung)	LE/h
$D_{ES,A,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel (Auslagerung)	LE/h
$D_{ES,DTA,DSx,w,y}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-	LE/h

	System)	
$D_{ES,DTA,DSx,w,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,DTA,w,x}$	Mittlerer Durchsatz eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,DTA,w,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,DTA,w,y}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,DTA,w,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,DTA,x}$	Mittlerer Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge eines Gangs bei einem Einzelspiel (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,DTA,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,DTE,DSx,w,y}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,DTE,DSx,w,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,DTE,w,x}$	Mittlerer Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,DTE,w,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeit-	LE/h

	modell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	
$D_{ES,DTE,w,y}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,DTE,w,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,DTE,x}$	Mittlerer Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge eines Gangs bei einem Einzelspiel (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,DTE,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	LE/h
$D_{ES,E,DSx,w,y}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	LE/h
$D_{ES,E,DSx,w,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	LE/h
$D_{ES,E,w,y}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	LE/h
$D_{ES,E,w,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	LE/h
$D_{ES,E,y}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers bei einem Einzelspiel (Einlagerung)	LE/h
$D_{ES,E,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel (Einlagerung)	LE/h
$D_{ES,w,x}$	Mittlerer Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge im Gang bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	LE/h
$D_{ES,w,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	LE/h
$D_{ES,x}$	Mittlerer Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge eines Gangs bei	LE/h

	einem Einzelspiel	
$D_{ES,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel	LE/h
$D_{M/M/1/K,[s],y(k)}$	Mittlerer Durchsatz eines Hebers in der Ebene $k$ bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	LE/s
$D_{M/M/1/K,x}$	Mittlerer Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge eines Gangs bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	LE/h
$D_{M/M/1/K,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz eines Shuttle-Fahrzeugs in Ebene $k$ bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	LE/h
$D_{M/M/1/K,y}$	Mittlerer Durchsatz eines Hebers bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	LE/h
$D_{M/M/1/K,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz eines Hebers in Ebene $k$ bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	LE/h
$D_{M/M/s/K,2y(k)}$	Mittlerer Durchsatz zweier Heber in der Ebene $k$ bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	LE/h
$D_{M/M/s/K,[s],2y(k)}$	Mittlerer Durchsatz zweier Heber in der Ebene $k$ bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	LE/s
$D_{M/M/s/K,x}$	Mittlerer Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge eines Gangs bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	LE/h
$D_{M/M/s/K,x(k)}$	Mittlerer Durchsatz eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	LE/h
$D_{M/M/s/K,y}$	Mittlerer Durchsatz eines Hebers bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	LE/h
$D_{M/M/s/K,y(k)}$	Mittlerer Durchsatz eines Hebers in der Ebene $k$ bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	LE/h
$\varepsilon$	Faktor zur Berechnung von $w_{L_2}$	
$E_{DS,y}$	Erwartungswert der Schalt- und Positionierzeiten des Hebers für ein Doppelspiel	s
$E_{DS,x(k)}$	Erwartungswert der Schalt- und Positionierzeiten in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel des Shuttle-Fahrzeugs	s
$e$	Anzahl freier Lagerkanäle in den möglichen Ansteuerpositionen oder der möglichen Ansteuerposition	
$F$	Fehlermaß	%
$G$	Gewichtungsfaktor	

$i$	Positionsangabe, ausgehend von einer Startposition oder vom Ganganfang (wenn keine Startposition angegeben wird)	
$j$	Faktor zur Berücksichtigung des Falles mit ungerader Anzahl an Lagerplätzen	
$K$	Anzahl Benutzer innerhalb des Warteschlangensystems	
$l$	Anzahl der Lagerplätze jeder Zone	
$L$	Anzahl der Lagerkanäle, die mindestens einen freien Lagerplatz enthalten	
$L_1$	Anzahl der Lagerkanäle, die mindestens einen freien Lagerplatz enthalten, ohne Dezimalstellen	
$L_2$	Anzahl der Lagerkanäle, die mindestens einen freien Lagerplatz enthalten, ohne Dezimalstellen	
$\lambda$	Mittlere Ankunftsrate	1/s
$l_{E,y}$	Abstand vom Einlagerungspunkt zur Ebene 1	m
$l_{A,y}$	Abstand vom Auslagerungspunkt zur Ebene 1	m
$L_F$	Lagerfüllgrad	%
$L_T$	Lagertiefe	
$l_x$	Abstand zwischen den Lagerplätzen in Fahrtrichtung des Shuttle-Fahrzeugs	m
$l_y$	Abstand zwischen den Ebenen	m
$l_z$	Anzahl Lagerplätze der Zone $z$	
$m$	Anzahl der vom Heber gewechselten Ebenen	
$M$	Modellwert	
$\eta_{DS,DSy,x}$	Mittlerer Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	%
$\eta_{DS,DSy,x(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	%
$\eta_{DS,DT,DSy,x}$	Mittlerer Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{DS,DT,DSy,x(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs in der	%

	Ebene $k$ bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	
$\eta_{DS,DT,y}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{DS,DT,y(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{DS,DT,x}$	Mittlerer Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{DS,DT,x(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{DS,x}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	%
$\eta_{DS,x(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	%
$\eta_{DS,y}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	%
$\eta_{DS,y(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	%
$\eta_{ES,A,DSx,y}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung)	%
$\eta_{ES,A,DSx,y(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung)	%
$\eta_{ES,DTA,DSx,w,y}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{ES,DTA,DSx,w,y(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers in der Ebene $k$ bei	%

	einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	
$\eta_{ES,DTA,x}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{ES,DTA,x(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{ES,DTA,y}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{ES,DTA,y(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{ES,DTE,DSx,w,y}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{ES,DTE,DSx,w,y(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{ES,DTE,x}$	Mittlerer Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{ES,DTE,x(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{ES,DTE,y}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{ES,DTE,y(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	%
$\eta_{ES,E,DSx,y}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach	%

	dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	
$\eta_{ES,E,DSx,y(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	%
$\eta_{ES,E,y}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers bei einem Einzelspiel bei der Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	%
$\eta_{ES,E,y(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei der Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	%
$\eta_{ES,x}$	Mittlerer Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	%
$\eta_{ES,x(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	%
$\eta_{M/M/1/K,x}$	Mittlerer Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	%
$\eta_{M/M/1/K,x(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	%
$\eta_{M/M/1/K,y}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	%
$\eta_{M/M/s/K,x}$	Mittlerer Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs eines Gangs bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	%
$\eta_{M/M/s/K,x(k)}$	Mittlerer Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	%
$\eta_{M/M/s/K,y}$	Mittlerer Auslastungsgrad des Hebers bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	%
$n_x$	Anzahl der Positionen im Gang	
$n_y$	Anzahl der Ebenen	
$\pi_0$	Gleichgewichtswahrscheinlichkeit für 0 Benutzer	
$\pi_K$	Gleichgewichtswahrscheinlichkeit für K Benutzer	

$p$	Lastfaktor	
$p_s$	Startposition	
$s$	Strecke	m
$S$	Simulationswert	
$s_B$	Anzahl Bediener	
$t$	Fahrtzeit	s
$\tau$	Faktor zur Berechnung von $w_{L_1}$	
$t_{a(k)}$	Mittlere Zwischenankunftszeit eines Benutzers in der Ebene $k$	s
$t_{b(k)}$	Mittlere Bedienzeit eines Bediener in der Ebene $k$	s
$t_{DS,DSy,w,x}$	Mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{DS,DSy,w,x(k)}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{DS,DT,DSy,w,x}$	Mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{DS,DT,DSy,w,x(k)}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{DS,DT,w,x}$	Mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{DS,DT,w,x(k)}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{DS,DT,w,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{DS,DT,w,y(k)}$	Mittlere Spielzeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	s

$t_{DS,DT,x(k)}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{DS,w,x}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{DS,w,x(k)}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{DS,w,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{DS,w,y(k)}$	Mittlere Spielzeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{DS,x(k)}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel	s
$t_{DS,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers bei einem Doppelspiel	s
$t_{EF,A,y}$	Mittlere Fahrtzeit des Hebers von einer Ebene zum Auslagerungspunkt	s
$t_{EFA,y}$	Fahrtzeit des Hebers vom Aus- zum Einlagerungspunkt	s
$t_{EF,E,y}$	Mittlere Fahrtzeit des Hebers vom Einlagerungspunkt zu einer Ebene	s
$t_{EFL,b,x(k)}$	Mittlere Fahrtzeit für alle Fahrten des Shuttle-Fahrzeugs bei einem Doppelspiel	s
$t_{EFL,y}$	Mittlere Fahrtzeit aller Fahrten eines Doppelspiels des Hebers	s
$t_{EF,x(k)}$	Mittlere Fahrtzeit des Shuttle-Fahrzeugs vom Ganganfang zu einer Position oder umgekehrt	s
$t_{ES,A,DSx,w,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung)	s
$t_{ES,A,DSx,w,y(k)}$	Mittlere Spielzeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung)	s
$t_{ES,A,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers für ein Einzelspiel (Auslagerung)	s
$t_{ES,DTA,DSx,w,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem	s

	Wartezeitmodell (Auslagerung, doppelteiefes Shuttle-System)	
$t_{ES,DTA,DSx,w,y(k)}$	Mittlere Spielzeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppelteiefes Shuttle-System)	s
$t_{ES,DTA,w,x}$	Mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang für ein Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppelteiefes Shuttle-System)	s
$t_{ES,DTA,w,x(k)}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ für ein Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppelteiefes Shuttle-System)	s
$t_{ES,DTA,w,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers für ein Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppelteiefes Shuttle-System)	s
$t_{ES,DTA,w,y(k)}$	Mittlere Spielzeit des Hebers in der Ebene $k$ für ein Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppelteiefes Shuttle-System)	s
$t_{ES,DTA,x(k)}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ für ein Einzelspiel (Auslagerung, doppelteiefes Shuttle-System)	s
$t_{ES,DTE,DSx,w,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppelteiefes Shuttle-System)	s
$t_{ES,DTE,DSx,w,y(k)}$	Mittlere Spielzeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppelteiefes Shuttle-System)	s
$t_{ES,DTE,w,x}$	Mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang für ein Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppelteiefes Shuttle-System)	s
$t_{ES,DTE,w,x(k)}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ für ein Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppelteiefes Shuttle-System)	s
$t_{ES,DTE,w,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers für ein Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppelteiefes Shuttle-System)	s

	Shuttle-System)	
$t_{ES,DTE,w,y(k)}$	Mittlere Spielzeit des Hebers in der Ebene $k$ für ein Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{ES,DTE,x(k)}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ für ein Einzelspiel (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{ES,E,DSx,w,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	s
$t_{ES,E,DSx,w,y(k)}$	Mittlere Spielzeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	s
$t_{ES,E,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers für ein Einzelspiel (Einlagerung)	s
$t_{ES,E,w,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers für ein Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	s
$t_{ES,E,w,y(k)}$	Mittlere Spielzeit des Hebers für ein Einzelspiel in der Ebene $k$ bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	s
$t_{ES,w,x}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs für ein Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{ES,w,x(k)}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ für ein Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{ES,x(k)}$	Mittlere Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ für ein Einzelspiel	s
$t_{FU}$	Mittlere Fahrtzeit der Umlagerungsfahrt	s
$t_{G(1)}$	Lastaufnahmezeit des Shuttle-Fahrzeugs zur Aufnahme oder Abgabe einer Ladeinheit am hinteren Lagerplatz des Lagerkanals (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{G(2)}$	Lastaufnahmezeit des Shuttle-Fahrzeugs zur Aufnahme oder Abgabe einer Ladeinheit am vorderen Lagerplatz des Lagerkanals (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{G,DTA,x}$	Mittlere Lastaufnahmezeit bei der Auslagerung aus einem Lagerplatz (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{G,DTE,x}$	Mittlere Lastaufnahmezeit bei der Einlagerung aus einem	s

	Lagerplatz (doppeltiefes Shuttle-System)	
$t_{G,U}$	Summe aller mittleren Lastaufnahme- und Abgabezeiten einer Umlagerung	s
$t_{G,\ddot{U}P,x}$	Lastaufnahmezeit des Shuttle-Fahrzeugs zur Aufnahme oder Abgabe einer Ladeinheit an einem Übergabeplatz	s
$t_{G,\ddot{U}P,y}$	Lastaufnahmezeit des Hebers zur Aufnahme oder Abgabe einer Ladeinheit an einem Übergabeplatz	s
$t_{G,x}$	Lastaufnahmezeit des Shuttle-Fahrzeugs zur Aufnahme oder Abgabe einer Ladeinheit an einem Lagerplatz (einfachtiefes Shuttle-System)	s
$t_{G,y}$	Lastaufnahmezeit des Hebers zur Aufnahme oder Abgabe einer Ladeinheit am Ein- oder Auslagerungspunkt	s
$t_{L,x(k)}$	Mittlere Fahrtzeit der Leerfahrt des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$	s
$t_{L,y}$	Fahrtzeit der Leerfahrt des Hebers	s
$t_{M/M/1/K,w,x(k)}$	Mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	s
$t_{M/M/1/K,w,x}$	Mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	s
$t_{M/M/1/K,w,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	s
$t_{M/M/s/K,w,x}$	Mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	s
$t_{M/M/s/K,w,x(k)}$	Mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	s
$t_{M/M/s/K,w,y}$	Mittlere Spielzeit des Hebers bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	s
$t_{P,x}$	Schalt- und Positionierzeit des Shuttle-Fahrzeugs	s
$t_{P,y}$	Schalt- und Positionierzeit des Hebers	s
$t_{w,DS,DSy,x}$	Mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{w,DS,DSy,x(k)}$	Mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s

$t_{w,DS,DT,DSy,x}$	Mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,DS,DT,DSy,x(k)}$	Mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel und Heber-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,DS,DT,x}$	Mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,DS,DT,x(k)}$	Mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,DS,DT,y}$	Mittlere Wartezeit des Hebers bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,DS,DT,y(k)}$	Mittlere Wartezeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,DS,x}$	Mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{w,DS,x(k)}$	Mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{w,DS,y}$	Mittlere Wartezeit des Hebers bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{w,DS,y(k)}$	Mittlere Wartezeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{w,ES,A,DSx,y}$	Mittlere Wartezeit des Hebers bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung)	s
$t_{w,ES,A,DSx,y(k)}$	Mittlere Wartezeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung)	s
$t_{w,ES,DTA,DSx,y}$	Mittlere Wartezeit des Hebers bei einem Einzelspiel und	s

	Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle- System)	
$t_{w,ES,DTA,DSx,y(k)}$	Mittlere Wartezeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berech- nung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,ES,DTA,x}$	Mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmo- dell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,ES,DTA,x(k)}$	Mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmo- dell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,ES,DTA,y}$	Mittlere Wartezeit des Hebers bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, dop- peltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,ES,DTA,y(k)}$	Mittlere Wartezeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Auslagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,ES,DTE,DSx,y}$	Mittlere Wartezeit des Hebers bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,ES,DTE,DSx,y(k)}$	Mittlere Wartezeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berech- nung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,ES,DTE,x}$	Mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmo- dell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,ES,DTE,x(k)}$	Mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmo- dell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,ES,DTE,y}$	Mittlere Wartezeit des Hebers bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, dop- peltiefes Shuttle-System)	s

$t_{w,ES,DTE,y(k)}$	Mittlere Wartezeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung, doppeltiefes Shuttle-System)	s
$t_{w,ES,E,DSx,y}$	Mittlere Wartezeit des Hebers bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	s
$t_{w,ES,E,DSx,y(k)}$	Mittlere Wartezeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel und Shuttle-Fahrzeug-Doppelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	s
$t_{w,ES,E,y}$	Mittlere Wartezeit des Hebers in der Ebene bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	s
$t_{w,ES,E,y(k)}$	Mittlere Wartezeit des Hebers in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell (Einlagerung)	s
$t_{w,ES,x}$	Mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{w,ES,x(k)}$	Mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei einem Einzelspiel bei Berechnung nach dem Wartezeitmodell	s
$t_{w,M/M/1/K,x}$	Mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	s
$t_{w,M/M/1/K,x(k)}$	Mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	s
$t_{w,M/M/1/K,y}$	Mittlere Wartezeit des Hebers bei Berechnung nach einem M/M/1/K-Warteschlangenmodell	s
$t_{w,M/M/s/K,x}$	Mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs eines Gangs bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	s
$t_{w,M/M/s/K,x(k)}$	Mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene $k$ bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	s
$t_{w,M/M/s/K,y}$	Mittlere Wartezeit des Hebers bei Berechnung nach einem M/M/s/K-Warteschlangenmodell	s
$v$	Geschwindigkeit	m/s

$v_L$	Maximal erreichbare Geschwindigkeit des Hebers	m/s
$v_S$	Maximal erreichbare Geschwindigkeit des Shuttle-Fahrzeugs	m/s
$\vartheta$	Ausgangsgröße	
$w$	Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung jeder Zone	
$w_0$	Die Wahrscheinlichkeit, dass der Lagerkanal, der sich gegenüber der auszulagernden Ladeinheit befindet, einen freien Lagerplatz enthält	
$w_{0,x(k)}$	Die Wahrscheinlichkeit des Verbleibens des Shuttle-Fahrzeugs in der Position, nach einer Einlagerung	
$w_{0,y}$	Wahrscheinlichkeit, dass der Heber nach der Einlagerung in derselben Ebene verbleibt	
$w_b$	Wahrscheinlichkeit der Lagerplatzbelegung eines Lagerkanals	
$w_{L_1}$	Wahrscheinlichkeit, dass L den kleineren Wert $L_1$ annimmt	
$w_{L_2}$	Wahrscheinlichkeit, dass L den größeren Wert $L_2$ annimmt	
$w_i$	Wahrscheinlichkeit, dass nach genau $i$ Positionen ein freier Lagerkanal gefunden wird	
$w_{i,g}$	Gewichtete Wahrscheinlichkeit, dass bei der Position $i$ ein freier Lagerplatz gefunden wird	
$w_{i,g,p}$	Mittelwert der gewichteten Wahrscheinlichkeit für jede mögliche Start-Position, dass bei der Position $i$ ein freier Lagerplatz gefunden wird	
$w_{i(k),x}$	Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung der Position $i$ des Shuttle-Fahrzeugs in Ebene $k$	
$w_{i(k),x,LP1}$	Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung des Kanals auf der linken Seite in der Position $i$ der Ebene $k$ mit der Zonenanzahl $z$ vom Shuttle-Fahrzeug	
$w_{i(k),x,LP2}$	Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung des Kanals auf der rechten Seite in der Position $i$ der Ebene $k$ mit der Zonenanzahl $z$ vom Shuttle-Fahrzeug	
$w_{i(k,z),x,LP1}$	Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung des Kanals auf der linken Seite in der Position $i$ der Ebene $k$ mit der Zonenanzahl $z$	

$w_{i(k,z),x,LP2}$	Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung des Kanals auf der rechten Seite in der Position $i$ der Ebene $k$ mit der Zonenzuordnung $z$
$w_{k,y}$	Die Wahrscheinlichkeit der Ebenenansteuerung des Hebers
$w_{LT}$	Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines voll belegten Lagerkanals im Shuttle-System
$w_{m,x(k)}$	Wahrscheinlichkeit eines Wechsels um $m$ Positionen des Shuttle-Fahrzeugs
$w_{m,y}$	Wahrscheinlichkeit einer Leerfahrt des Hebers um $m$ Ebenen von der Ein- zur Auslagerungsebene
$w_u$	Wahrscheinlichkeit des Eintretens einer Umlagerung
$w_z$	Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung der Zone $z$
$Z_{LP1}$	Zonenzuordnung aller Positionen der linken Seite des Gangs
$Z_{LP2}$	Zonenzuordnung aller Positionen der rechten Seite des Gangs

## **Kurzfassung**

Shuttle-Systeme sind automatische Lagersysteme, die Shuttle-Fahrzeuge und Heber für die Förderung von Ladeeinheiten einsetzen. Die horizontale Förderung und Lagerung von Ladeeinheiten innerhalb der Ebenen wird durch Shuttle-Fahrzeuge durchgeführt. Die vertikale Förderung von Ladeeinheiten oder Shuttle-Fahrzeugen erfolgt durch Heber.

Im Rahmen dieser Arbeit sind ein analytisches Modell und ein Simulationsmodell zur Ermittlung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen entstanden. Zur Optimierung des Systemverhaltens wurden Lagerstrategien entwickelt. Das Optimierungskriterium ist die Maximierung des Durchsatzes. Für die Lagerstrategien „Durchsatzbasierte Einlagerung“, „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ und „Lagerreorganisation“ wurden Algorithmen entwickelt. Die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ ordnet Artikeln und Lagerplätzen aufgrund von Zugriffshäufigkeiten Zonen zu. Die Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ sortiert die Reihenfolge der Abarbeitung der wartenden Auslageraufträge. Die Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ legt umzulagernde Ladeeinheiten und deren neue Lagerplätze fest. Die entwickelten Lagerstrategien wurden mit der Lagerstrategie „Chaotische Einlagerung“ verglichen. Diese Lagerstrategie wählt für einzulagernde Ladeeinheiten einen zufälligen freien Lagerplatz aus.

Die Modelle ermöglichen die individuelle Parametrierung von Shuttle-Systemen und ermitteln die Ausgangsgrößen Durchsatz, Spielzeit, Wartezeit, Auslastungsgrad, Warteschlangenlänge und Auftragsdurchlaufzeit. Neuartig ist die Möglichkeit der einstellbaren Verteilung der Wahrscheinlichkeiten der Lagerplätze. Jeder Lagerplatz kann mit einer einstellbaren Wahrscheinlichkeit für Ein- und Auslagerungen ausgewählt werden.

Die Ergebnisse der in dieser Arbeit durchgeführten Studien mit den Modellen zeigen die Optimierungspotentiale der Lagerstrategien. Bei Anwendung der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ konnten Durchsatzsteigerungen bis zu 54 % erreicht werden, bei der Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ bis zu 25 % und bei der Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ konnte der Durchsatz mehr als verdoppelt werden.

Mit den Modellen können weitere Erkenntnisse zum Systemverhalten von Shuttle-Systemen gewonnen werden. Die Modelle können zur Anwendung und Weiterentwicklung von Wissenschaftlern, Planern, Betreibern und Herstellern von Shuttle-Systemen eingesetzt werden. Die Parametrierung eines Teils der in dieser Arbeit entwickelten Modelle ist über eine Webseite öffentlich im Rahmen des Forschungsprojekts „SmartShuttle“ zugänglich.

## Abstract

Shuttle based storage and retrieval systems (SBS/RS) are automated storage and retrieval systems that use shuttle carriers and elevators to store and retrieve totes. The totes are transported horizontally by shuttle carriers and vertically by elevators.

Both an analytical model and a simulation model for determining the system behavior of SBS/RS have been developed. Storage management policies were developed to optimize the system behavior. The optimization criterion is the maximization of throughput. Algorithms were developed for the storage management policies „class-based storage“, „sequencing of retrieval requests“ and „warehouse reorganization“. „Class-based storage“ assigns articles and storage locations to zones based on frequencies of storage and retrieval requests. „Sequencing of retrieval requests“ sorts the retrieval requests. „Warehouse reorganization“ defines totes to be rearranged and their new storage locations. The developed storage management policies were compared with the storage management policy „random storage assignment“. This storage management policy selects random storage locations for totes to be stored.

The models enable the individual parameterization of SBS/RS and determine throughput, cycle time, waiting time, utilization rate, queue length and retrieval request processing time. A novelty is the possibility of adjustable distribution of the probabilities of storage locations. Each storage location can be selected with an adjustable probability for storage and retrieval.

The studies with the models show optimization potentials of the storage management policies. „Class-based storage“ led to an increase in throughput of up to 54 %, „sequencing of retrieval requests“ up to 25 % and „warehouse reorganization“ could more than double the throughput.

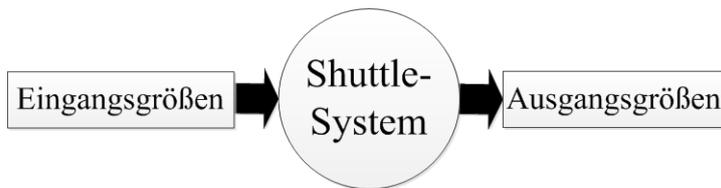
The models can be used to obtain further insights into the system behavior of SBS/RS and for application and further development by scientists, planners, operators and manufacturers of SBS/RS. The parameterization of a part of the simulation model is available via a website within the research project „SmartShuttle“.

# 1 Einleitung

Shuttle-Systeme sind automatische Lagersysteme, die Shuttle-Fahrzeuge und Heber für die Förderung von Ladeeinheiten einsetzen. Die horizontale Förderung und Lagerung von Ladeeinheiten innerhalb der Ebenen wird durch Shuttle-Fahrzeuge durchgeführt. Die vertikale Förderung von Ladeeinheiten oder Shuttle-Fahrzeugen erfolgt durch Heber. In vielen Fällen werden Shuttle-Systeme für Kleinladungsträger eingesetzt [1]. Shuttle-Systeme konnten sich in den letzten zehn Jahren stark verbreiten, als Gründe dafür werden von Unternehmensvertretern vorwiegend der erreichbare Durchsatz und die Flexibilität genannt [2, 3, 4]. Shuttle-Systeme werden beispielsweise zur Versorgung von Kommissionierbereichen nach dem Prinzip Ware-zur-Person eingesetzt [1].

Shuttle-Systeme können nach verschiedenen Merkmalen in Kategorien eingeordnet werden. Bei einer Einordnung nach den Bewegungsmöglichkeiten der Shuttle-Fahrzeuge eines Shuttle-Systems lassen sich Shuttle-Systeme in gang- und ebenengebundene, ganggebundene, ebenengebundene und ungebundene Shuttle-Systeme einordnen. In gang- und ebenengebundenen Shuttle-Systemen können die Shuttle-Fahrzeuge die Ebene und den Gang nicht wechseln. In ganggebundenen Shuttle-Systemen können die Shuttle-Fahrzeuge den Gang nicht wechseln. In ebenengebundenen Shuttle-Systemen können die Shuttle-Fahrzeuge die Ebene nicht wechseln. In ungebundenen Shuttle-Systemen können die Shuttle-Fahrzeuge jeden Lagerplatz im Shuttle-System erreichen.

Shuttle-Systeme können durch verschiedene Größen beschrieben oder bewertet werden. Abbildung 3 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen. Vorgegebene Größen, wie z. B. die Geometrie eines Shuttle-Systems oder die Kinematik der Fördermittel, werden als Eingangsgrößen bezeichnet. Größen, die durch Eingangsgrößen und Prozesse innerhalb des Shuttle-Systems beeinflussbar sind, werden als Ausgangsgrößen bezeichnet. Ausgangsgrößen sind beispielsweise der Durchsatz oder die Auftragsdurchlaufzeit. Der Durchsatz gibt die Anzahl der Ladeeinheiten an, die pro Zeiteinheit eine definierte Grenze überschreiten [1, 5]. Die Auftragsdurchlaufzeit gibt die Zeit an, die ein Auftrag für die Bearbeitung benötigt [6].



**Abbildung 1: Ein- und Ausgangsgrößen**

In dieser Arbeit werden mehrere Ausgangsgrößen mit dem Begriff Systemverhalten zusammengefasst: Durchsatz, Spielzeit, Wartezeit, Auslastungsgrad, Auftragsdurchlaufzeit und Warteschlangenlänge. Die Spielzeit ist die Zeit, die für einen genau definierten und sich ständig wiederholenden Bewegungsablauf benötigt wird [1]. Die Wartezeit ist die Zeit, in der sich ein Fördermittel in Ruhe befindet und auf ein Ereignis wartet. Der Auslastungsgrad gibt an, zu welchem Anteil pro Zeiteinheit ein Fördermittel Bewegungen ausführt. Die Warteschlangenlänge gibt die Anzahl der wartenden Aufträge an.

Die Ermittlung des Systemverhaltens kann durch Messungen am realen Shuttle-System oder anhand eines Modells eines Shuttle-Systems erfolgen. In dieser Arbeit erfolgt sie über Modelle. Dabei werden zwei Arten der Modellbildung angewendet:

1. Shuttle-Systeme werden analysiert. Es werden Annahmen zum betrachteten System getroffen. Basierend auf diesen Annahmen werden Berechnungsvorschriften für die Ausgangsgrößen entwickelt. Modelle dieser Art werden als analytische Modelle bezeichnet [7].
2. Shuttle-Systeme werden mit einer geeigneten Software auf einem Computer simuliert (nachgeahmt). Eine Ereignisliste legt fest, wann ein Ereignis eintritt. Ein Ereignis kann Berechnungen auslösen. Die Simulationssoftware führt alle Ereignisse aus. Jedem Ereignis ist eine Zeit zugeordnet. Modelle dieser Art werden als Simulationsmodelle bezeichnet [7].

Die Steuerung der Bewegungen von Shuttle-Fahrzeugen und Hebern wird in dieser Arbeit als Lagerstrategie bezeichnet. Die Lagerstrategie gibt demnach für das jeweilige Shuttle-System vor, welche Bewegungen Shuttle-Fahrzeuge und Heber zu welchem Zeitpunkt ausführen. Die möglichen Bewegungen sind systembedingt eingeschränkt, z. B. kann der Heber nur eine vertikale Bewegung ausführen. Die Lagerstrategie wählt aus den Bewegungsmöglichkeiten, die zu einem Zeitpunkt für ein Fördermittel vorhanden sind, genau eine aus. Die Entwicklung von Lagerstrategien zur Optimierung des Systemverhaltens basiert in dieser Arbeit auf folgenden Gedanken:

1. Wenn es Ladeeinheiten gibt, die häufiger als andere Ladeeinheiten benötigt werden, dann sollte die Lagerplatzwahl bei der Einlagerung für diese Ladeeinheiten so erfolgen, dass die Fahrtzeit der Fördermittel zur Ein- und Auslagerung möglichst kurz ist. Das wird im Folgenden als Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ bezeichnet.
2. Wenn mehr als ein Auftrag auf seine Bearbeitung wartet, sollte eine Sortierung der Bearbeitungsreihenfolge der wartenden Aufträge stattfinden. Die Sortierung sollte so erfolgen, dass die Fahrtzeit der Fördermittel reduziert wird. Das wird im Folgenden als Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ bezeichnet.
3. Wenn Shuttle-Systeme zu bestimmten Zeiten nicht in Betrieb sind, aber bereits Aufträge zur Auslagerung bekannt sind, die mit Beginn der nächsten Betriebsphase benötigt werden, sollten die benötigten Ladeeinheiten umgelagert werden. Die neuen Lagerplätze dieser Ladeeinheiten sollten so gewählt werden, dass die Fahrtzeit der Fördermittel zur Auslagerung möglichst kurz ist. Das wird im Folgenden als Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ bezeichnet.
4. Wenn es eine Referenz-Lagerstrategie gibt, ist die Quantifizierung der Optimierung durch die genannten Lagerstrategien möglich. Die Referenz-Lagerstrategie ist die „Chaotische Einlagerung“. Dabei wird jeder Ladeeinheit ein zufälliger freier Lagerplatz zugewiesen. Die Zufallsentscheidung basiert auf einer Gleichverteilung.

Modelle können in der Planungsphase eines Shuttle-Systems zur Auswahl von Varianten und zur Ermittlung von Optimierungspotentialen dienen. In der Phase des betrieblichen Einsatzes eines Shuttle-Systems können Modelle Optimierungspotentiale bei einer Änderung der Lagerstrategie aufzeigen. Wenn die Algorithmen der neuen Lagerstrategie in die Steuerungssoftware des Shuttle-Systems implementiert werden, ist eine Optimierung des Systemverhaltens dieses Shuttle-Systems möglich. Eine Optimierung des Systemverhaltens durch die Änderung von Lagerstrategien bringt den Vorteil mit sich, dass neue Anforderungen an das Shuttle-System ohne eine Investition in die Hardware erfüllt werden können. Eine kostenintensive Investition in z. B. einen neuen Gang mit neuem Heber und neuen Shuttle-Fahrzeugen könnte dadurch verhindert oder zumindest verzögert werden.

### **1.1 Ziel der Arbeit**

In dieser Arbeit sollen:

1. Modelle zur Ermittlung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen entwickelt, validiert und angewendet werden.

2. Lagerstrategien zur Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen entwickelt und angewendet werden.
3. Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Anwendung der Modelle mit den Lagerstrategien gezogen und in geeigneter Weise dargestellt werden.

Zu den drei Hauptzielen sind folgende Spezifikationen zu nennen:

- Es soll ein analytisches Modell und ein Simulationsmodell entwickelt werden.
- Das analytische Modell soll für gang- und ebenengebundene einfach- und doppeltiefe Shuttle-Systeme entwickelt werden.
- Das Simulationsmodell soll für ganggebundene und gang- und ebenengebundene einfach- und doppeltiefe Shuttle-Systeme entwickelt werden.
- Die Lagerstrategien „Chaotische Einlagerung“ und „Durchsatzbasierte Einlagerung“ sollen mit dem analytischen Modell und dem Simulationsmodell abbildbar sein. Das Simulationsmodell soll weiterhin die Lagerstrategien „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ und „Lagerreorganisation“ abbilden können.
- Es soll ein Algorithmus zur Optimierung der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ entwickelt werden.
- Die Optimierung durch die Anwendung der Lagerstrategien soll durch geeignete Versuche quantifiziert werden.

Mit den Modellen soll ein Beitrag zur Ermittlung und Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen geleistet werden, der neue Erkenntnisse zu den Auswirkungen der Lagerstrategien auf Shuttle-Systeme liefert. Die Modelle und Algorithmen sollen zur Anwendung und Weiterentwicklung von Wissenschaftlern, Planern, Betreibern und Herstellern von Shuttle-Systemen eingesetzt werden können. Als Optimierungskriterium wird in dieser Arbeit die Maximierung des Durchsatzes betrachtet.

## **1.2 Wissenschaftlicher Beitrag**

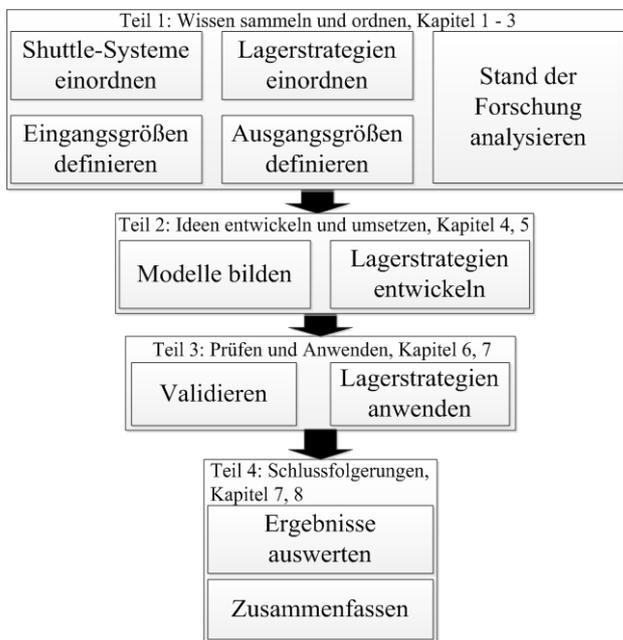
Der wissenschaftliche Beitrag sind die Modelle und Lagerstrategien, die neue Algorithmen zur Optimierung beinhalten und neue Erkenntnisse zum Systemverhalten von Shuttle-Systemen ermöglichen.

Ein analytisches Modell, das die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ abbilden kann, ist neu, es liegen dazu keine Veröffentlichungen vor, siehe Kapitel 3 (Stand der Forschung). Die Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ wurde in bisherigen Veröffentlichungen zur Vermeidung von Blockaden oder der Einhaltung einer vorgegebenen Reihenfolge eingesetzt, der in dieser Arbeit verwendete Ansatz zur Optimierung des Durch-

satzes ist neu, siehe Kapitel 3. Zur Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ konnten trotz intensiver Literaturrecherche keine veröffentlichten Modelle für Shuttle-Systeme gefunden werden. Die Algorithmen zur Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ sind ebenso neu wie die Erkenntnisse zum Systemverhalten.

### 1.3 Vorgehensweise

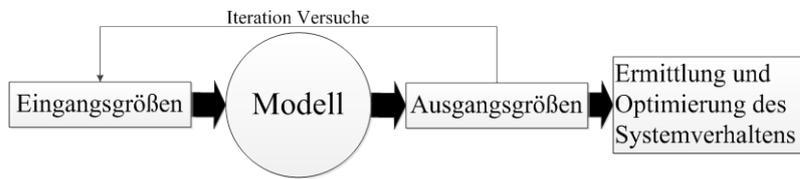
Zunächst werden Shuttle-Systeme und Lagerstrategien eingeordnet, Ein- und Ausgangsgrößen definiert sowie der Stand der Forschung analysiert. Anschließend werden Modelle und Lagerstrategien entwickelt. Ein Modell bildet die Realität nur annähernd ab. Diese Annäherung sollte für den Anwendungszweck hinreichend genau sein. Die Validierung des Modells prüft diese hinreichende Genauigkeit [8]. In dieser Arbeit wird als Schwerpunkt die Ausgangsgröße Durchsatz optimiert. Mit den validierten Modellen werden die Ausgangsgrößen bei Anwendung der Lagerstrategien ermittelt und mit den Ausgangsgrößen bei Anwendung der Referenz-Lagerstrategie verglichen. Eine Optimierung einer Ausgangsgröße hat stattgefunden, wenn ein besserer Wert als der Referenzwert erreicht wird. Ein besserer Wert für die Ausgangsgröße Durchsatz ist beispielsweise ein höherer Wert als der Referenzwert. Abbildung 2 zeigt die Vorgehensweise in dieser Arbeit.



**Abbildung 2: Vorgehensweise**

Abbildung 3 veranschaulicht die Ermittlung und Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen. Das Modell erhält Eingangsgrößen und ermittelt die Ausgangsgrößen. Durch gezielte Variierung von Eingangsgrößen (Iteration der Versuche) können die Ände-

rungen der Ausgangsgrößen bestimmt und Erkenntnisse zum Systemverhalten und dessen Optimierung gewonnen werden.



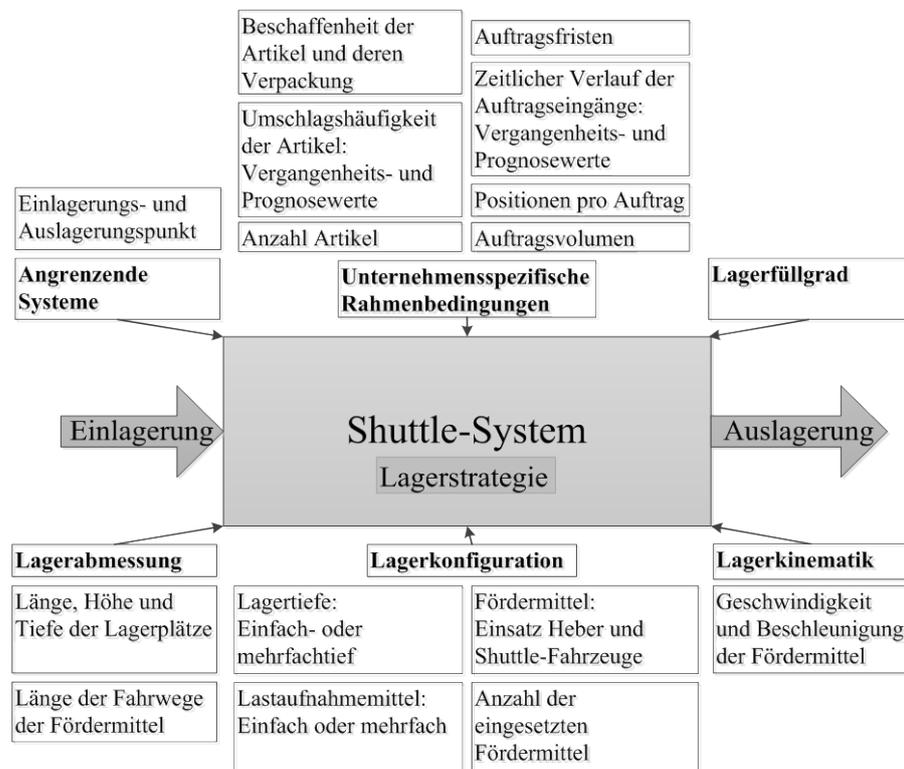
**Abbildung 3: Ermittlung und Optimierung des Systemverhaltens**

## 2 Shuttle-Systeme

In diesem Kapitel werden die Eingangsgrößen eines Shuttle-Systems beschrieben sowie Shuttle-Systeme und Lagerstrategien in Kategorien eingeordnet. Es erfolgt eine Abgrenzung der in dieser Arbeit betrachteten Shuttle-Systeme und Lagerstrategien.

### 2.1 Eingangsgrößen eines Shuttle-Systems

Die Ausgangsgrößen eines Shuttle-Systems (Durchsatz, Spielzeit, Wartezeit, Auslastungsgrad, Auftragsdurchlaufzeit und Warteschlangenlänge) werden durch verschiedene Eingangsgrößen bestimmt. Abbildung 4 zeigt wesentliche Eingangsgrößen.



**Abbildung 4: Einflussfaktoren auf die Ausgangsgrößen eines Shuttle-Systems**

Die Lagerstrategie bestimmt den Bewegungsablauf der Fördermittel. Angrenzende Systeme sind die Schnittstelle des Shuttle-Systems zu vor- oder nachgelagerten Systemen. Unternehmensspezifische Rahmenbedingungen sind beispielsweise bestimmte Verteilungen der Auftragsgänge pro Zeiteinheit. Der Lagerfüllgrad ist das Verhältnis von belegten zu freien Lagerplätzen. Die Lagerabmessungen enthalten die Länge, Höhe, Tiefe und weitere Maße des Shuttle-Systems. Die Lagerkonfiguration umfasst die Systemausprägung des Shuttle-

Systems. Die Lagerkinematik gibt Beschleunigung, Geschwindigkeit, Lastaufnahmezeiten und weitere Daten an.

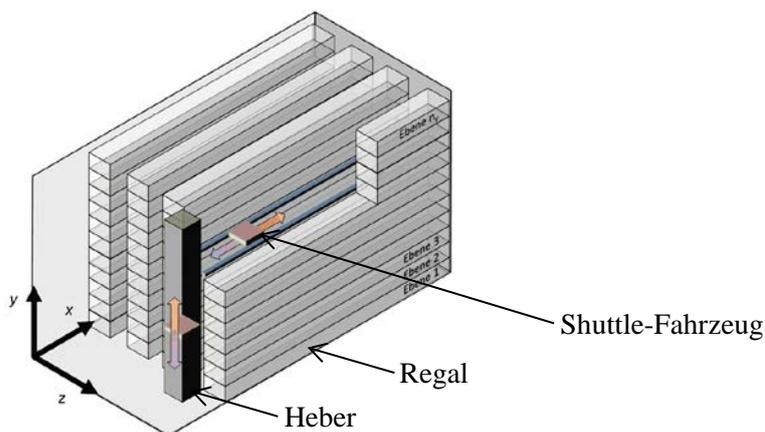
## 2.2 Einordnung der Shuttle-Systeme

In diesem Abschnitt wird ein Überblick der vorhandenen Shuttle-Systeme gegeben. Shuttle-Systeme werden beispielsweise in der VDI-Richtlinie 2692 [1], bei ten Hompel et al. (neue Auflage des ursprünglichen Werks von Jünemann) [9] und in eigenen Veröffentlichungen [10] eingeordnet. Shuttle-Systeme sind automatische Lagersysteme. Ein automatisches Lagersystem wird dann als Shuttle-System bezeichnet, wenn es

- einen oder mehrere Vertikalförderer,
- einen oder mehrere Horizontalförderer und
- einen Regalbau, der es den Horizontalförderern ermöglicht, in unterschiedliche Ebenen des Regals zu fahren,

enthält.

Ein Shuttle-System beinhaltet weiterhin eine Steuerung, Sicherheitseinrichtungen, Brandschutzeinrichtungen und z. T. zusätzliche Fördersysteme. Der Vertikalförderer wird als Heber bezeichnet, der Horizontalförderer als Shuttle-Fahrzeug. Abbildung 5 zeigt ein Shuttle-System.



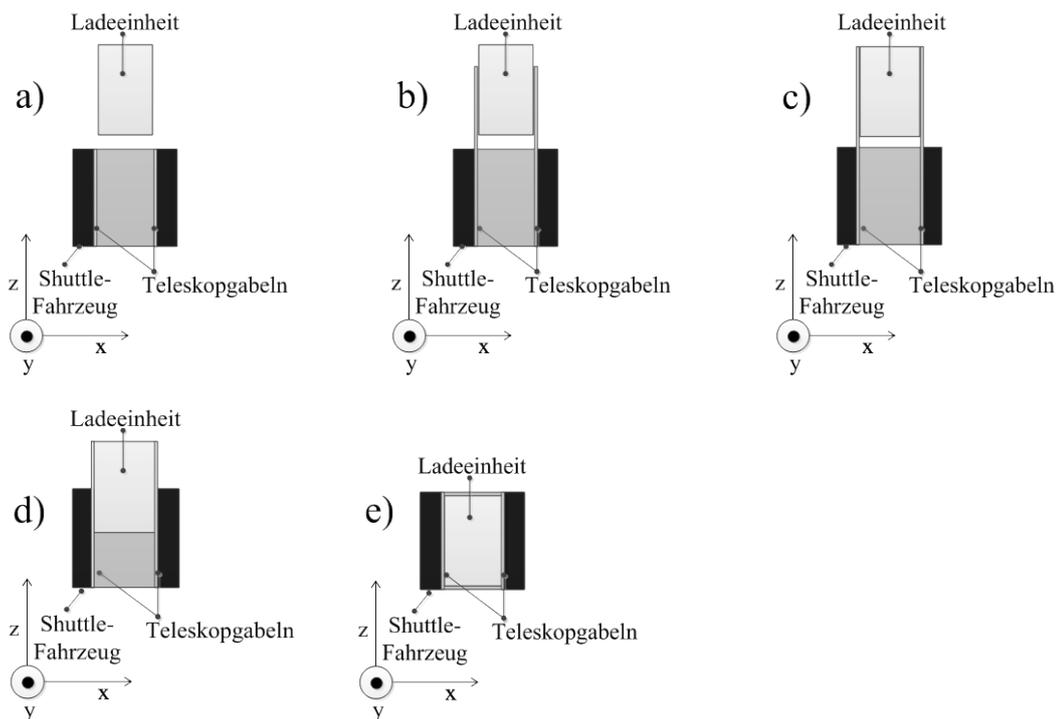
**Abbildung 5: Shuttle-System mit einem Heber pro Gang, in Anlehnung an [1]**

Ladeeinheiten werden am Einlagerungspunkt vom Heber oder von einem auf dem Heber befindlichen Shuttle-Fahrzeug aufgenommen. Der Einlagerungspunkt ist die Schnittstelle zu angrenzenden Systemen vor der Einlagerung in das Shuttle-System. Das können Band- oder Rollenförderer sein, die die Ladeeinheiten vom Wareneingang zum Shuttle-System fördern. Der Heber fördert die Ladeeinheit (oder ein Shuttle-Fahrzeug und die Ladeeinheit) zu einer

Ebene, dort wird die Ladeinheit (oder das Shuttle-Fahrzeug mit der Ladeinheit) abgegeben. Anschließend wird die Ladeinheit durch ein Shuttle-Fahrzeug eingelagert.

Das Shuttle-Fahrzeug wird durch Laufräder auf den Fahrschienen in der Regalebene bewegt. Die Positionierung im Regal wird i. d. R. durch im Shuttle-Fahrzeug integrierte Sensoren und in die Fahrschienen integrierte Positionsmarken vorgenommen [1].

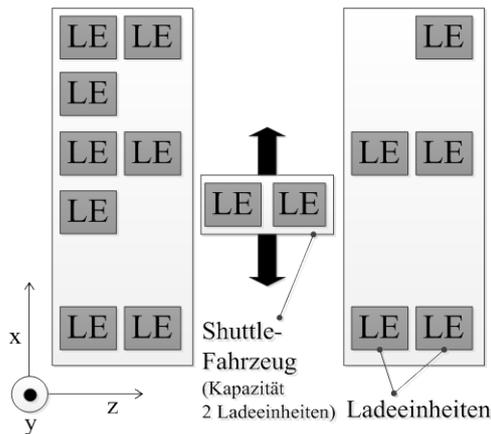
Die Aufnahme und Abgabe der Ladeinheit erfolgt durch Unterfahren, Ziehen/Schieben oder Greifen mit Teleskopgabeln [3] des auf dem Shuttle-Fahrzeug fest verbauten Lastaufnahmemittels. Sehr häufig erfolgt die Methode des Greifens. Abbildung 6 zeigt den Lastaufnahmeprozess durch Greifen mit Teleskopgabeln. Das Shuttle-Fahrzeug befindet sich zu Beginn vor der Ladeinheit (Abbildung 6, a), die Teleskopgabeln fahren aus (Abbildung 6, b), die Ladeinheit wird gegriffen (Abbildung 6, c), die Teleskopgabeln fahren ein (Abbildung 6, d). Der Lastaufnahmeprozess ist abgeschlossen, sobald sich die Ladeinheit auf dem Shuttle-Fahrzeug in der vorgesehenen Position befindet (Abbildung 6, e).



**Abbildung 6: Lastaufnahmeprozess Shuttle-Fahrzeug, Reihenfolge des Ablaufs entsprechend der Buchstabenfolge a – e**

Shuttle-Systeme können bzgl. der Lagertiefe oder der Kapazität der Lastaufnahmemittel variieren. Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für ein doppeltiefes Shuttle-System mit doppeltiefem Gang. Die Tiefe des Gangs definiert die Anzahl an nebeneinander geförderten Ladeein-

heiten durch das Shuttle-Fahrzeug. Der Gang ist deshalb doppeltief, weil das Shuttle-Fahrzeug zwei Ladeeinheiten nebeneinander aufnehmen kann. Die Kapazität des Lastaufnahmемittels des Shuttle-Fahrzeugs muss dabei nicht zwangsläufig zwei betragen. Möglich sind auch zwei Lastaufnahmемittel, die jeweils nur eine Ladeeinheit aufnehmen können. Ein Lastaufnahmемittel kann dann links aufnehmen und abgeben, das andere rechts.

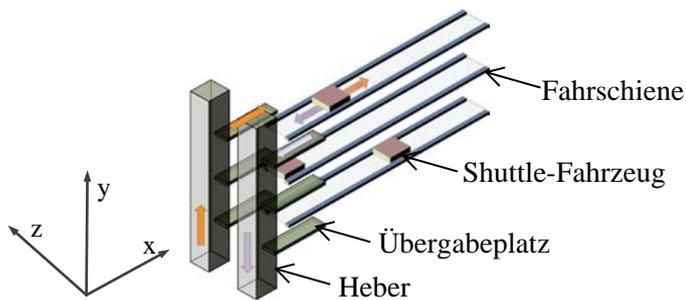


**Abbildung 7: Doppeltiefes Shuttle-System mit doppeltiefem Gang, Sicht von oben**

In dieser Arbeit werden Shuttle-Systeme gemäß [10] eingeordnet. Die Einordnung ergibt sich anhand der Möglichkeit des Shuttle-Fahrzeugs, die Ebene oder den Gang zu wechseln.

### 2.2.1 Gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme

In gang- und ebenengebundenen (GEG) Shuttle-Systemen ist das Shuttle-Fahrzeug auf eine bestimmte Ebene festgelegt. In dieser Ebene verbleibt das Shuttle-Fahrzeug während der Laufzeit des Shuttle-Systems. Das Shuttle-Fahrzeug verlässt die Ebene nur zu Wartungszwecken oder bei einer Störung. Die Heber fördern Ladeeinheiten, in der VDI-Richtlinie 2692 werden sie als Behälterheber bezeichnet [1]. Abbildung 8 zeigt ein gang- und ebenengebundenes Shuttle-System in dreidimensionaler Ansicht.



**Abbildung 8: Gang- und ebenegebundenes Shuttle-System mit zwei Hebern pro Gang, in jeder Ebene befindet sich ein Übergabeplatz zur Einlagerung und einer zur Auslagerung, dreidimensionale Ansicht, in Anlehnung an [1]**

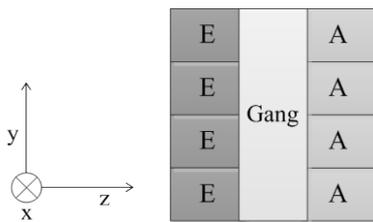
Der Bewegungsablauf einer Ein- und Auslagerung läuft wie folgend beschrieben ab.

**Einlagerung:** Am Einlagerungspunkt nimmt der Heber die Ladeeinheit auf. Der Heber fährt zu einer Ebene und gibt die Ladeeinheit auf einen Übergabeplatz ab. Das in der Ebene befindliche Shuttle-Fahrzeug nimmt die Ladeeinheit auf und fährt anschließend zu einem freien Lagerplatz. Das Shuttle-Fahrzeug gibt die Ladeeinheit ab.

**Auslagerung:** Ein Shuttle-Fahrzeug in einer Ebene fährt zu einem belegten Lagerplatz und entnimmt dort eine Ladeeinheit. Bei mehrfachtiefern Shuttle-Systemen lagert das Shuttle-Fahrzeug, um eine verdeckte Ladeeinheit auszulagern, zunächst die vorderen Ladeeinheiten an freie Lagerplätze in dieser Ebene um. Mit der Ladeeinheit, die ausgelagert werden soll, fährt das Shuttle-Fahrzeug anschließend zum Übergabeplatz. Das Shuttle-Fahrzeug gibt die Ladeeinheit am Übergabeplatz ab. Der Heber fährt zur Ebene und nimmt die Ladeeinheit vom Übergabeplatz auf. Der Heber fährt zum Auslagerungspunkt und gibt die Ladeeinheit dort ab.

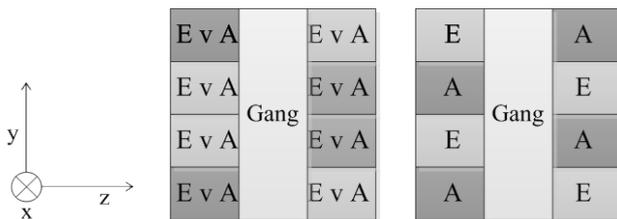
Häufig werden zwei Heber pro Gang eingesetzt. Ein solches System erzielt, im Vergleich mit weiteren Ausprägungen von Shuttle-Systemen, die höchsten Durchsätze. Das ist dadurch begründet, dass der Grad der Entkopplung der horizontalen und vertikalen Förderung der Ladeeinheiten deutlich höher ist als bei den weiteren Ausprägungen von Shuttle-Systemen. Wenn zwei Heber eingesetzt werden, so kann die Zuordnung der Übergabeplätze variiert werden. Dadurch kann es z. B. beiden Hebern ermöglicht werden, Doppelspiele auszuführen.

Abbildung 9 zeigt eine feste Zuordnung, die dazu führt, dass die Heber keine Doppelspiele bilden können. Dadurch, dass zwei Heber pro Gang genutzt werden, können aber dennoch gleichzeitig Einlagerungen und Auslagerungen durchgeführt werden.



**Abbildung 9: Feste Zuordnung der Übergabepätze in einem System mit vier Lager-ebenen, Sicht von vorne, E: Übergabepatz Einlagerung, A: Übergabepatz Auslagerung, in Anlehnung an [11]**

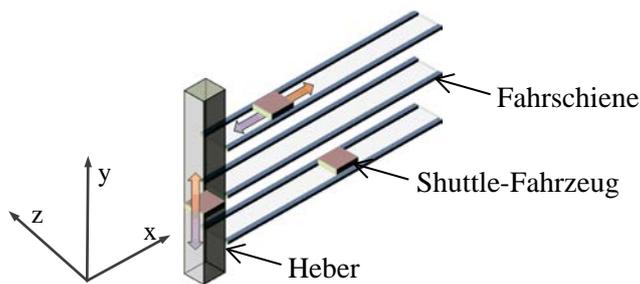
Abbildung 10 zeigt eine chaotische und eine feste, abwechselnde, Zuordnung, die dazu führt, dass die Heber Doppelspiele bilden können. Eine chaotische Zuordnung ermöglicht dem Heber jeden freien Übergabepatz zur Belegung mit einer einzulagernden Ladeeinheit und einem Shuttle-Fahrzeug jeden freien Übergabepatz zur Belegung mit einer auszulagernden Ladeeinheit zu verwenden. Sobald ein Heber Übergabepätze zur Ein- und Auslagerung erreichen kann, kann er Doppelspiele ausführen.



**Abbildung 10: Zuordnung der Übergabepätze, Sicht von vorne, links chaotische Zuordnung, rechts feste, abwechselnde Zuordnung, E: Übergabepatz Einlagerung, A: Übergabepatz Auslagerung, E v A: Einlagerung oder Auslagerung, rechte Seite in Anlehnung an [11]**

### 2.2.2 Ganggebundene Shuttle-Systeme

Das Shuttle-Fahrzeug hat in einem ganggebundenem (GG) Shuttle-System die Möglichkeit, die Ebene zu wechseln. Das ermöglichen Heber, die Shuttle-Fahrzeuge fördern. In der VDI-Richtlinie 2692 werden sie als Fahrzeugheber bezeichnet [1]. Abbildung 11 zeigt ein ganggebundenes Shuttle-System in dreidimensionaler Ansicht.



**Abbildung 11: Ganggebundenes Shuttle-System, dreidimensionale Ansicht, in Anlehnung an [1]**

Der Bewegungsablauf einer Ein- und Auslagerung läuft wie folgend beschrieben ab.

**Einlagerung:** Der Heber steht mit einem Shuttle-Fahrzeug am Einlagerungspunkt. Das Shuttle-Fahrzeug nimmt eine Ladeinheit auf. Der Heber fördert das Shuttle-Fahrzeug zu einer Ebene. Das Shuttle-Fahrzeug verlässt den Heber und fährt zu einem freien Lagerplatz. Das Shuttle-Fahrzeug lagert die Ladeinheit ein.

**Auslagerung:** Das Shuttle-Fahrzeug befindet sich in einer Ebene, fährt zu einem belegten Lagerplatz und nimmt dort eine Ladeinheit auf. Das Shuttle-Fahrzeug fährt zum Aufnahmepunkt für den Heber. Der Heber fährt zur Ebene, in der sich das Shuttle-Fahrzeug befindet. Der Heber nimmt das Shuttle-Fahrzeug auf und fährt zum Auslagerungspunkt. Das Shuttle-Fahrzeug gibt die Ladeinheit ab.

Ganggebundene Shuttle-Systeme erzielen durch die stärkere Abhängigkeit zwischen Heber und Shuttle-Fahrzeug (das Shuttle-Fahrzeug benötigt den Heber für jede Einlagerung, jede Auslagerung und jeden Ebenenwechsel) meist einen geringeren Durchsatz als Gang- und Ebenengebundene Shuttle-Systeme.

### 2.2.3 Weitere Shuttle-Systeme

Es gibt eine Vielzahl weiterer Ausprägungen von Shuttle-Systemen, der Systematik der vorhergehenden Abschnitte können ebenengebundene und ungebundene Shuttle-Systeme hinzugefügt werden. Ebenengebundene Shuttle-Systeme ermöglichen dem Shuttle-Fahrzeug nur den Wechsel des Gangs, nicht aber der Ebene. Ungebundene Shuttle-Systeme ermöglichen dem Shuttle-Fahrzeug jeden Lagerplatz im Shuttle-System zu erreichen.

Weitere Variationen von Shuttle-Systemen sind beispielsweise:

- Variationen der Positionen der Heber, z. B. der Einsatz von Hebern an mehreren Positionen innerhalb des Gangs.

- Kombinierte Shuttle-Systeme, die sowohl Behälterheber, als auch Fahrzeugheber pro Gang einsetzen. Der Fahrzeugheber dient dann nur dem Ebenenwechsel der Shuttle-Fahrzeuge, die Behälterheber sind für die Förderung der Ladeeinheiten zuständig.
- Der Einsatz von Hebern, die sowohl Shuttle-Fahrzeuge als auch Ladeeinheiten fördern können.

### **2.3 Abgrenzung der untersuchten Shuttle-Systeme**

In dieser Arbeit wird ein analytisches Modell für einfach- und doppeltiefe gang- und ebenegebundene sowie ein Simulationsmodell für einfach- und doppeltiefe gang- und ebenegebundene und ganggebundene Shuttle-Systeme mit einer Kapazität von einer Ladeeinheit für Heber und Shuttle-Fahrzeuge entwickelt. Die Beschreibung des Systemverhaltens basiert auf den Ausgangsgrößen Durchsatz, Spielzeit, Wartezeit, Auslastungsgrad, Auftragsdurchlaufzeit und Warteschlangenlänge.

### **2.4 Einordnung der Lagerstrategien**

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über bekannte und vorstellbare, d. h. zu entwickelnde, Lagerstrategien gegeben. Anschließend erfolgt die Abgrenzung der in dieser Arbeit vorrangig betrachteten Lagerstrategien.

Die Lagerstrategie beschreibt die Steuerung des Lagers, allgemein formuliert wird die Festlegung getroffen auf Basis welcher Bedingungen welche Bewegung eines oder mehrerer Fördermittel erfolgt. Die Lagerstrategie hat die Zielsetzung einer Optimierung hinsichtlich eines bestimmten Kriteriums, z. B. der Durchsatzsteigerung. Die Optimierung erfolgt unter der Einhaltung von Bedingungen, z. B. die Einhaltung einer Frist zur Bearbeitung des Auftrags.

Bei Lagerstrategien ist eine Unterscheidung in statische und situationsabhängige Lagerstrategien möglich. Als statische Lagerstrategie wird jede Lagerstrategie bezeichnet, die sich nicht oder kaum an geänderte Rahmenbedingungen anpasst. In der Praxis werden häufig weitgehend statische Lagerstrategien eingesetzt.

Als situationsabhängige Lagerstrategie wird ein Algorithmus verstanden, der kontinuierlich die aktuelle Situation sowie, falls möglich, Prognosewerte für eine Anpassung der Steuerung nutzt. Als situationsabhängige Lagerstrategie ist auch der situations- und prognoseorientierte Einsatz unterschiedlicher „statischer“ Strategien zu bezeichnen, d. h. der Wechsel einer bestimmten statischen Lagerstrategie zum optimalen Zeitpunkt.

Tabelle 1 zeigt eine Auswahl einzelner Lagerstrategien, zugeordnet zu statischen oder situationsabhängigen Lagerstrategien sowie zu den Kategorien Belegungs- (Einlager-, Umlager-, oder Nichtbeschäftigungsstrategie) oder Bewegungsstrategie (Auslager-, Reihenfolge-, Ruhepositions-, Ausfall- oder Kinematikstrategie). Die Zuordnung der Lagerstrategien zu den Überbegriffen Einlager-, Umlagerstrategie, usw., dient der Systematisierung der Lagerstrategien. Um die Tabelle übersichtlich zu halten, werden die Begriffe mit Nummern versehen, z. B. 1 = Einlagerstrategie. Eine in der Tabelle genannte Lagerstrategie kann dann entsprechend der in Klammer gesetzten Nummer einem Überbegriff zugeordnet werden, z. B. bedeutet Feste Einlagerung (1) = Feste Einlagerung (Einlagerstrategie). Einlagerstrategien kommen bei Einlagerungen zum Einsatz, sie legen einen Lagerplatz zur Einlagerung nach bestimmten Kriterien fest (das Kriterium steckt häufig im Namen der Lagerstrategie, z. B. Sortenreine Kanalbelegung). Alle in Tabelle 1 genannten Begriffe werden in den Abschnitten 2.4.1 und 2.4.2 beschrieben.

**Tabelle 1: Lagerstrategien (1 = Einlagerstrategie, 2 = Umlagerstrategie, 3 = Auslagerstrategie, 4 = Reihenfolgestrategie, 5 = Ruhepositionsstrategie, 6 = Nichtbeschäftigungsstrategie, 7 = Ausfallstrategie, 8 = Kinematikstrategie)**

Lagerstrategien	
Statisch	Situationsabhängig
Feste Einlagerung (1)	Durchsatzbasierte Einlagerung (1)
Chaotische Einlagerung (1)	Massenbasierte/Energetische Einlagerung (1)
Sortenreine Kanalbelegung (1)	Nachfrageorientierte Verdeckung (1)
Einlagerung nahe Ein-/Auslagerungspunkt (E/A-Punkt) (1)	Auftragsbasierte Ermittlung der Umlagerungsfahrten (2)
Einlagerung nahe Auslagerung (1)	Priorisierte Auslagerung (3)
Umlagerung nahe Auslagerung (2)	Reihenfolgesortierung der Aufträge (4)
Zufällige Auslagerung (3)	Auftragsbasierte Ermittlung der Ruheposition (5)
Auslagerung nächster Platz am E/A-Punkt (3)	Lagerreorganisation (6)
First in, first out (FIFO), Last in, Last out (LIFO), usw. (3)	Reaktion auf den Ausfall eines Fördermittels (Heber oder Shuttle-Fahrzeug) (7)
Warten auf nächsten Auftrag am E/A-Punkt (Return on I/O-Point (RIO)) (5)	Durchsatzangepasste Kinematik (8)
Warten auf nächsten Auftrag bei der letzten angefahrenen Position (Point-of-Service-Completion (POSC)) (5)	Geschwindigkeitsanpassung zum gleichzeitigen Eintreffen von Fahrzeugheber und Shuttle-Fahrzeug (8)

#### 2.4.1 Statische Lagerstrategien

##### 2.4.1.1 Einlagerstrategien

###### 2.4.1.1.1 Chaotische Einlagerung

Ladeeinheiten werden in freien Lagerplätzen eingelagert. Es gibt keine Reservierung von Lagerplätzen. Die Auswahl eines freien Lagerplatzes erfolgt chaotisch, d. h. zufällig. Es gibt

keine Bevorzugung oder Benachteiligungen von Lagerplätzen, beispielsweise wird ein freier Lagerplatz am Ende eines Gangs mit derselben Wahrscheinlichkeit wie ein freier Lagerplatz zu Beginn des Gangs zur Einlagerung ausgewählt.

#### 2.4.1.1.2 Einlagerung nahe E/A-Punkt

Die Ladeeinheiten werden vorrangig nahe des E/A-Punktes eingelagert. Es wird ein freier Lagerplatz gesucht, der sich möglichst nahe des E/A-Punktes befindet. Bei Shuttle-Systemen kann diese Lagerstrategie im Detail Unterschiede aufweisen, z. B. welche Ebenen oder Lagerplätze zuletzt ausgewählt werden. Beispielsweise kann die Ebenenauswahl mit derselben Wahrscheinlichkeit erfolgen, aber freie Lagerplätze werden zuerst nahe dem Ganganfang gesucht und zur Einlagerung ausgewählt. Oder es wird nur bis zu bestimmten Lagerplätzen gesucht, z. B. bis zur Hälfte des Gangs, und anschließend in der nächsten Ebene. Das wäre ein sukzessives Bilden von Blöcken innerhalb des Shuttle-Systems, die bei steigendem Lagerfüllgrad immer größer werden.

#### 2.4.1.1.3 Weitere Lagerstrategien

Weitere Lagerstrategien sind:

- Feste Einlagerung, es werden Lagerplätze für Artikel reserviert.
- Sortenreine Kanalbelegung, jeder Lagerplatz eines Kanals wird mit demselben Artikel belegt.
- Einlagerung nahe Auslagerung, bei Doppelspielen wird der Lagerplatz mit der kürzesten Distanz zur nächsten Auslagerung gewählt.

#### 2.4.1.2 Umlagerstrategien

Umlagerstrategien haben in mehrfachtiefen Lagersystemen die Aufgabe, erforderliche Umlagerungsfahrten (weil eine verdeckte Ladeeinheit ausgelagert werden soll) zu steuern und zu optimieren. Das Optimierungskriterium ist häufig die Zeit des Umlagerspiels, diese soll so kurz wie möglich sein.

#### **Umlagerung nahe Auslagerung**

Wenn sich eine Ladeeinheit bei mehrfachtiefen Shuttle-Systemen in einem verdeckten Lagerplatz befindet, d. h. es befindet sich im Lagerkanal vor der auszulagernden Ladeeinheit mindestens eine Ladeeinheit, muss eine Umlagerung erfolgen. Ziel der Lagerstrategie Umlagerung nahe Auslagerung ist es, die Fahrtzeit für die benötigten Umlagerungsfahrten zu minimieren. Es wird der dem Auslagerkanal nächstliegende freie Lagerkanal zur Umlagerung ausgewählt. Bei mehreren umzulagernden Ladeeinheiten (bei einer Kapazität von mehr als

zwei Ladeeinheiten pro Lagerkanal) muss dieser Vorgang mehrmals durchgeführt werden, bis alle Umlagerungen durchgeführt wurden und die gewünschte Ladeeinheit zur Auslagerung nicht mehr verdeckt ist.

#### 2.4.1.3 Auslagerstrategien

##### 2.4.1.3.1 Zufällige Auslagerung

Die Lagerstrategie bezieht sich auf den Fall, dass mehrere Ladeeinheiten mit demselben Artikel an unterschiedlichen Plätzen eingelagert sind. Wenn ein Auslagerauftrag zu mehrfach eingelagerten Ladeeinheiten vorhanden ist, wird zufällig eine der Ladeeinheiten ausgewählt, ohne Berücksichtigung weiterer Kriterien.

##### 2.4.1.3.2 Auslagerung nächster Platz am Auslagerungspunkt

Bei mehreren verfügbaren Ladeeinheiten zur Erfüllung des Auslagerauftrags wird die Ladeeinheit ausgewählt, die die geringste Distanz zum Auslagerungspunkt aufweist. Für Shuttle-Systeme kann die Lagerstrategie variiert werden, die Regel nächster Platz am Auslagerungspunkt kann z. B. nur auf die Auswahl der Ebene beschränkt werden, um die Heber-Spielzeit zu optimieren.

##### 2.4.1.3.3 First in - First out

Die zuerst eingelagerte Ladeeinheit wird bei einer Auslagerung ausgewählt. Das trifft zu, wenn mehrere Ladeeinheiten mit demselben Artikel im Lager verfügbar sind.

##### 2.4.1.3.4 Last in - First out

Die zuletzt eingelagerte Ladeeinheit wird bei einer Auslagerung ausgewählt.

#### 2.4.1.4 Ruhepositionsstrategien

##### 2.4.1.4.1 Warten auf den nächsten Auftrag am Einlagerungspunkt und Gassenanfang

Der Heber fährt nach Abarbeitung eines Auftrages zum Einlagerungspunkt. Die Shuttle-Fahrzeuge fahren zum Gassenanfang. Das erzeugt zusätzliche Fahrten: Wenn z. B. durch einen Heber eine Einlagerung erfolgt ist und noch kein weiterer Einlagerungsauftrag vorliegt, fährt der Heber dennoch zurück zum Einlagerungspunkt. Wenn als nächster Auftrag dann eine Auslagerung erfolgt, so könnte im ungünstigen Fall eine längere Fahrtzeit zur Auslagerebene erfolgen. Ein Vorteil besteht dann, wenn durch das „vorbereitende“ Zurückfahren die Wartezeit des nächsten Auftrages reduziert (und damit der Durchsatz gesteigert) wird.

#### 2.4.1.4.2 Warten auf den nächsten Auftrag an der zuletzt befindlichen Position

Die Fördermittel verbleiben immer an der letzten Position und bewegen sich erst wieder, wenn ein neuer Auftrag vorliegt. Wenn häufig Doppelspiele möglich sind, kann es zur Erhöhung der Wartezeit der Aufträge im Vergleich zur Lagerstrategie „Warten auf den nächsten Auftrag am Einlagerungspunkt und Gassenanfang“ kommen, da das Fördermittel dann zunächst zum Einlagerungspunkt/Gassenanfang zurückfahren muss.

### 2.4.2 Situationsabhängige Lagerstrategien

#### 2.4.2.1 Einlagerstrategien

##### 2.4.2.1.1 Durchsatzbasierte Einlagerung

Die Lagerplatzbelegung orientiert sich anhand der aktuellen Häufigkeit des Auftragseingangs für die Artikel. Es werden für Artikel mit einer hohen Zugriffshäufigkeit Zonen gebildet, die sich nahe des Ein-/Auslagerungspunktes befinden. Artikel mit einer geringeren Zugriffshäufigkeit werden in hintere Lagerbereiche eingelagert. Theoretisch kann jeder Artikel einzeln bestimmte Lagerplätze/einen bestimmten Lagerplatz zugeordnet bekommen, d. h. jeder Artikel entspräche dann einer eigenen Zone. Die A-Zone (Zone 1) enthält die am häufigsten nachgefragte Artikelgruppe, die B-Zone (Zone 2) die am zweithäufigsten nachgefragte, usw. Die Situationsabhängigkeit ist durch mögliche Änderungen der Nachfragehäufigkeit der Artikel gegeben.

Zur Ermittlung der optimalen Einteilung der Zonen (das ist die Zuordnung jedes Platzes zu einer bestimmten Zone) können Optimierungsalgorithmen eingesetzt werden, die Zoneneinteilungen mit der kürzesten Spielzeit bzw. dem maximalen Durchsatz ermitteln.

##### 2.4.2.1.2 Weitere Lagerstrategien

Weitere Lagerstrategien sind:

- Nachfrageorientierte Verdeckung, dabei werden Artikel mit hoher Zugriffshäufigkeit nicht verdeckt.
- Massenbasierte Einlagerung, die Ladeeinheiten werden in Abhängigkeit ihrer Masse Lagerplätzen zugeordnet.
- Energetische Einlagerung, jedem Lagerplatz wird ein Energiebedarf zugewiesen.

##### 2.4.2.2 Reihenfolgestrategien

Bei Reihenfolgestrategien wird davon ausgegangen, dass die Lagerplätze zur Einlagerung bereits festgelegt wurden, durch z. B. andere Lagerstrategien wie die Chaotische Einlage-

rung. Wenn für ein Fördermittel die Möglichkeit eines Doppelspiels besteht, d. h. wenn zu einer Einlagerung auch ein noch wartender Auslagerauftrag vorliegt, und wenn weiterhin die Anzahl der wartenden Auslageraufträge größer als eins ist, dann besteht durch die Reihenfolgesortierung der Aufträge die Möglichkeit, die Zwischenfahrtzeit des Fördermittels zu reduzieren. Die Zwischenfahrtzeit ist die Leerfahrt des Fördermittels, die zwischen der Ein- und Auslagerung anfällt. Das Fördermittel fährt nach der Einlagerung zur Position der Auslagerung. Bei der Reihenfolgesortierung wird derjenige Auftrag ausgewählt, der der aktuellen Einlagerposition am nächsten liegt.

Für Shuttle-Systeme ist der Heber besonders für eine Reihenfolgesortierung geeignet, da hier häufig das höchste Potential zur Durchsatzsteigerung vorliegt. Weitere Durchsatzsteigerungen können erzielt werden, wenn die Shuttle-Fahrzeuge zusätzlich auch eine Reihenfolgesortierung vornehmen.

Die Implementierung der Reihenfolgestrategie kann auf unterschiedliche Arten geschehen, diese werden als Block Sequencing und Dynamic Sequencing bezeichnet.

Die Reihenfolgebildung wird bei Block Sequencing für eine bestimmte Anzahl Aufträge der Auftragsliste durchgeführt, z. B. für die ersten zehn wartenden Einlager- und Auslageraufträge. Für diese Aufträge werden dann optimale Kombinationen der Ein- und Auslagerungen gebildet. Damit wird sichergestellt, dass jeder Auftrag bearbeitet wird, da die nächsten zehn Aufträge erst bearbeitet werden, wenn der erste Block abgeschlossen wurde [12].

Die Reihenfolgebildung erfolgt bei Dynamic Sequencing auf Basis aller bekannten Aufträge, d. h. bei jeder aktuellen Einlagerung wird in der vorliegenden Auftragsliste nach dem Auslagerauftrag gesucht, der der Einlagerung am nächsten liegt. Dabei besteht das Risiko, dass einzelne Auslageraufträge sehr lange nicht bearbeitet werden. Die Vermeidung dieses Risikos kann über die Vorgabe einer maximalen Wartezeit eines Auslagerauftrages geschehen. Sobald die Wartezeit den kritischen Wert übersteigt, wird dieser Auslagerauftrag bei der nächsten Spielbildung des Fördermittels ausgewählt [12].

Die Reihenfolgesortierung kann sich auch auf die Einhaltung einer bereits vorgegebenen Reihenfolge zur Abarbeitung der vorliegenden Aufträge beziehen. In diesem Fall führt die Anwendung der Reihenfolgesortierung häufig zu einer Senkung des Durchsatzes, da der Heber mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auf eine Ladeinheit zur Auslagerung warten muss, obwohl bereits andere Ladeinheiten auf Übergabeplätzen bereitliegen. Die Einhaltung einer vorgegebenen Reihenfolge kann sich aber vorteilhaft für nachgelagerte Systeme auswirken, z. B. Kommissionierplätze. Die Reihenfolgesortierung wird auch als Sequenzierung bezeichnet, beide Begriffe sind gebräuchlich.

### 2.4.2.3 Lagerreorganisation

Die Lagerreorganisation beschreibt das Umlagern von Ladeeinheiten. Die Lagerreorganisation ist von den Umlagerstrategien zu unterscheiden: Bei der Lagerreorganisation wird nicht umgelagert, weil ein verdeckter Artikel „befreit“ werden muss. Die Ladeeinheiten werden aus anderen Gründen umgelagert:

- Eine Motivation für Umlagerungen kann eine Durchsatzsteigerung sein, die bei einem prognostizierten Auftragseingang eintreten würde, wenn die Ladeeinheiten sich an optimalen Lagerplätzen befinden würden.
- Umlagerungen können auch erforderlich werden, um die Zonenzuordnung wieder herzustellen, wenn z. B. Artikel aufgrund geänderter Häufigkeiten einer anderen Zone zugeordnet werden, oder wenn sich Zonengrenzen ändern und sich deshalb Artikel mit einer anderen Zonenzuordnung in der Zone befinden.

Die Lagerreorganisation kann in Ruhephasen des Shuttle-Systems, oder während des laufenden Betriebs, erfolgen. Während des laufenden Betriebs steht die Lagerreorganisation in Konkurrenz zur Auftragsbearbeitung, daher sind Phasen mit niedrigem Auftragseingang geeignet.

Bei jeder Lagerreorganisation werden folgende Schritte durchgeführt.

- Festlegung der umzulagernden Ladeeinheiten.
- Bestimmung der optimalen Lagerplätze für die umzulagernden Ladeeinheiten. Optimal i. S. der schnellstmöglichen Bearbeitungszeit, oder der Einhaltung einer definierten Bearbeitungszeit.
- Durchführen der Umlagerungen mit minimaler Spielzeit oder einer definierten Spielzeit.

Für jeden der genannten Prozesse sind Algorithmen erforderlich. Diese können auf einfachen Regeln basieren oder komplex und rechenintensiv sein. Zur Festlegung der umzulagernden Ladeeinheiten sollte bekannt sein, welche Aufträge wann erwartet werden und in welcher Zeit diese abgearbeitet sein sollten. Wenn nicht genau bekannt ist welche Aufträge erwartet werden, da diese beispielsweise sehr kurzfristig eingehen, so ist eine Prognose über die erwarteten Aufträge erforderlich. Diese kann z. B. auf Basis von Daten aus vergangenen Auftragseingängen generiert werden. Zur Bestimmung der optimalen Lagerplätze der Artikel für die festgelegten umzulagernden Aufträge und die Durchführung der Umlagerungen mit minimaler Spielzeit kann die vollständige Enumeration oder ein heuristischer Ansatz verwendet werden, z. B. evolutionäre Algorithmen. Heuristische Ansätze werden in Veröffentlichungen

zur Lagerreorganisation für automatische Hochregallager mit Regalbediengeräten häufig eingesetzt.

Zu beachten ist, dass durch die Lagerreorganisation die Energiekosten und die Wartungskosten des Shuttle-Systems steigen, da Heber und Shuttle-Fahrzeuge mehr Fahrten zurücklegen. Die Vorteile der Lagerreorganisation sind u. a. kürzere Auftragsdurchlaufzeiten, geringere Arbeitskosten (beispielsweise durch die Senkung unproduktiver Wartezeiten der Mitarbeiter an den Kommissionierplätzen) sowie eine höhere Liefertreue.

#### 2.4.2.4 Weitere Lagerstrategien

Weitere situationsabhängige Lagerstrategien sind:

- Auslagerstrategien, beinhalten die Priorisierung von Aufträgen.
- Umlagerstrategien, es werden auftragsbasierte Positionen zur Umlagerung ermittelt.
- Ruhepositionstrategien, die Fördermittel warten an auftragsbasiert festgelegten Positionen.
- Durchsatzangepasste Kinematik, die Fördermittel passen die Geschwindigkeit der Auftragslage an.
- Gleichzeitiges Eintreffen von Heber und Shuttle-Fahrzeug, die Geschwindigkeit der Fördermittel wird so angepasst, das kein Fördermittel auf das andere warten muss.
- Reaktion auf Heber/Shuttle-Ausfall, sorgt für die Weiterführung des Shuttle-Systems, auch wenn einzelne Fördermittel ausfallen.

## 2.5 Abgrenzung der untersuchten Lagerstrategien

In dieser Arbeit erfolgt die Entwicklung der Lagerstrategien „Durchsatzbasierte Einlagerung“, „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ und „Lagerreorganisation“ für Shuttle-Systeme mit dafür geeigneten Algorithmen. Als Referenzstrategie für Vergleiche und die Ermittlung des Optimierungspotentials wird die Lagerstrategie „Chaotische Einlagerung“ eingesetzt. Für die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ werden Algorithmen zur Optimierung entwickelt.

### 3 Stand der Forschung

Im Folgenden wird der Stand der Forschung der Shuttle-Systeme beschrieben. Dabei werden Veröffentlichungen zur analytischen Modellbildung sowie Simulationsuntersuchungen erläutert. Diese beinhalten z. T. die Anwendung von Lagerstrategien. Anschließend wird der Stand der Forschung zusammengefasst und der Forschungsbedarf beschrieben. Es gibt inzwischen auch einige Veröffentlichungen, die den zum Veröffentlichungszeitpunkt aktuellen Stand der Forschung wiedergeben und die relevanten Veröffentlichungen beschreiben und analysieren, z. B. [10, 13].

Das Kapitel wird unterteilt in Veröffentlichungen zu analytischen Modellen (Abschnitt 3.1) und Simulationsstudien (Abschnitt 3.2). Es wird weiterhin gegliedert nach der Systemausprägung der Shuttle-Systeme. In Abschnitt 3.3 wird der Stand der Forschung zusammengefasst.

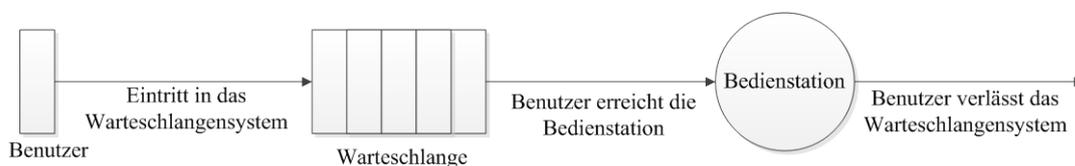
#### 3.1 Analytische Modellbildung

In diesem Abschnitt werden Veröffentlichungen zur analytischen Modellbildung von Shuttle-Systemen beschrieben. In vielen Veröffentlichungen werden Modelle mit Hilfe der Warteschlangentheorie gebildet. Daher erfolgt im folgenden Abschnitt 3.1.1 eine kurze Erläuterung zur Kennzeichnung und Anwendung bekannter Warteschlangensysteme.

##### 3.1.1 Kennzeichnung und Anwendung von Warteschlangensystemen

Zur Warteschlangentheorie gibt es umfangreiche Literatur, in der deutschsprachigen Literatur gibt z. B. [14] eine ausführliche Einführung und Übersicht in die Warteschlangentheorie.

Ein Warteschlangensystem (engl. queueing systems) besteht aus einer oder mehrerer Warteschlangen (engl. queue) und einer oder mehrerer Bedienstationen (engl. server). Abbildung 12 zeigt ein Warteschlangensystem.



**Abbildung 12: Warteschlangensystem mit einer Warteschlange und einer Bedienstation, in Anlehnung an [14]**

Ein Warteschlangensystem wird auch als Bediensystem bezeichnet, beide Begriffe sind gebräuchlich. Benutzer treten in das Warteschlangensystem ein und reihen sich in eine Warteschlange ein. Anschließend warten sie, bis sie an einer Bedienstation bedient werden. Sobald die Bedienung abgeschlossen ist, verlassen sie das Warteschlangensystem wieder.

Mit der Warteschlangentheorie können Kennzahlen zu Warteschlangensystemen ermittelt werden, z. B.

- der Durchsatz (wie viele Benutzer verlassen das System pro Zeiteinheit),
- die mittlere Länge der Warteschlange (wie viele Benutzer warten im Mittel im Warteschlangensystem),
- die mittlere Wartezeit eines Benutzers (Wartezeit in der Warteschlange) und
- die mittlere Verweilzeit eines Benutzers (Zeit, die der Benutzer im Warteschlangensystem verbringt, d. h. Warte- + Bedienzeit).

Zur Ermittlung der Kennzahlen mit der Wahrscheinlichkeitstheorie werden weitere Annahmen getroffen. Für diese Annahmen werden Notationen verwendet, die in [15] eingeführt und später erweitert wurden:

- Zwischenankunftszeiten der Benutzer (in welchen zeitlichen Abständen treten Benutzer in das System ein). Notation: A.
- Bedienzeiten (wieviel Zeit benötigt ein Bedienvorgang). Notation: B.
- Anzahl der Bediener. Notation: C.
- Aufnahmekapazität des Warteschlangensystems (wie viele Benutzer können sich maximal innerhalb des Warteschlangensystems befinden, d. h. Warteschlange + Benutzer, die bedient werden). Notation: K.
- Gesamtpopulation der Benutzer (Gesamtzahl der in das Warteschlangensystem eintretenden Benutzer). Notation: P.
- Auswahldisziplin (nach welchen Kriterien wird ein Benutzer in der Warteschlange zur Bedienung ausgewählt). Notation: S.

Warteschlangensysteme können so mit sechs Buchstaben, ggf. auch weniger, wenn einzelne Annahmen nicht erwähnt werden, dargestellt werden. Die Notation erfolgt in der Reihenfolge A/B/C/K/P/S. Die ersten drei Buchstaben werden zur Klassifizierung eines Warteschlangensystems immer angegeben, die letzten drei nur, wenn sie von festgelegten Annahmen abweichen. Wenn K weggelassen wird, dann gilt die Annahme, dass K unendlich groß ist, d. h. das Warteschlangensystem hat eine unendlich große Aufnahmekapazität. Wenn P weggelassen wird, dann gilt die Annahme, dass P unendlich groß ist, d. h. dass unendliche viele

Benutzer in das Warteschlangensystem eintreten können. Wenn  $S$  weggelassen wird, dann gilt die Annahme, dass ein Benutzer in der Warteschlange nach dem Prinzip First come, First serve (FCFS, häufig auch als FIFO bezeichnet) zur Bedienung ausgewählt wird. Der wartende Benutzer mit frühestem Eintrittszeitpunkt in das Warteschlangensystem wird zur Bedienung von einer freien Bedienstation ausgewählt.

Für die Zwischenankunfts- und Bedienzeiten gibt es Kennzeichnungen, die die Buchstaben  $A$  und  $B$  in der Notation ersetzen. D. h. sobald eine bestimmte Verteilung einer Zwischenankunfts- oder Bedienzeit bekannt ist (oder angenommen wird), wird die entsprechende Verteilung durch eine Kennzeichnung eingetragen. Häufig verwendete Kennzeichnungen sind  $M$ ,  $G$  und  $GI$ .

$M$  steht für Markov-Charakteristik und bezeichnet exponentiell verteilte Zwischenankunfts- oder Bedienzeiten. Die Zwischenankunftszeit zweier Benutzer ist demnach häufig gering, mit absteigender Häufigkeit treten längere Zwischenankunftszeiten ein.

$GI$  steht für General Independent und bezeichnet eine beliebige identische Verteilung der Zwischenankunfts- oder Bedienzeiten (Gleichverteilung).

$G$  steht für General, damit wird die Verteilung als nicht bekannt bezeichnet.

Der Buchstabe  $C$  wird bei einem Bediener häufig durch die Zahl 1 ersetzt, bei mehreren Bedienern wird der Buchstabe  $s$  eingesetzt, z. T. auch andere Buchstaben, die sich auf einen Anwendungsfall beziehen. Wenn eine unendlich große Anzahl an Bedienern zur Verfügung steht, wird  $\infty$  eingesetzt.

$K$  wird z. T. durch Buchstaben, die sich auf einen Anwendungsfall beziehen, ersetzt. Bei der Modellierung von Warteschlangensystemen für Shuttle-Systeme können z. B. die Shuttle-Fahrzeuge als Kapazitätsgrenze gelten und mit  $V$  (Vehicle) bezeichnet werden, wenn die Heber als Kapazitätsgrenze des Systems angenommen werden, können sie mit  $L$  bezeichnet werden, siehe [16, 17].

$S$  wird oft durch die Auswahldisziplin ersetzt, z. B. LIFO (Last in, First Out).

Durch die genannten Notationsvorgaben können Warteschlangensysteme mit kurzen Notationen beschrieben werden. In der Literatur ist die mathematische Vorgehensweise für sehr viele Warteschlangensysteme beschrieben, z. B. in [14]:

- $M/M/1$  (ein Bediener).
- $M/M/1/K$  (ein Bediener, maximal  $K$  Benutzer im System, weitere eintretende Benutzer werden abgewiesen).

- $M/M/\infty$  (unendliche Bedieneranzahl, d. h. jeder Benutzer wird sofort bedient).
- $M/M/s$  ( $s$  Bediener).
- $M/M/s/K$  ( $s$  Bediener, maximal  $K$  Benutzer im System, weitere eintretende Benutzer werden abgewiesen).
- $M/M/1/K/P$  (ein Bediener, maximal  $K$  Benutzer im System, weitere eintretende Benutzer werden abgewiesen, maximal  $P$  eintretende Benutzer ins System).
- $M/G/1$  (Bedienzeit ist generell verteilt, d. h. keine nähere Klassifizierung, ein Bediener).
- $M/G/1/K$  (Bedienzeit ist generell verteilt, d. h. keine nähere Klassifizierung, ein Bediener, maximal  $K$  Benutzer im System, weitere eintretende Benutzer werden abgewiesen). Das Modell ist detailliert in [18] beschrieben.

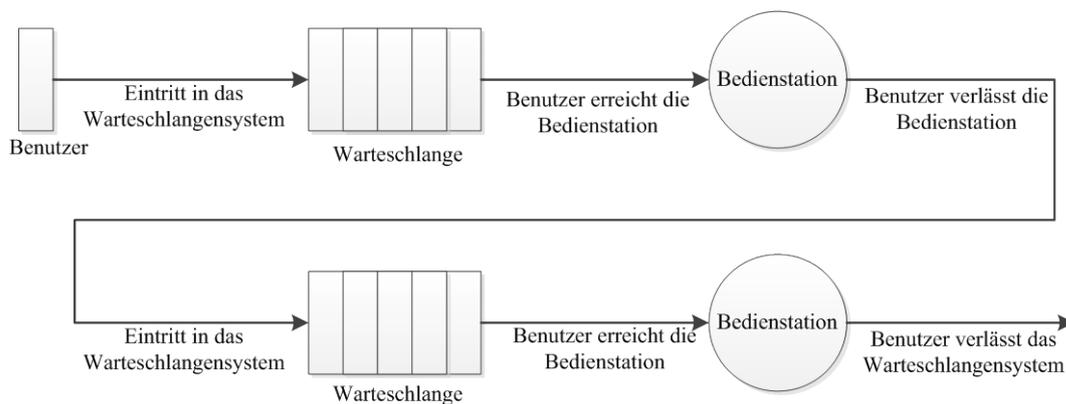
Die Auswahl eines bekannten Warteschlangensystems erfolgt nach dem vorliegenden Anwendungsfall. Um sich dem am ehesten geeigneten Warteschlangensystem zu nähern, kann die Notationsreihenfolge systematisch abgearbeitet werden:

- Definition der Benutzer des Anwendungsfalls.
- Annahme einer Verteilung für die Zwischenankunftszeiten, oder Annahme einer nicht bekannten Verteilung.
- Definition der Bediener des Anwendungsfalls.
- Annahme einer Verteilung für die Bedienzeiten, oder Annahme einer nicht bekannten Verteilung.
- Festlegung der Anzahl der Bediener des Anwendungsfalls.
- Festlegung der Aufnahmekapazität des Warteschlangensystems des Anwendungsfalls (wenn erforderlich, ansonsten ist sie unendlich groß).
- Festlegung der Populationsgröße (wenn erforderlich, ansonsten ist sie unendlich groß).
- Festlegung der Auswahldisziplin (wenn erforderlich, ansonsten gilt FCFS).

Für bestimmte Anwendungsfälle kann es auch erforderlich sein, mehrere Warteschlangensysteme miteinander zu verbinden. Die austretenden Benutzer treten z. B. direkt in ein weiteres Warteschlangensystem ein. Dann können die berechneten Kennzahlen des einen Warteschlangensystems als Eintrittsgrößen für das nächste Warteschlangensystem genutzt werden. Wenn z. B. Benutzer mit einer bestimmten zeitlichen Verteilung das Warteschlangensystem verlassen, dann ist diese Verteilung eine relevante Eingangsgröße für das Warteschlangensystem, in das die Benutzer nachfolgend eintreten.

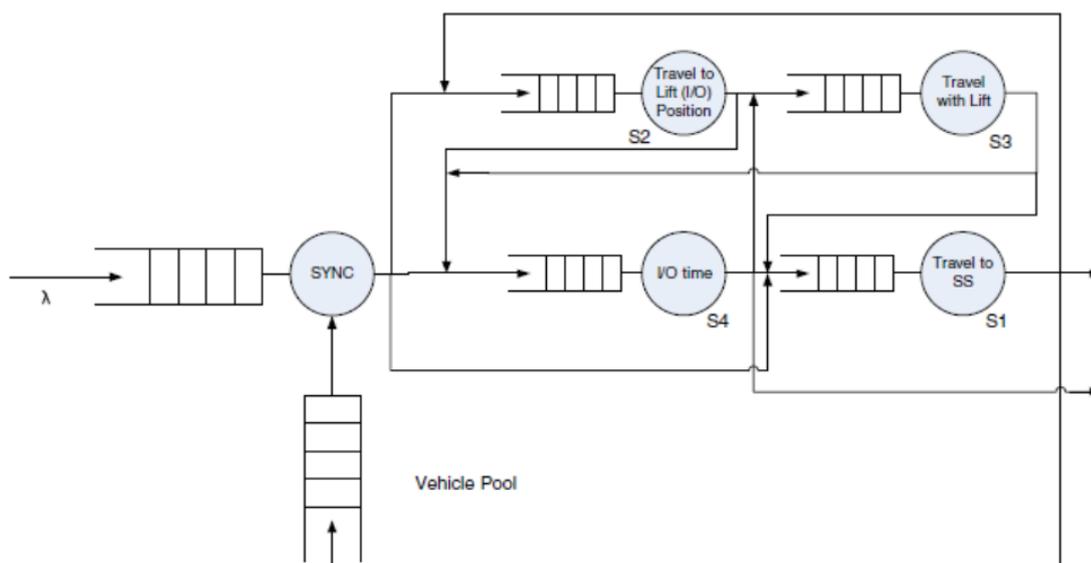
Beispiel: Bezogen auf Shuttle-Systeme können Auftragseingänge zur Auslagerung als Benutzer aufgefasst werden und die Shuttle-Fahrzeuge als Bediener. Die Aufträge „verlassen“ das Warteschlangensystem, wenn das Shuttle-Fahrzeug den Auftrag bearbeitet und am Übergabepplatz abgegeben hat. Diese Aufträge treten dann direkt in das nächste Warteschlangensystem ein, sie warten dann auf die Bedienung, Bediener ist der Heber.

Abbildung 13 zeigt das beschriebene Beispiel mit dem Vokabular zur allgemeinen Formulierung von Warteschlangensystemen.



**Abbildung 13: Seriell verkettete Warteschlangensysteme**

Wenn die Ausgänge eines Warteschlangensystems Einfluss auf vorherige Warteschlangensysteme haben, kann die Komplexität der Berechnung deutlich gesteigert werden. Abbildung 14 zeigt ein Beispiel für Warteschlangensysteme aus der Literatur, mit gegenseitiger Abhängigkeit, das für ein ungebundenes Shuttle-System gilt.



**Abbildung 14: Warteschlangensysteme mit gegenseitiger Abhängigkeit [19]**

Die Bezeichnungen sind in Abbildung 14 nicht allgemein gewählt, sondern beziehen sich auf den Anwendungsfall. Nach der Festlegung der Notation (Auswahl der Annahmen) wird in der Literatur nach der Berechnungsvorgabe der interessierenden Kennzahlen (Durchsatz, Verweilzeit usw.) gesucht und die Berechnungsvorgabe anschließend angewendet.

### 3.1.2 Ganggebundene Shuttle-Systeme

Tabelle 2 und Tabelle 3 zeigen vorhandene Veröffentlichungen und nennen die Lagertiefe, Lagerstrategie, Spielbildung, Modellanwendung, Ausgangsgrößen und weitere Inhalte.

**Tabelle 2: Veröffentlichungen zu analytischen Modellen für GG-Systeme, Teil 1, LR = Lagerreorganisation**

Veröffentlichung	Lagertiefe	Einlagerstrategie	Reihenfolgesortierung	LR
Epp [20]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung	FCFS	-
Kriehn [21]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung, Durchsatzbasierte Einlagerung	Chaotisch, Ebenenbezogen, Fahrzeugbezogen	-
VDI-2692 [1]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung	Chaotisch	-

**Tabelle 3: Veröffentlichungen zu analytischen Modellen für GG-Systeme, Teil 2**

Veröffentlichung	Spielbildung	Modell	Ausgangsgrößen	Sonstiges
Epp [20]	Einzelspiele	Warteschlangenmodell, G/G/1	Durchsatz, Spielzeit, Warteschlange, Auftragsdurchlaufzeit	Nur ein Shuttle-Fahrzeug pro Gang modellierbar
Kriehn [21]	Einzel- und Doppelspiele	Wartezeitmodell, Warteschlangenmodell, M/M/1/K, M/G/1/K	Durchsatz, Spielzeit, Wartezeit, Auslastungsgrad	-
VDI-2692 [1]	Einzel- und Doppelspiele	Summation Fahrt- und Lastaufnahmezeiten	Durchsatz, Spielzeit, Auslastungsgrad	Vernachlässigung Wartezeiten

In der Dissertation von Epp [20] wird ein G/G/1-Warteschlangenmodell eingesetzt. Das Modell ist auf ein Shuttle-Fahrzeug pro Gang beschränkt. Weiterhin werden Multi-Level Shuttle-Fahrzeuge modelliert, d. h. Shuttle-Fahrzeuge, die mit ihrem Lastaufnahmemittel mehrere Ebenen erreichen können. Die Validierung zeigte geringe Abweichungen der Modellwerte zu simulativ ermittelten Vergleichswerten. Die VDI-Richtlinie 2692 [1] enthält u. a. auch eine Berechnung für ganggebundene Shuttle-Systeme. Aus dem Verhältnis Spielzeit Shuttle-Fahrzeug/Spielzeit Heber wird die benötigte Anzahl Shuttle-Fahrzeuge im System berechnet. Durch das Vernachlässigen der Wartezeiten des Hebers und der Shuttle-Fahrzeuge wird der Durchsatz zu hoch berechnet. Der Ansatz der VDI-Richtlinie 2692 [1] wird für ganggebundene Shuttle-Systeme von Kriehn [21] erweitert. Die Validierung mit Simulationsmodellen

zeigte eine relativ genaue Übereinstimmung der Modelle, die Abweichungswerte blieben in den meisten Fällen unter 4 %<sup>1</sup>.

Es konnten keine Veröffentlichungen<sup>2</sup> zu doppeltiefen Shuttle-Systemen und zur Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung, „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ mit Zielsetzung der Optimierung des Durchsatzes, und „Lagerreorganisation“, gefunden werden.

### 3.1.3 Gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme

Tabelle 4 und Tabelle 5 zeigen vorhandene Veröffentlichungen und nennen die Lagertiefe, Lagerstrategie, Spielbildung, Modellanwendung, Ausgangsgrößen und weitere Inhalte.

**Tabelle 4: Veröffentlichungen zu analytischen Modellen für GEG-Systeme, Teil 1, LR = Lagerreorganisation**

Veröffentlichung	Lagertiefe	Einlagerstrategie	Reihenfolgesortierung	LR
Borovinsek et al. [22]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung	chaotisch	-
Eder, Kartnig [23]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung	chaotisch	-
Ekren et al. [24]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung	chaotisch	-
Epp [20]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung	FCFS	-
Epp et al. [25]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung	FCFS	-
Lerher [26]	Doppeltief	Chaotische Einlagerung	chaotisch	-
Lerher et al. [27]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung	chaotisch	-
Marchet et al. [28]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung	FCFS	-
Zou et al. [29]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung	FCFS, parallele und sequentielle Auftragsauswahl	-

**Tabelle 5: Veröffentlichungen zu analytischen Modellen für GEG-Systeme, Teil 2**

Veröffentlichung	Spielbildung	Modell	Ausgangsgrößen	Sonstiges
Borovinsek et al. [22]	Einzel- und Doppelspiele	Summation Fahrt- und Lastaufnahmezeiten	Durchsatz, Spielzeit, Kosten, Energiebedarf	Vernachlässigung Wartezeiten
Eder, Kartnig [23]	Einzel- und Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge	Warteschlangenmodell, M/M/1/K, M/G/1/K	Durchsatz, Spielzeit	Berechnung der optimalen Höhe
Ekren et al. [24]	Einzel- und Doppelspiele	Warteschlangenmodell, G/G/2, G/G/m	Wartezeit, Warteschlange	Vernachlässigung Lastaufnahmezeiten
Epp [20]	Einzel- und Doppelspiele	Warteschlangenmodell, G/G/1	Durchsatz, Spielzeit, Warteschlange, Auftragsdurchlaufzeit	Berechnung Quantile

<sup>1</sup> Diese Arbeit erweitert u. a. die in [21] formulierten Modelle für weitere Systemausprägungen (doppeltiefe Shuttle-Systeme und gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme).

<sup>2</sup> Ausnahme: Eigene Veröffentlichung.

Epp et al. [25]	Einzelspiele	Warteschlangenmodell, G/G/1	Durchsatz, Spielzeit, Warteschlange, Auftragsdurchlaufzeit	Berechnung Quantile
Lerher [26]	Einzel- und Doppelspiele	Summation Fahrt- und Lastaufnahmezeiten	Durchsatz, Spielzeit	Engpassbildung Heber/Shuttle-Fahrzeuge
Lerher et al. [27]	Einzel- und Doppelspiele	Summation Fahrt- und Lastaufnahmezeiten	Spielzeit	Vernachlässigung Wartezeiten
Marchet et al. [28]	Einzelspiele	Warteschlangenmodell, M/G/1, M/M/1	Auftragsdurchlaufzeit, Wartezeit, Auslastungsgrad	-
Zou et al. [29]	Einzelspiele	Warteschlangenmodell	Spielzeit, Wartezeit, Warteschlange, Auslastungsgrad	Heber wird schneller aktiviert

Borovinsek et al. [22] nutzten einen genetischen Algorithmus, um die Ergebnisse drei analytischer Modelle zu optimieren, es wurden dabei der Durchsatz, die Kosten und der Energiebedarf optimiert. Eder und Kartnig [23] entwickelten ein analytisches Modell zur Berechnung einfachtiefer Shuttle-Systeme. Die Ergebnisse der Validierung mit einem Simulationsmodell zeigen bei beiden Warteschlangenmodellen geringe Abweichungen. Weiterhin wurde die Warteschlange genutzt, um bei gegebener Lagerlänge die optimale Höhe des Lagers, mit dem Kriterium maximaler Durchsatz, zu ermitteln. Ekren et al. [24] entwickelten ein offenes Warteschlangenmodell. Die Validierung mit einem Simulationsmodell zeigte zum Teil erhebliche Abweichungen (größer 20 % bei einem Nutzungsgrad von 85 %). Epp et al. [25] entwickelten ein offenes Warteschlangenmodell, in der Dissertation von Epp [20] wird dieses aufgegriffen und weiterentwickelt. Epp berechnet mit seinem Modell u. a. Quantile, z. B. das 95%-Quantil für die Auftragsdurchlaufzeit eines Auslagerauftrages. Die Validierung zeigte geringe Abweichungen, wie bereits in Abschnitt 3.1.2 genannt. Lerher et al. [27] entwickelten ein analytisches Modell eines einfachtiefen Shuttle-Systems, das einen ähnlichen Ansatz wie die VDI-Richtlinie 2962 verfolgt. Die Validierung mit einem Simulationsmodell zeigte, dass die analytisch ermittelten Heber-Spielzeiten zwischen 18 – 23 % von den simulativ ermittelten Heber-Spielzeiten abweichen. Lerher [26] erweiterte das Modell um doppelte Shuttle-Systeme, d. h. die Spielzeitberechnung der Shuttle-Fahrzeuge beinhaltet eine mögliche Umlagerung einer vorderen Ladeinheit, um eine hintere Ladeinheit auszulagern. In der Veröffentlichung wird keine Validierung durch ein Simulationsmodell beschrieben. Es wird angenommen, dass die Ladeinheiten vorrangig in den hinteren Lagerplätzen der Lagerkanäle eingelagert werden. Die Umlagerstrategie ist das Suchen des nächstmöglichen freien Lagerplatzes. Marchet et al. [28] entwickelten ein offenes Warteschlangenmodell zur Abbildung eines einfachtiefen Shuttle-Systems. Das analytische Modell wurde mit einem Simulationsmodell validiert, die Abweichungen betragen unter 4 %. Zou et al. [29] entwickelten Warteschlangenmodelle mit einer parallelen und einer sequentiellen Auftragsverga-

be. Eine parallele Auftragsvergabe ermöglicht einem Auslagerungsauftrag gleichzeitig den Heber und das Shuttle-Fahrzeug anzufordern. Bei der sequentiellen Auftragsvergabe kann entweder das Shuttle-Fahrzeug, oder der Heber angefordert werden. Das Warteschlangenmodell wurde simulativ validiert, die Abweichungen zum Simulationsmodell waren gering. Schloz et al. [30] beschreiben die Verknüpfung von Lagerstrategien mit einer Lagersituation und die situationsabhängige Anpassung einer Lagerstrategie daran.

Es konnten keine Veröffentlichungen zur Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung, und „Lagerreorganisation“, gefunden werden. Es ist ein Modell für doppeltiefe Shuttle-Systeme [26] und ein Ansatz für die Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ [29] vorhanden. Die Aufträge werden so sortiert, dass der Heber bereits vor Ankunft des Shuttle-Fahrzeugs aktiviert werden kann.

#### 3.1.4 Weitere Shuttle-Systeme

Zu ungebundenen Shuttle-Systemen existieren mehrere Veröffentlichungen zur analytischen Modellbildung. Grundannahme aller nachfolgend vorgestellten Veröffentlichungen ist die Chaotische Einlagerung. Diese Annahme ist sehr hilfreich bei der Entwicklung analytischer Modelle. Andererseits können damit keine Kennzahlen für die Anwendung anderer Lagerstrategien zur Lagerplatzbelegung ermittelt werden.

Folgende Veröffentlichungen wurden analysiert und werden hier stichwortartig genannt:

- Cai et al. [19], halb-offenes Warteschlangenmodell.
- Ekren et al. [31], halb-offenes Warteschlangenmodell.
- Ekren et al. [32], Erweiterung des in [31] entwickelten Modells.
- Ekren und Heragu [33], Regressionsmodell aus Simulationsdaten.
- Fukunari und Malmborg [17], Warteschlangenmodelle:  $M/M/s/s/\infty$ ,  $M/M/s/\infty/\infty$ .
- Fukunari und Malmborg [34], Warteschlangenmodell mit Integration angrenzender Systeme.
- Heragu et al. [35], offenes Warteschlangenmodell.
- Kuo et al. [16], Warteschlangenmodelle:  $M/G/s$ ,  $M/M/s$ ,  $G/G/s$ .
- Malmborg [36], analytisches Modell mit Materialfluss-Matrizen.
- Malmborg [37], Weiterentwicklung von [36], Implementierung eines Kostenmodells.
- Roy et al. [38], halb-offenes Warteschlangenmodell.
- Roy et al. [39], Betrachtung von Blockadeeffekten über halb-offene Warteschlangenmodelle.

- Roy et al. [40], Bestimmung von Zonen über halb-offenes Warteschlangenmodell.
- Roy et al. [41], weitere Betrachtung von Blockadeeffekten über halb-offene Warteschlangenmodelle.
- Roy et al. [42], halb-offenes Warteschlangenmodell zur Analyse von Ruhepositionsstrategien.
- Tappia et al. [43], offenes Warteschlangenmodell, Kostenmodell.

Zu Ebenengebundenen Shuttle-Systemen wurden folgende Veröffentlichungen analysiert:

- Heragu et al. [44], offenes Warteschlangenmodell.
- Roy et al. [45], Markov-Ketten.
- Tappia et al. [43], halb-offenes Warteschlangenmodell.

In den genannten Veröffentlichungen wurden mit den entwickelten Modellen hauptsächlich die folgenden Ausgangsgrößen zur Beschreibung des Systemverhaltens ermittelt: Durchsatz, Spielzeit, Wartezeit und Auslastungsgrad.

### 3.2 Simulationsmodelle

Shuttle-Systeme wurden in vielen Veröffentlichungen simuliert, um ein analytisches Modell zu validieren, siehe Abschnitt 3.1.

In diesem Abschnitt werden ergänzend die Veröffentlichungen vorgestellt, die Simulationsmodelle zur Ermittlung von Ausgangsgrößen und Interpretation des Systemverhaltens einsetzen, ohne ein analytisches Modell zu validieren.

#### 3.2.1 Ganggebundene Shuttle-Systeme

Tabelle 6 und Tabelle 7 zeigen vorhandene Veröffentlichungen und nennen die Lagertiefe, Lagerstrategie, Spielbildung, Modellanwendung, Ausgangsgrößen und weitere Inhalte.

**Tabelle 6: Veröffentlichungen zu Simulationsmodellen für GG-Systeme, Teil 1, LR = Lagerreorganisation**

Veröffentlichung	Lagertiefe	Einlagerstrategie	Reihenfolgesortierung	LR
Carlo, Vis [46]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung	Sortierung der nächsten drei Aufträge	-
Güller, Hegmanns [47]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung (nur zur Initialisierung, jede Ladeeinheit wird nach der Auslagerung wieder am selben Platz eingelagert)	chaotisch	-

Ha, Chae [48]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung, Lagerung nahe E/A-Punkt, priorisierte Lagerung in Ebenen mit Shuttle-Fahrzeug	FCFS	-
Kaczmarek et al. [49]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung, Durchsatzbasierte Einlagerung	FIFO, chaotisch, routenoptimiert	-

**Tabelle 7: Veröffentlichungen zu Simulationsmodellen für GG-Systeme, Teil 2**

Veröffentlichung	Spielbildung	Ausgangsgrößen	Sonstiges
Carlo, Vis [46]	Einzel- und Doppelspiele	Durchsatz, Spielzeit	Blockadevermeidung Heber
Güller, Hegmanns [47]	Einzel- und Doppelspiele	Spielzeit, Auftragsdurchlaufzeit	Agentenbasiert, Analyse Positionen pro Auftrag
Ha, Chae [48]	Einzel- und Doppelspiele	Spielzeit, Auslastungsgrad	Heber kann Shuttle-Fahrzeuge und Ladeeinheiten fördern.
Kaczmarek et al. [49]	Doppelspiele	Durchsatz, Spielzeit	Analyse Anzahl Shuttle-Fahrzeuge

Carlo und Vis [46] untersuchten Reihenfolgestrategien, die maximal 3 Aufträge im Voraus betrachten und für diese die optimale Abarbeitungsreihenfolge festlegen. Primäres Ziel ist die Verhinderung einer Blockade der Heber, sekundäres Ziel die Optimierung des Durchsatzes. Durch die entwickelten Algorithmen wurden deutliche Durchsatzsteigerungen erzielt (bis zu 82 %). Güller und Hegmanns [47] entwickelten ein agentenbasiertes Simulationsmodell. Die Ergebnisse zeigten, dass eine Auftragsstruktur, in der mehrheitlich eine oder zwei Positionen pro Auftrag vorkommen, einen höheren Durchsatz erbringen als eine gleichmäßig verteilte Auftragsstruktur. Die Zeit zur Bearbeitung eines Auftrags steigt bei steigender Positionszahl an. Ha und Chae [48] entwickelten ein Simulationsmodell, in dem der Heber Ladeeinheiten oder Shuttle-Fahrzeuge fördern kann. Shuttle-Fahrzeuge werden in diesem Shuttle-System nur unbeladen von einer Ebene zur anderen gefördert. Es werden verschiedene Algorithmen zur Vermeidung von Blockaden oder Kollisionen der Shuttle-Fahrzeuge angewendet. Kaczmarek et al. [49] entwickelten ein Simulationsmodell eines ganggebundenen Shuttle-Systems. Die Simulationsstudie zeigte u. a., dass mit steigender Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge der Durchsatz steigt. Die Steigung ist beim Wechsel von einem auf zwei Shuttle-Fahrzeuge am höchsten. Sie nimmt mit jedem weiteren Shuttle-Fahrzeug ab.

Es konnten keine Veröffentlichung zur Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ gefunden werden. Es ist ein Modell für die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ vorhanden [49]. Zwei Ansätze für die Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“, bezogen auf eine Sortierung zur Durchsatzsteigerung, sind vorhanden [49, 46].

### 3.2.2 Gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme

Tabelle 8 und Tabelle 9 zeigen vorhandene Veröffentlichungen und nennen die Lagertiefe, Lagerstrategie, Spielbildung, Modellanwendung, Ausgangsgrößen und weitere Inhalte.

**Tabelle 8: Veröffentlichungen zu Simulationsmodellen für GEG-Systeme, Teil 1, LR = Lagerreorganisation**

Veröffentlichung	Lagertiefe	Einlagerstrategie	Reihenfolgesortierung	LR
Ekren et al. [50]	Einfachtief	Durchsatzbasierte Einlagerung	chaotisch	-
Kriehn et al. [11, 51]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung, Durchsatzbasierte Einlagerung	Chaotisch, Durchsatzoptimierte Sortierung	ja
Kriehn et al. [52]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung, Durchsatzbasierte Einlagerung	Chaotisch	-
Lerher et al. [53, 54]	Einachtief	Chaotische Einlagerung	chaotisch	-
Marchet et al. [55]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung	FCFS	-
Ning et al. [56]	Einfachtief	Chaotische Einlagerung initial (danach nur Betrachtung von Auslagerungen)	Nächstgelegener Auftrag	-
Zhang et al. [57]	Doppeltief	Sortenrein, Einlagerung priorisiert in halbvolle Lagerkanäle, Einlagerung priorisiert in leere Lagerkanäle, Einlagerung nahe E/A, Einlagerung nahe Auslagerung	Priorisierung der unteren Ebenen, der halbvollen oder vollen Kanäle. Auslagerung nahe E/A	-

**Tabelle 9: Veröffentlichungen zu Simulationsmodellen für GEG-Systeme, Teil 2**

Veröffentlichung	Spielbildung	Ausgangsgrößen	Sonstiges
Ekren et al. [50]	Doppelspiele	Auslastungsgrad, Auftragsdurchlaufzeit	Zonierung erfolgt nur ebenenbasiert
Kriehn et al. [11, 51]	Einzel- und Doppelspiele	Durchsatz, Auftragsdurchlaufzeit	Einzel-/Doppelspiel-Vergleich für Heber
Kriehn et al. [52]	Einzelspiele Heber, Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge	Durchsatz, Spielzeit, Wartezeit, Auslastungsgrad	Generierung Simulationsmodelle
Lerher et al. [53, 54]	Doppelspiele	Durchsatz, Spielzeit, Auslastungsgrad	Optimales Höhe/Länge-Verhältnis
Marchet et al. [55]	Einzelspiele	Durchsatz, Auftragsdurchlaufzeit, Wartezeit, Auslastungsgrad	Optimierung durch Parametervariation
Ning et al. [56]	Einzelspiele	Durchsatz, Spielzeit, Wartezeit, Auslastungsgrad	Mehrere Heber innerhalb des Gangs
Zhang et al. [57]	Einzelspiele	Spielzeit, Auslastungsgrad	-

Ekren et al. [50] untersuchten Auswirkungen der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“. Dabei wurden ebenenbasierte Zonierungen untersucht, d. h. alle Lagerplätze einer Ebene wurden einer Zone zugeordnet. So ist eine Optimierung der Heberspielzeit möglich, nicht aber der Spielzeit der Shuttle-Fahrzeuge, da diese jeden Lagerplatz in der Ebene mit

derselben Wahrscheinlichkeit ansteuern. Der Heber kann daher maximal einen Durchsatz pro Ebene erzeugen, der dem Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs entspricht. Da der Durchsatz des Shuttle-Fahrzeugs nicht gesteigert wird, ist das die Begrenzung des Gesamtdurchsatzes. Kriehn et al. [11, 51] entwickelten ein Simulationsmodell zur Ermittlung des Optimierungspotentials der Lagerstrategien „Durchsatzbasierte Einlagerung“, „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ und „Lagerreorganisation“. Die Ergebnisse zeigten, dass Heber mit geringer und Shuttle-Fahrzeuge mit hoher Geschwindigkeit zu einer langen A-Zone in Fahrtrichtung der Shuttle-Fahrzeuge führen, die nur wenige Ebenen unter- und oberhalb des E/A-Punktes umfassen. Die Veröffentlichung ist bisher die einzige, die sich mit Lagerreorganisation für Shuttle-Systeme beschäftigt. Zu automatischen Lagersystemen mit Regalbediengeräten gibt es aber einige Veröffentlichungen zur Lagerreorganisation, deren Ideen, Vorgehensweisen und entwickelte Algorithmen z. T. auch für Shuttle-Systeme angepasst werden können, u. a. Pazour und Carlo [58], Carlo und Giraldo [59] oder Chen et al. [60]. Kriehn et al. [52] entwickelten eine Generierungsmöglichkeit für Simulationsmodelle, um diese variabel parametrieren zu können. Die Ergebnisse der Simulationsstudien zeigten, dass der Einfluss der Lastübergabezeiten auf den Durchsatz hoch ist und dass Geschwindigkeitserhöhungen der Heber nur bis zu einem bestimmten Grenzwert Durchsatzsteigerungen erbringen, solange nicht auch weitere Eingangsgrößen (Shuttle-Fahrzeuge, Lastübergabezeiten) verändert werden. Lerher et al. [53, 54] entwickelten ein Simulationsmodell und ermittelten das optimale Länge/Höhe-Verhältnis für vorgegebene Geschwindigkeitswerte der Heber und Shuttle-Fahrzeuge. Marchet et al. [55] entwickelten ein Simulationsmodell und eine Vorgehensweise zur Ermittlung einer optimalen Konfiguration des Shuttle-Systems bzgl. der Variation der Anzahl der Gänge, Ebenen und Lagerplätze. Die Ergebnisse der Simulationsstudie zeigten, dass für gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme tendenziell längere Gänge (und dafür weniger Gänge) von Vorteil sind. Im Gegensatz dazu sind bei ganggebundenen Shuttle-Systemen tendenziell kürzere Gänge (und dafür mehr Gänge) von Vorteil. Ning et al. [56] entwickelten ein Simulationsmodell, das mehrere Heber verwendete und untersuchte den Einfluss der Positionen der Heber im Gang. Zhang et al. [57] entwickelten ein Simulationsmodell für gang- und ebenengebundene und ganggebundene Shuttle-Systeme. Alle Lagerstrategien beziehen sich auf Ebenen- oder Lagerplatzpriorisierungen. Die Ergebnisse einer Simulationsstudie zeigten, dass die Auslagerstrategie Auslagerung nahe E/A den höchsten Durchsatz erzielte.

Es konnte keine Veröffentlichung zur Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ gefunden werden<sup>3</sup>. Es ist ein Modell für die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ vorhanden [50], dieses berücksichtigt eine ebenenweise Zonierung. Ein Modell für die Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“, bezogen auf eine Sortierung zur Durchsatzsteigerung, ist vorhanden [56].

### 3.2.3 Weitere Shuttle-Systeme

Folgende Veröffentlichungen zu ungebundenen Shuttle-Systemen wurden analysiert und werden hier stichwortartig genannt:

- Ekren et al. [61], Ruhepositionsstrategien, Reihenfolgesortierung der Aufträge, Position E/A-Punkte.
- Ekren und Heragu [62], Länge/Breite/Höhe-Analysen zur Findung eines Optimums.
- Ekren und Heragu [63], Vergleich ungebundene Shuttle-Systeme mit automatischen Lagersystemen mit Regalbediengeräten.
- Fang und Tang [64], Schwarmalgorithmus.
- Fukunari et al. [65], Ruhepositionsstrategien.
- Kumar et al. [66], Zonierung, Ausrichtung des Quergangs.
- Langanke et al. [67], Modell eines realen Shuttle-Systems, Zonierung, Anzahl Shuttle-Fahrzeuge.
- Lienert und Günthner [68], Lienert und Fottner [69, 70], Vermeidung von Blockaden, Reihenfolgesortierung der Aufträge.

Die Ausgangsgrößen sind meist Durchsatz, Spielzeit, Wartezeit, Auslastungsgrad und Auftragsdurchlaufzeit.

Es konnten keine Veröffentlichungen zu Simulationsstudien mit ebenengebundenen Shuttle-Systemen gefunden werden (die nicht der Validierung eines analytischen Modells dienen).

## 3.3 Zusammenfassung

Zunächst wird der Forschungsbeitrag für die analytische Modellbildung beschrieben (bezugnehmend auf Abschnitt 3.1).

Durch die Literaturrecherche kann festgestellt werden, dass Shuttle-Systeme analytisch vorrangig über Warteschlangenmodelle beschrieben werden. Modelle, die nicht auf der Warte-

---

<sup>3</sup> Ausnahme: Eigene Veröffentlichung

schlangentheorie basieren, vernachlässigen häufig die Wartezeiten. Sie summieren Einzel-fahrtzeiten und bilden Mittelwerte, die dann in Addition mit weiteren definierten Stillstandszeiten während eines Spiels zur Spielzeit führen. Durch die Vernachlässigung von Wartezeiten nehmen die berechneten Ausgangsgrößen des Shuttle-Systems zu hohe (Durchsatz) bzw. zu niedrige (Spielzeit) Werte an. Für doppeltiefe Shuttle-Systeme gibt es eine Veröffentlichung von Lerher [26], mit einem Modell zur Ermittlung der Zeit zur Umlagerung, die dann in die Spielzeit miteinfließt. Weiterhin zeigt sich, dass für ganggebundene Shuttle-Systeme bisher nur eine wissenschaftliche Veröffentlichung<sup>4</sup> existiert (Epp [20], Dissertation, siehe Abschnitt 3.1.2). Ganggebundene Shuttle-Systeme können bei Berücksichtigung von Wartezeiten bisher nur mit einem Shuttle-Fahrzeug pro Gang modelliert werden.

Die bisher veröffentlichten analytischen Modelle basieren auf der Gleichverteilung der Lagerplatzbelegung. Das bedeutet, dass Lagerstrategien nur schwer abbildbar sind, denn diese erfordern meist eine Aufhebung dieser Annahme. Als Beispiel sei die Durchsatzbasierte Einlagerung genannt, diese kann ohne eine Aufhebung dieser Annahme nicht modelliert werden, da die Lagerplätze mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten angesteuert werden.

Die analytischen Modelle dienen häufig der Optimierung des Lange/Höhe/Breite-Verhältnisses eines Shuttle-Systems sowie der Ermittlung der optimalen Anzahl an Gängen oder Hebern und Shuttle-Fahrzeugen.

Der Forschungsbeitrag zur Ermittlung und Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen durch die analytische Modellbildung kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Es werden analytische Modelle für ganggebundene und gang- und ebenengebundene doppeltiefe Shuttle-Systeme entwickelt. Der doppeltiefe Modellierungsansatz dieser Arbeit unterscheidet sich von dem bisher veröffentlichten Ansatz von Lerher [26]. Er lässt Lagerstrategien zu, die die hintersten Positionen im Shuttle-System zur Einlagerung nicht verwenden, siehe Abschnitt 4.1.3.2.3.
- Zur Beschreibung von Lagerstrategien wird in dieser Arbeit die Annahme der Gleichverteilung aufgehoben. Eine einstellbare Verteilung der Lagerplatzbelegung wird dadurch ermöglicht.
- Insbesondere die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ kann mit der einstellbaren Verteilung modelliert werden. Für diese Lagerstrategie existiert ein Optimum. Ein Optimierungsalgorithmus optimiert die Zonen unter Anwendung

---

<sup>4</sup> Epp hatte ausgewählte Inhalte seiner Dissertation vorveröffentlicht. Diese Vorveröffentlichung wurde aber nicht gesondert gezählt, da die „vollständige“ Veröffentlichung die Dissertation darstellt.

des analytischen Modells hinsichtlich des Optimierungskriteriums Durchsatzmaximierung. Sowohl die mathematische Vorgehensweise zur Modellierung der einstellbaren Verteilung als auch der Optimierungsalgorithmus sind neu.

- Unterschiedliche Lagerstrategien ermöglichen die Ermittlung der Reaktion des Systemverhaltens bei ansonsten gleichen Eingangsgrößen.

Im Folgenden wird der Forschungsbeitrag für die Simulation beschrieben (bezugnehmend auf Abschnitt 3.2)

Die Forschungsarbeiten, die Daten zu Shuttle-Systemen mit Simulationsstudien ermitteln, basieren ebenfalls weitgehend auf der Annahme der Gleichverteilung. Auf die Vorgehensweisen in den Veröffentlichungen kann in dieser Arbeit z. T. aufgebaut werden, z. B. die Art der Variierung der Parameter und Messung der Ausgangsgrößen. Ein parametrierbares Simulationsmodell, das einfach- und doppeltiefe ganggebundene und gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme abbilden kann und einstellbare Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt, konnte in bisherigen Veröffentlichungen nicht gefunden werden. Die Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ kommt in den bisherigen Veröffentlichungen zu ganggebundenen und gang- und ebenengebundenen Shuttle-Systemen nicht vor. Reihenfolgesortierungen werden in einigen Veröffentlichungen nicht mit dem Ziel der Durchsatzmaximierung angewendet, sondern um eine vorgegebene Auftragsreihenfolge einzuhalten.

Der Forschungsbeitrag zur Ermittlung und Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen durch die Entwicklung eines Simulationsmodells kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Es wird ein Simulationsmodell für einfach- und doppeltiefe ganggebundene und gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme entwickelt
- Das Modell kann Grenzwerte des Systemverhaltens ermitteln (Annahme: Volle Auftragslast) oder schwankende Auftragslasten im Zeitverlauf abbilden.
- Mit dem Simulationsmodell lassen sich die Lagerstrategien „Durchsatzbasierte Einlagerung“, „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ und „Lagerreorganisation“ abbilden und deren Optimierungspotential im Vergleich zur Lagerstrategie „Chaotische Einlagerung“ zeigen.

Mit dem analytischen Modell und dem Simulationsmodell können auch weitere Möglichkeiten der Optimierung des Systemverhaltens (Durchsatzsteigerung oder Senkung der Auftragsdurchlaufzeit) erforscht werden, z. B. durch Variation der Beschleunigung und Geschwin-

digkeit der Fördermittel, der Lagerabmessungen, der Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge oder der Lastaufnahmezeiten.

### **Fazit zur Literaturrecherche**

Die Literaturrecherche zeigt, dass es inzwischen ein breites Spektrum an Veröffentlichungen zu Shuttle-Systemen gibt. Die wissenschaftliche Beschäftigung konzentrierte sich zu Beginn auf die Entwicklung analytischer Modelle für ungebundene Shuttle-Systeme. In jüngeren Veröffentlichungen (2011 – 2020) werden verstärkt gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme erforscht, auch vermehrt durch Simulationsstudien. Zu ganggebundenen Shuttle-Systemen liegen nur wenige Veröffentlichungen vor (eine Veröffentlichung zur analytischen Modellbildung, sechs Veröffentlichungen mit Simulationsstudien, insgesamt wurden 64 wissenschaftliche Veröffentlichungen zu Shuttle-Systemen analysiert). Für diese Arbeit sind folgende Erkenntnisse zum bestehenden Forschungsbedarf besonders relevant:

- Alle veröffentlichten analytischen Modelle nutzen die Annahme der Gleichverteilung der Lagerplatzbelegung. Es existiert keine Modellierung mit einstellbarer Verteilung, die für die Anwendung der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ erforderlich ist.
- Die Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ wurde bisher in einer Veröffentlichung angewendet, um allein den Durchsatz zu steigern [56]. Die weiteren Veröffentlichungen wenden diese an, um eine feste Reihenfolge einzuhalten, die dadurch den Durchsatz senkt, oder um Blockaden zu vermeiden.
- Die Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ wurde in keiner Veröffentlichung zu Shuttle-Systemen thematisiert. Gleichwohl gibt es viele Ideen und Vorgehensweisen, die für automatische Lagersysteme mit Regalbediengeräten veröffentlicht wurden.

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zum genannten Forschungsbedarf (siehe auch Abschnitt 1.1) durch die analytische Modellierung mit einstellbarer Verteilung der Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung und die Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen durch die Lagerstrategien „Durchsatzbasierte Einlagerung“, „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ und „Lagerreorganisation“.

## 4 Ermittlung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen

Die Ermittlung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen erfolgt über zwei Ansätze, die analytische Modellbildung (Abschnitt 4.1) sowie die Entwicklung eines Simulationsmodells (Abschnitt 4.2).

### 4.1 Analytische Modellbildung

#### 4.1.1 Fahrtzeitberechnung

Die Fahrtzeitberechnung einer Fahrt kann in unterschiedlicher Form stattfinden. Wenn das Fördermittel während der Fahrt die Maximalgeschwindigkeit  $v$  erreicht, dann wird die Fahrt als Trapezfahrt bezeichnet. Wenn das Fördermittel die Maximalgeschwindigkeit nicht erreicht, bremst es direkt nach dem Beschleunigungsvorgang wieder ab. Dann wird die Fahrt als Spitzfahrt bezeichnet.  $a$  bezeichnet die Beschleunigung. Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen die Spitz- und Trapezfahrt.

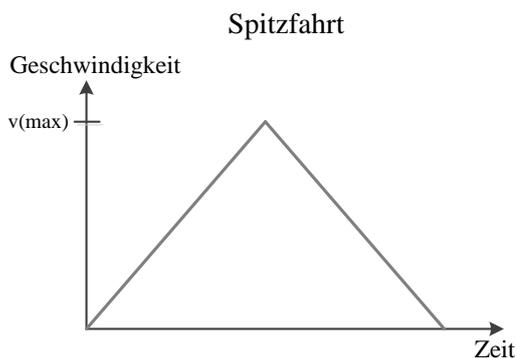


Abbildung 15: Spitzfahrt, in Anlehnung an [1]

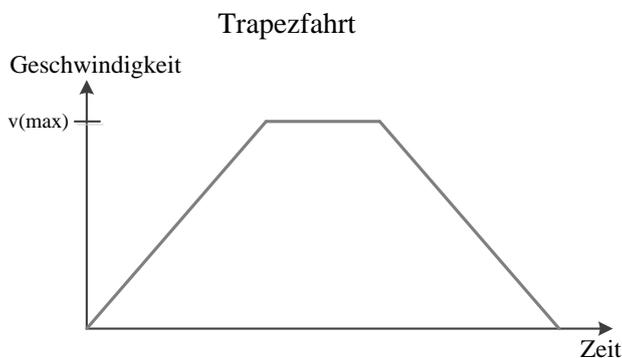


Abbildung 16: Trapezfahrt, in Anlehnung an [1]

Für die Berechnung der Fahrtzeit  $t$  einer Fahrt mit der Strecke  $s$  gilt [1]:

$$t = \begin{cases} 2\sqrt{\frac{s}{a}}, & \text{für } s \leq \frac{v^2}{a} \\ \frac{s}{v} + \frac{v}{a}, & \text{sonst} \end{cases} \quad 4.1$$

Wenn die Beschleunigung  $a_1$  und die Bremsbeschleunigung  $a_2$  sich unterscheiden, d. h.  $a_1 \neq a_2$ , kann die Fahrzeitberechnung dennoch nach der genannten Formel angewendet werden, es ist lediglich  $a$  zu bestimmen. Für  $a$  gilt [71]:

$$a = 2 \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2} \quad 4.2$$

Die Herleitungen zur Fahrzeitberechnung sind in [71] beschrieben.

#### 4.1.2 Modellierung der Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung

Jedem Lagerplatz wird eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet, die sich aus der gewählten Zonierung und der Häufigkeit der Ansteuerung der Zone insgesamt ergeben. Artikel, die häufig nachgefragt werden, werden einer A-Zone (Zone 1) zugeordnet, weniger häufig nachgefragte Artikel einer B-Zone (Zone 2), usw. Bzgl. der Anzahl der Zonen gibt es nur die Begrenzung der maximalen Anzahl der Lagerkanäle im Shuttle-System<sup>5</sup>. Die maximale Zonenanzahl ist daher genau dann erreicht, wenn sie mit der Anzahl verfügbarer Kanäle übereinstimmt. Jedem Kanal ist dann eine eigene Zone zugeordnet. Ein Kanal umfasst bei einem einfachtiefen Lager einen Lagerplatz und bei einem doppeltiefen Lager zwei Lagerplätze.

Die Zonenzuordnung wird für die weitere Berechnung mit den Matrizen  $Z_{LP1}$  und  $Z_{LP2}$  formuliert, deren Zeilen die Ebenen  $k$  darstellen und deren Spalten die Positionen  $i$ . Die Zonen werden aufsteigend mit Zahlen nummeriert (1, 2, 3, ..., letzte Zone).

$$Z_{LP1} = \begin{pmatrix} Z_{LP1,1,1} & \dots & Z_{LP1,1,i} \\ \dots & \dots & \dots \\ Z_{LP1,k,1} & \dots & Z_{LP1,k,i} \end{pmatrix} \quad 4.3$$

$$Z_{LP2} = \begin{pmatrix} Z_{LP2,1,1} & \dots & Z_{LP2,1,i} \\ \dots & \dots & \dots \\ Z_{LP2,k,1} & \dots & Z_{LP2,k,i} \end{pmatrix} \quad 4.4$$

Mit:

$Z_{LP1,k,i}$ : Zonenzuordnung der Position  $i$  in Ebene  $k$  für den linken Kanal des Gangs (LP1).

$Z_{LP1,k,i} \in \mathbb{N}$ .

---

<sup>5</sup> Beim Vorhandensein von Lagerkanälen mit unterschiedlicher Zonenzuordnung innerhalb des Kanals ist die maximale Anzahl der Zonen die Anzahl aller vorhandenen Lagerplätze, unter der Voraussetzung, dass jeder Lagerplatz mit einer unterschiedlichen Ladeinheit (keine Ladeinheit enthält denselben Artikel) belegt werden kann, siehe dazu auch Fußnote 6.

$z_{LP2,k,i}$ : Zonenzuordnung der Position  $i$  in Ebene  $k$  für den rechten Kanal des Gangs (LP2).

$z_{LP2,k,i} \in \mathbb{N}$ .

Weiterhin wird die Anzahl der verwendeten Zonen benötigt. Der Vektor  $w$  ordnet jeder Zone  $z$  die Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung zu.

$$w = \begin{pmatrix} w_1 \\ \dots \\ w_z \end{pmatrix} \quad 4.5$$

Der Vektor  $l$  ordnet jeder Zone  $z$  die Anzahl der zugehörigen Kanäle zu.

$$l = \begin{pmatrix} l_1 \\ \dots \\ l_z \end{pmatrix} \quad 4.6$$

Die Wahrscheinlichkeit der Kanalansteuerung<sup>6</sup>, bezogen auf das gesamte Shuttle-System (bzw. der betrachtete Teilbereich daraus, ein Gang), ergibt sich aus den Zonen und Kanälen wie folgt<sup>7</sup>:

$$w_{i(k,z),x,LP1} = \frac{w_z}{l_z} \quad 4.7$$

$$w_{i(k,z),x,LP2} = \frac{w_z}{l_z} \quad 4.8$$

Mit:

$l_z$ : Anzahl Lagerkanäle der Zone  $z$

$w_z$ : Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung der Zone  $z$

---

<sup>6</sup> Die Wahrscheinlichkeit der Kanalansteuerung kann bei doppel tiefen Shuttle-Systemen auch für Kanäle mit unterschiedlicher Zonenzuordnung innerhalb des Kanals erfolgen (wenn der vordere Lagerplatz des Kanals nicht derselben Zone wie der hintere Lagerplatz des Kanals zugeordnet ist). Dann werden die Formel 4.7 und 4.8 angepasst: Die Wahrscheinlichkeit der Zone des vorderen Lagerplatzes wird durch die Anzahl der Lagerplätze dividiert (Abweichung zu den Formeln 4.7. und 4.8: Dort wird durch die Anzahl der Lagerkanäle dividiert). Dieselbe Rechnung wird auch für den hinteren Lagerplatz des Kanals durchgeführt. Beide Werte werden dann addiert. Das Ergebnis entspricht der Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung dieses Kanals. Alle Wahrscheinlichkeiten der Kanalansteuerung werden beim Vorhandensein von Kanälen mit unterschiedlicher Zonenzuordnung innerhalb des Kanals auf diese Weise berechnet, auch für Kanäle, die keine unterschiedliche Zonenzuordnung innerhalb des Kanals aufweisen. Das ist erforderlich, da die Anzahl der Kanäle zu einer bestimmten Zone in diesem Fall nicht mehr ermittelbar ist.

<sup>7</sup> Im Anhang A.1 befindet sich ein Beispiel dazu.

$w_{i(k,z),x,LP1}$ : Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung des Kanals LP1 in der Position  $i$  der Ebene  $k$ . LP1 befindet sich in Zone  $z$ .

$w_{i(k,z),x,LP2}$ : Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung des Kanals LP2 in der Position  $i$  der Ebene  $k$ . LP2 befindet sich in Zone  $z$ .

Die Berechnung der

Die Wahrscheinlichkeit der Ebenenansteuerung des Hebers ergibt sich aus den Zonen und Kanälen wie folgt:

$$w_{k,y} = \sum_{i=1}^{n_x} (w_{i(k,z),x,LP1} + w_{i(k,z),x,LP2}) \quad 4.9$$

Die Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung eines Kanals LP1/2 von einem Shuttle-Fahrzeug in einer Ebene ergibt sich wie folgt:

$$w_{i(k),x,LP1} = \frac{w_{i(k,z),x,LP1}}{w_{k,y}} \quad 4.10$$

$$w_{i(k),x,LP2} = \frac{w_{i(k,z),x,LP2}}{w_{k,y}} \quad 4.11$$

Die Formel 4.9 summiert die Wahrscheinlichkeitsanteile der einzelnen Kanäle (die sich aus der Zonenzuordnung ergeben). Die Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung eines Kanals aus der Zonenzuordnung, dividiert durch die Summe aller Wahrscheinlichkeiten aus der Zonenzuordnung einer Ebene ergibt dann die Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung dieses Kanals durch das Shuttle-Fahrzeug (Formeln 4.10 und 4.11).

Mit den vorgestellten Formeln dieses Abschnitts kann aus einer festgelegten Zonierung jedem Kanal eine Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung zuordnet werden. Es ist auch möglich eine „Leerzone“ zu definieren, indem die Wahrscheinlichkeiten zur Ansteuerung auf Null gesetzt wird. Eine „Leerzone“ ist eine Zone, die nicht angesteuert wird, die Lagerplätze bleiben leer. Damit kann der Füllgrad des Shuttle-Systems berücksichtigt werden, Lagerplätze an Positionen am Gangende können einer „Leerzone“ zugeordnet werden.

Die Wahrscheinlichkeiten werden vom analytischen Modell zur Ermittlung der zugehörigen Spiel- und Wartezeiten sowie des Durchsatzes des Shuttle-Systems verwendet. Somit können

Optimierungspotentiale bzgl. des Durchsatzes bei der Anwendung der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ ermittelt werden<sup>8</sup>.

#### 4.1.3 Gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme

##### 4.1.3.1 Modellannahmen

Die entwickelten Modelle sind für einfach- und doppeltiefe Shuttle-Systeme einsetzbar. Bei doppeltiefen Shuttle-Systemen werden Annahmen zur Auslagerung einer verdeckten Ladeeinheit getroffen. Eine verdeckte Ladeeinheit ist eine Ladeeinheit, die in einem Lagerplatz eingelagert ist, vor dem sich ein weiterer Lagerplatz befindet, der ebenfalls mit einer Ladeeinheit belegt ist. Ein verdeckter Lagerplatz kann demnach nur ein hinterer Lagerplatz sein, der vordere Lagerplatz befindet sich neben dem Gang. Wenn eine verdeckte Ladeeinheit ausgelagert werden soll, so wird für die vordere Ladeeinheit die Annahme der Auswahl des nächstmöglichen freien Lagerplatzes getroffen. Die Ladeeinheit des vorderen Lagerplatzes wird zum nächstmöglichen freien Lagerplatz umgelagert. Der nächstmögliche freie Lagerplatz ist der Lagerplatz, dessen Position die geringste Distanz zur aktuellen Position aufweist. Nach der Umlagerung erfolgt die vorgesehene Auslagerung. Es gilt die Annahme, dass die Ladeeinheiten chaotisch eingelagert werden und sich dadurch in Abhängigkeit des Lagerfüllgrades die Anzahl verdeckter Ladeeinheiten ermitteln lässt.

Es werden Modelle auf Basis der Annahme einstellbarer Wahrscheinlichkeiten zur Lagerplatzbelegung gebildet. Damit können die Lagerstrategien „Chaotische Einlagerung“ und „Durchsatzbasierte Einlagerung“ abgebildet werden. Die Lagerstrategie „Chaotische Einlagerung“ entspricht einer Gleichverteilung der eingelagerten Ladeeinheiten auf die verfügbaren Lagerplätze. Jeder Lagerplatz wird mit derselben Wahrscheinlichkeit für eine Einlagerung ausgewählt. Dasselbe gilt für eine Auslagerung, jeder belegte Lagerplatz wird mit derselben Wahrscheinlichkeit für eine Auslagerung ausgewählt.

Die Annahme der einstellbaren Wahrscheinlichkeit der Lagerplatzbelegung ist eine wesentliche Neuerung zu bisher veröffentlichten Forschungsberichten. Durch die in den veröffentlichten Forschungsberichten getroffene Annahme, dass jeder Lagerplatz mit derselben Wahrscheinlichkeit angesteuert wird, ist eine Abbildung mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten, zu denen insbesondere die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ führt, ausgeschlossen. Die veröffentlichten Modelle bilden daher die Lagerstrategie „Chaotische Einlagerung“.

---

<sup>8</sup> Der Abschnitt „Modellierung der Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung“ ist auch in ähnlicher Form in [21] enthalten und wird hier zum Verständnis der nachfolgenden Spielzeitmodelle beschrieben.

gerung“ ab und können das Optimierungspotential weiterer Lagerstrategien nicht aufzeigen. Durch die in dieser Arbeit erfolgte Modellierung mit einstellbaren Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung ist es möglich, mit einem analytischen Modell genau diese Optimierungspotentiale aufzuzeigen. Eine einstellbare Wahrscheinlichkeitsverteilung führt dazu, dass die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ modelliert werden kann, mit einer einstellbaren Anzahl an Zonen. Diese Lagerstrategie bietet z. T. erhebliches Optimierungspotential zur Durchsatzsteigerung.

Um die einstellbaren Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung auch für doppeltiefe Shuttle-Systeme einzusetzen, können die Modelle entsprechend angepasst werden, indem der Lagerfüllgrad insgesamt oder pro Zone definiert wird. Dann ergibt sich die Wahrscheinlichkeit zur Umlagerung einer verdeckten Ladeeinheit aus der Anzahl der verdeckten Ladeeinheiten der jeweiligen Zone.

Die Modelle werden für eine Kapazität von einer Ladeeinheit für Heber und Shuttle-Fahrzeuge entwickelt. Einzel- und Doppelspiele werden abgebildet, es kann zwischen Ein- und Auslagerungen unterschieden werden.

Die Modelle ermitteln das Systemverhalten unter der Annahme der vollen Auslastung des Systems, d. h. es stehen jederzeit Aufträge zur Verfügung. Das führt dazu, dass jedes Shuttle-Fahrzeug ständig aktiv ist (Ausnahme: Wartezeiten am Übergabepplatz). Dasselbe gilt für den Heber. Die Ausgangsgrößen, die das Systemverhalten beschreiben, sind daher Grenzwerte. Der mit dem Modell berechnete mittlere Durchsatz ist der maximale mittlere Durchsatz, den das Shuttle-System erreichen kann, die mittlere Spielzeit ist die minimale mittlere Spielzeit.

#### 4.1.3.2 Spielzeit

##### 4.1.3.2.1 Einzelspiel Heber

### **Einlagerung**

Die Einlagerung einer Ladeeinheit durch den Heber hat folgenden Ablauf:

1. Der Heber befindet sich unbeladen am Einlagerungspunkt und nimmt eine Ladeeinheit auf.
2. Der Heber fährt mit der Ladeeinheit zu der Ebene, in der die Ladeeinheit eingelagert werden soll.
3. Der Heber gibt die Ladeeinheit am Übergabepplatz ab.
4. Der Heber fährt unbeladen zum Einlagerungspunkt.

Der Ablauf wiederholt sich mit jeder weiteren Einlagerung.

Die Berechnung der Spielzeit setzt sich aus der mittleren Fahrtzeit des Hebers  $t_{EF,E,y}$ , den Lastaufnahmezeiten  $t_{G,y}$  und den Schalt- und Positionierzeiten  $t_{P,y}$  zusammen. Lastaufnahmezeiten entstehen bei jeder Aufnahme einer Ladeeinheit. Die Abgabe einer Ladeeinheit wird der Lastaufnahme zeitlich gleichgesetzt, zur Berechnung wird dasselbe Symbol verwendet und es wird zur Vereinfachung die Bezeichnung Lastaufnahme verwendet. Der Abstand der Ebenen wird konstant angenommen. Sollte ein reales Shuttle-System aber keine konstanten Abstände aufweisen, so kann das Modell dennoch angewendet werden. Die Distanz zwischen der obersten und der untersten Ebene des Shuttle-Systems kann durch die Anzahl der Ebenen geteilt werden. Der somit berechnete mittlere Abstand zwischen zwei Ebenen kann dann im Modell verwendet werden.

Zur Berechnung der mittleren Fahrtzeit werden folgende Größen benötigt:

- $v_L$ , die maximal erreichbare Geschwindigkeit des Hebers.
- $a_L$ , die Beschleunigung des Hebers. Die Bremsbeschleunigung wird als identisch angenommen.
- $l_{E,y}$ , Abstand vom Einlagerungspunkt zur Ebene 1. Der Wert erhält ein negatives Vorzeichen, wenn der Einlagerungspunkt über der Ebene 1 liegt (und ansonsten ein positives Vorzeichen).
- $l_y$ , Abstand zwischen den Ebenen.
- $n_y$ , Anzahl der Ebenen.
- $k$ , Zählvariable für die Ebenen. Ebene  $k = 1, 2, \dots, n_y$ .

Zur Berechnung der mittleren Fahrtzeit des Hebers werden die einzelnen Fahrtzeiten des Hebers zu jeder Ebene berechnet. Jede einzelne Fahrtzeit wird mit der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens multipliziert. Die Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung einer Ebene wird mit  $w_{k,y}$  bezeichnet.  $k$  gibt dabei die angesteuerte Ebene an,  $y$  ist die Achsenfestlegung für eine vertikale Bewegung. Die berechneten Werte werden summiert.  $EF$  steht für Einzelfahrt und  $E$  für Einzelspiel. Für  $t_{EF,E,y}$  gilt:

$$t_{EF,E,y} = \begin{cases} \sum_{k=1}^{n_y} w_{k,y} \left( \frac{|l_{E,y} + (k-1)l_y|}{v_L} + \frac{v_L}{a_L} \right) & \text{für } |l_{E,y} + (k-1)l_y| \geq \frac{(v_L)^2}{a_L} \\ \sum_{k=1}^{n_y} w_{k,y} \left( 2 \sqrt{\frac{|l_{E,y} + (k-1)l_y|}{a_L}} \right) & \text{für } |l_{E,y} + (k-1)l_y| < \frac{(v_L)^2}{a_L} \end{cases} \quad 4.12$$

Die mittlere Spielzeit  $t_{ES,E,y}$  ergibt:

$$t_{ES,E,y} = 2(t_{EF,E,y} + t_{G,y} + t_{P,y}) \quad 4.13$$

### Auslagerung

Die Auslagerung einer Ladeinheit durch den Heber hat folgenden Ablauf:

1. Der Heber fährt vom Auslagerungspunkt unbeladen zu der Ebene, in der eine Ladeeinheit ausgelagert werden soll.
2. Der Heber nimmt die Ladeeinheit vom Übergabepplatz auf.
3. Der Heber fährt mit der Ladeeinheit zum Auslagerungspunkt.
4. Der Heber gibt die Ladeinheit ab.

Der Ablauf wiederholt sich mit jeder weiteren Auslagerung.

Die Berechnung des Einzelspiels eines Hebers zur Auslagerung unterscheidet sich nur dann von der Berechnung des Einzelspiels zur Einlagerung, wenn die Position des Auslagerungspunktes nicht der Position des Einlagerungspunktes entspricht. Dann ist die mittlere Fahrtzeit der Auslagerung nicht identisch mit der mittleren Fahrtzeit der Einlagerung. Der Abstand der Auslagerungsebene zur Ebene 1 wird als  $l_{A,y}$  bezeichnet.  $l_{A,y}$  wird mit einem negativen Vorzeichen versehen, wenn sich der Auslagerungspunkt über der Ebene 1 befindet, ansonsten ist  $l_{A,y}$  positiv.

Die mittlere Fahrtzeit  $t_{EF,A,y}$  wird wie folgt berechnet:

$$t_{EF,A,y} = \begin{cases} \sum_{k=1}^{n_y} w_{k,y} \left( \frac{|l_{A,y} + (k-1)l_y|}{v_L} + \frac{v_L}{a_L} \right) & \text{für } |l_{A,y} + (k-1)l_y| \geq \frac{(v_L)^2}{a_L} \\ \sum_{k=1}^{n_y} w_{k,y} \left( 2\sqrt{\frac{|l_{A,y} + (k-1)l_y|}{a_L}} \right) & \text{für } |l_{A,y} + (k-1)l_y| < \frac{(v_L)^2}{a_L} \end{cases} \quad 4.14$$

Die mittlere Spielzeit ergibt:

$$t_{ES,A,y} = 2(t_{EF,A,y} + t_{G,y} + t_{P,y}) \quad 4.15$$

#### 4.1.3.2.2 Doppelspiel Heber

Die Einlagerung und nachfolgende Auslagerung von Ladeeinheiten durch den Heber hat folgenden Ablauf:

1. Der Heber befindet sich unbeladen am Einlagerungspunkt und nimmt eine Ladeeinheit auf.
2. Der Heber fährt mit der Ladeeinheit zu der Ebene, in der die Ladeeinheit eingelagert werden soll.

3. Der Heber gibt die Ladeeinheit am Übergabepplatz ab.
4. Der Heber fährt unbeladen zu einer Ebene, in der die nächste Auslagerung erfolgen soll. Wenn das die Ebene ist, in der sich der Heber bereits befindet, verbleibt der Heber in dieser Ebene.
5. Der Heber nimmt die Ladeeinheit vom Übergabepplatz auf.
6. Der Heber fährt mit der Ladeeinheit zum Auslagerungspunkt.
7. Der Heber gibt die Ladeeinheit ab.
8. Der Heber fährt zum Einlagerungspunkt. Wenn sich dieser an derselben Position wie der Auslagerungspunkt befindet, verbleibt der Heber an der Position.

Für  $t_{EF,E,y}$  und  $t_{EF,A,y}$  gilt die in Abschnitt 4.1.3.2.1 beschriebene Berechnung.

Die Wahrscheinlichkeit, dass der Heber nach der Einlagerungsebene in derselben Ebene verbleibt, beträgt:

$$w_{0,y} = \sum_{k=1}^{n_y} w_{k,y}^2 \quad 4.16$$

Bei einem Doppelspiel erfolgt mit der Wahrscheinlichkeit  $w_{m,y}$  nach der Einlagerung eine Leerfahrt zur Auslagerungsebene, siehe Punkt 4 in der obigen Ablaufbeschreibung des Doppelspiels. Dabei bezeichnet  $m$  die Anzahl der gewechselten Ebenen (z. B.  $m = 1$ , es wurde um eine Ebene gewechselt). Es gilt:

$$w_{m,y} = \sum_{k=1}^{n_y-m} 2w_{k,y}w_{k+m,y} \quad 4.17$$

Der Faktor 2 entsteht dadurch, dass entweder die Ebene  $k$  angesteuert wird und dann die Ebene  $k + m$ , oder die Ebene  $k + m$  und dann die Ebene  $k$ . Beide Fälle werden somit berücksichtigt.

Die mittlere Fahrtzeit der Leerfahrt des Hebers berechnet sich wie folgt:

$$t_{L,y} = \begin{cases} \sum_{m=1}^{n_y-1} w_{m,y} \left( \frac{ml_y}{v_L} + \frac{v_L}{a_L} \right) & \text{für } ml_y \geq \frac{(v_L)^2}{a_L} \\ \sum_{m=1}^{n_y-1} w_{m,y} \left( 2 \sqrt{\frac{ml_y}{a_L}} \right) & \text{für } ml_y < \frac{(v_L)^2}{a_L} \end{cases} \quad 4.18$$

Wenn die Position des Einlagerungspunkts sich von der des Auslagerungspunkts unterscheidet, ist eine weitere Fahrt erforderlich. Nach der Auslagerung erfolgt eine Fahrt zum Einlagerungspunkt, siehe Punkt 8 in obiger Beschreibung des Ablaufs. Es gilt:

$$t_{EFA,y} = \begin{cases} \frac{|l_{E,y} - l_{A,y}|}{v_L} + \frac{v_L}{a_L} \text{ für } |l_{E,y} - l_{A,y}| \geq \frac{(v_L)^2}{a_L} \text{ und } P_E \neq P_A \\ 2 \sqrt{\frac{|l_{E,y} - l_{A,y}|}{a_L}} \text{ für } |l_{E,y} - l_{A,y}| < \frac{(v_L)^2}{a_L} \text{ und } P_E \neq P_A \\ 0, \text{ sonst} \end{cases} \quad 4.19$$

Die mittlere Fahrtzeit aller Fahrten des Doppelspiels wird wie folgend berechnet:

$$t_{EFL,y} = t_{EF,E,y} + t_{EF,A,y} + t_{L,y} + t_{EFA,y} \quad 4.20$$

Der Erwartungswert für das Auftreten der Schalt- und Positionierzeiten berücksichtigt die Positionen des Ein- und Auslagerungspunktes und die Wahrscheinlichkeit des Ebenenverbleibs. Er beträgt:

$$E_{DS,y} = \begin{cases} (3 - w_{0,y})t_{P,y} \text{ für } P_E = P_A \\ (4 - w_{0,y})t_{P,y} \text{ für } P_E \neq P_A \end{cases} \quad 4.21$$

Die mittlere Spielzeit eines Doppelspiels beträgt:

$$t_{DS,y} = t_{EFL,y} + 2t_{G,\ddot{U}P,y} + 2t_{G,y} + E_{DS,y} \quad 4.22$$

#### 4.1.3.2.3 Einzelspiel Shuttle-Fahrzeug

##### **Einlagerung - Einfachtief**

Die Einlagerung einer Ladeinheit durch ein Shuttle-Fahrzeug hat folgenden Ablauf:

1. Das Shuttle-Fahrzeug befindet sich unbeladen am Ganganfang (erster Lagerplatz des Gangs) und nimmt eine Ladeinheit vom Übergabeplatz auf.
2. Das Shuttle-Fahrzeug fährt mit der Ladeinheit zu dem Lagerplatz, in dem die Ladeinheit eingelagert werden soll.
3. Das Shuttle-Fahrzeug gibt die Ladeinheit am Lagerplatz ab.
4. Das Shuttle-Fahrzeug fährt unbeladen zum Ganganfang.

Der Ablauf wiederholt sich mit jeder weiteren Einlagerung.

Die Berechnung der Spielzeit setzt sich aus der mittleren Fahrtzeit des Shuttle-Fahrzeugs  $t_{EF,x}$ , den Lastaufnahmezeiten für die Lastaufnahme am Übergabeplatz  $t_{G,\ddot{U}P,x}$  und am Lagerplatz  $t_{G,x}$  und den Schalt- und Positionierzeiten  $t_{P,x}$  zusammen. Der Abstand der Lagerplätze wird konstant angenommen.

In jeder Ebene können unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten zur Ansteuerung der Lagerplätze vorhanden sein. Das ist genau dann der Fall, wenn die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ modelliert wird, siehe auch Abschnitt 4.1.2. In jeder Ebene hat das zuge-

hörige Shuttle-Fahrzeug dann ggf. eine andere Spielzeit. Der Gang hat in jeder Ebene Positionen, die das Shuttle-Fahrzeug ansteuern kann. Links und rechts dieser Positionen befinden sich die Lagerplätze. Bei einem einfachtiefen Shuttle-System ist an jeder Position jeweils ein Lagerplatz links und rechts vorhanden, bei einem doppeltiefen Shuttle-System zwei. Jeder Lagerplatz hat eine bestimmte Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung. Die Wahrscheinlichkeit zur Ansteuerung der Position wird durch die Summe dieser Wahrscheinlichkeiten gebildet. Die Wahrscheinlichkeit der Positionsansteuerung wird durch  $w_{k(i),x}$  dargestellt.  $w_{k(i),x}$  ist die Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung der Position  $i$  in der Ebene  $k$ . Diese setzt sich zusammen aus der Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung der Lagerkanäle 1 und 2 der Position  $i$ . Dabei bezeichnet  $LP1$  den Kanal der linken Seite des Gangs und  $LP2$  den Kanal der rechten Seite des Gangs.

$$w_{i(k),x} = w_{i(k),x,LP1} + w_{i(k),x,LP2} \quad 4.23$$

Zur Berechnung der mittleren Fahrtzeit werden weiterhin folgende Größen benötigt, es werden nur bisher nicht genannte Größen aufgezählt:

- $v_S$ , die maximal erreichbare Geschwindigkeit des Shuttle-Fahrzeugs.
- $a_S$ , die Beschleunigung des Shuttle-Fahrzeugs. Die Bremsbeschleunigung wird als identisch angenommen.
- $l_x$ , Abstand zwischen den Lagerplätzen in Fahrtrichtung des Shuttle-Fahrzeugs.
- $n_x$ , Anzahl der Positionen im Gang.
- $k$ , Ebene.
- $i$ , Zählvariable für die Position im Gang. Ebene  $k = 1, 2, \dots, n_x$ .

Zur Berechnung der mittleren Fahrtzeit des Shuttle-Fahrzeugs werden die einzelnen Fahrtzeiten des Shuttle-Fahrzeugs zu jedem Lagerplatz berechnet. Jede einzelne Fahrtzeit wird mit der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens multipliziert.  $x$  ist die Achsenfestlegung für eine horizontale Bewegung,  $EF$  steht für Einzelfahrt. Die berechneten Werte werden summiert.

Für  $t_{EF,x}$  gilt:

$$t_{EF,x(k)} = \begin{cases} \sum_{k=1}^{n_x} w_{i(k),x} \left( \frac{(k-1)l_x}{v_S} + \frac{v_S}{a_S} \right) \text{ für } (k-1)l_x \geq \frac{(v_S)^2}{a_S} \\ \sum_{k=1}^{n_x} w_{i(k),x} \left( 2 \sqrt{\frac{(k-1)l_x}{a_S}} \right) \text{ für } (k-1)l_x < \frac{(v_S)^2}{a_S} \end{cases} \quad 4.24$$

Die mittlere Spielzeit  $t_{ES,x(k)}$  des Shuttle-Fahrzeugs in Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{ES,x(k)} = 2(t_{EF,x(k)} + t_{P,x}) + t_{G,x} + t_{G,\ddot{U}P,x} \quad 4.25$$

### Einlagerung - Doppeltief

Für doppeltiefe Lagersysteme ist die Berechnung der Wahrscheinlichkeit der Lagerplatzbelegung eines Lagerkanals erforderlich. Dabei bezeichnet  $L_F$  den Lagerfüllgrad,  $b$  gibt die Anzahl der belegten Lagerplätze im Lagerkanal an,  $L_T$  gibt die Lagertiefe an. Es gilt:

$$w_b = (L_F)^b (1 - L_F)^{(L_T - b)} \binom{L_T}{b} \quad 4.26$$

Zur Berechnung der mittleren Lastaufnahmezeit werden die Lastaufnahmezeiten  $t_{G(\dots)}$  für den jeweiligen Lagerplatz benötigt. (...) gibt den Lagerplatz, in den eingelagert wird, an. (1) bedeutet, dass der hintere Lagerplatz zur Einlagerung gewählt wird. (2) bedeutet, dass der vordere Lagerplatz zur Einlagerung gewählt wird.  $w_{L_T}$  gibt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines voll belegten Lagerkanals im Shuttle-System an. Für doppeltiefe Shuttle-Systeme gilt:

$$w_{L_T} = w_b, \text{ für } b = 2 \quad 4.27$$

Die mittlere Lastaufnahmezeit  $t_{G,DTE,x}$  einer Ladeeinheit bei der Einlagerung in einen Lagerplatz wird wie folgt berechnet. *DTE* steht für Doppeltiefe Einlagerung.

$$t_{G,DTE,x} = \sum_{b=0}^{L_T-1} \left( \frac{w_b}{(1 - w_{L_T})} t_{G(b+1)} \right) \quad 4.28$$

Die mittlere Spielzeit  $t_{ES,DTE,x(k)}$  des Shuttle-Fahrzeugs in Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{ES,DTE,x(k)} = 2(t_{EF,x(k)} + t_{P,y}) + t_{G,ÜP,x} + t_{G,DTE,x} \quad 4.29$$

### **Auslagerung – Einfachtief**

Die Auslagerung einer Ladeeinheit durch ein Shuttle-Fahrzeug hat folgenden Ablauf:

1. Das Shuttle-Fahrzeug befindet sich unbeladen am Ganganfang (erster Lagerplatz des Gangs).
2. Das Shuttle-Fahrzeug fährt unbeladen zu dem Lagerplatz, aus dem die Ladeeinheit ausgelagert werden soll.
3. Das Shuttle-Fahrzeug nimmt die Ladeeinheit am Lagerplatz auf.
4. Das Shuttle-Fahrzeug fährt beladen zum Ganganfang und gibt dort die Ladeeinheit am Übergabeplatz ab.

Die Berechnung der Auslagerung erfolgt analog zur Einlagerung, es werden diesselben Formeln verwendet.  $t_{ES,x(k)}$  gibt damit die Spielzeit bei einem einfachtiefen Shuttle-System für Ein- oder Auslagerungen an.

### **Auslagerung – Doppeltief**

Bei einer Auslagerung kann es bei doppeltiefer Belegung zu Umlagerungen kommen. Eine Umlagerung führt dazu, dass sich die Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs um die benötigte Zeit zur Umlagerung einer Ladeeinheit erhöht. Umlagerungen können in doppeltiefen Shuttle-Systemen durch Lagerstrategien reduziert werden, z. B. durch eine sortenreine Einlagerung. Wenn eine sortenreine Einlagerung angewendet wird, so kann die Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs wie bei einem einfachtiefen Shuttle-System berechnet werden, mit Ausnahme unterschiedlicher Lastaufnahmezeiten aufgrund der Lagertiefe.

Die Umlagerung einer Ladeeinheit hat folgenden Ablauf:

1. Das Shuttle-Fahrzeug befindet sich vor dem Lagerkanal, in dem sich die auszulagernde Ladeeinheit (verdeckt) befindet.
2. Das Shuttle-Fahrzeug nimmt die vordere Ladeeinheit auf.
3. Das Shuttle-Fahrzeug fährt beladen zum nächsten freien Lagerplatz.
4. Das Shuttle-Fahrzeug gibt die Ladeeinheit ab.
5. Das Shuttle-Fahrzeug fährt zu dem Lagerkanal, in dem sich die auszulagernde Ladeeinheit (nicht mehr verdeckt) befindet.

Es gelten folgende Annahmen zur Berechnung der Umlagerzeit:

- Die Ladeeinheiten befinden sich gleichverteilt im Gang, d. h. jeder Lagerplatz ist mit derselben Wahrscheinlichkeit belegt/nicht belegt<sup>9</sup>.
- Das Shuttle-Fahrzeug wählt zur Umlagerung den nächsten freien Lagerplatz aus. Das Kriterium der Auswahl ist die minimale Distanz, d. h. die nächstmögliche Lagerposition.

Zur Berechnung der Spielzeit wird zunächst die Wahrscheinlichkeit des Eintretens einer Umlagerung berechnet. Es gilt:

$$w_u = \sum_{b=2}^{L_T} \frac{(b-1)w_b}{L_T L_T} \quad 4.30$$

$w_u$  kann für eine beliebige Lagertiefe berechnet werden. Im Zähler wird der für eine Umlagerung relevante Ladeeinheitenanteil berechnet (alle verdeckten Ladeeinheiten), im Nenner wird der Anteil aller Ladeeinheiten berechnet<sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup> Ergänzung: Jeder Lagerplatz wird zwar initial mit derselben Wahrscheinlichkeit belegt, aber entsprechend den Gegebenheiten der Realität gibt es noch eine zusätzliche Bedingung: Wenn der vordere Lagerplatz bei der Initialbelegung mit einer Ladeeinheit belegt wird und der hintere nicht, so wird automatisch der hintere Lagerplatz als belegt angenommen und der vordere als frei (in der Realität werden leere Lagerplätze im Normalfall nicht verdeckt). Das bedeutet, dass eine Belegung mit denselben Wahrscheinlichkeiten bei Anwendung dieser zusätzlichen Bedingung dazu führt, dass die hinteren Lagerplätze häufiger belegt werden als die vorderen.

<sup>10</sup> Im Anhang A.2 befinden sich Beispiele dazu.

Für den Fall, dass die doppeltiefen Lagerkanäle sortenrein eingelagert werden, gilt  $w_u = 0$ .

Für doppeltiefe Shuttle-Systeme reduziert sich  $w_u$  zu:

$$w_u = \frac{w_{LT}}{2L_F} \quad 4.31$$

Zur weiteren Berechnung ist die Anzahl der Lagerkanäle, die mindestens einen freien Lagerplatz enthalten, erforderlich. Diese werden im Folgenden auch als Anzahl der freien Lagerkanäle  $L$  bezeichnet.  $L$  wird wie folgt berechnet:

$$L = 2n_x(1 - w_{LT}) \quad 4.32$$

$L$  kann für die weitere Berechnung nur als Ganzzahl dargestellt werden. Wenn z. B.  $L = 5,3$  dann wird mit  $L = 5$  und  $L = 6$  gerechnet.

Wenn  $L$  nicht ganzzahlig ist, wird  $L$  auf 2 Nachkommastellen gerundet. Dann wird  $L$  mit 100 erweitert, um die Zahl als Bruch darzustellen.

$$L = \frac{100L \in \mathbb{N}}{100} \in \mathbb{Q} \quad 4.33$$

Anschließend wird von  $100L$  genau der Wert abgezogen, der dazu führt, dass der Bruch zu einer natürlichen Zahl teilbar ist. Dieser Wert ist  $\varepsilon$ .  $\varepsilon$  ist der kleinste mögliche Wert, der abgezogen wird, um den Bruch zu einer Teilung in eine natürliche Zahl zu führen<sup>11</sup>.

$$L_1 = \begin{cases} \frac{100L - \varepsilon}{100} \in \mathbb{N} & \text{für } L \geq 1 \\ 0 & \text{für } L < 1 \end{cases} \quad 4.34$$

Anschließend wird genau der Wert addiert, der dazu führt, dass der Bruch zu einer natürlichen Zahl teilbar ist. Dieser Wert ist  $\tau$ .  $\tau$  ist der kleinste mögliche Wert, der addiert wird, um den Bruch zu einer Teilung in eine natürliche Zahl zu führen.  $\tau$  entspricht  $100 - \varepsilon$ .

$$L_2 = \frac{100L + \tau}{100} \in \mathbb{N} \quad 4.35$$

$\frac{\varepsilon}{100}$  entspricht der Wahrscheinlichkeit das  $L$  den größeren Wert annimmt,  $1 - \frac{\varepsilon}{100}$  entspricht der Wahrscheinlichkeit, das  $L$  den kleineren Wert annimmt<sup>12</sup>. Es gilt:

---

<sup>11</sup> Die Darstellung erfolgt vereinfacht mit einer Rundung auf 2 Nachkommastellen. Es ist auch möglich weitere Nachkommastellen zu erfassen, dazu muss  $L$  lediglich mit einem höheren Faktor multipliziert werden. Eine Rundung ist nur bei einer Periode erforderlich.

<sup>12</sup> Beispiel: Wenn  $L = 5,3$  beträgt, so gilt für  $w_{i,g} = w_{i,L1=5}(0,7) + w_{i,L2=6}(0,3)$ , d. h. die Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung eines Platzes mit  $L = 5$  wird mit 0,7 gewichtet und die Ansteuerung eines Platzes mit  $L = 6$  wird mit 0,3 gewichtet.

$$w_{L_1} = \mathbf{1} - \frac{\varepsilon}{100} = \frac{\tau}{100} \quad 4.36$$

$$w_{L_2} = \frac{\varepsilon}{100} \quad 4.37$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass der Lagerkanal, der sich gegenüber der auszulagernden Ladeeinheit befindet, einen freien Lagerkanal enthält, wird wie folgt berechnet.

$$w_0 = \frac{\binom{2n_x-2}{L-1}}{\binom{2n_x-1}{L}} \quad 4.38$$

Im Zähler wird berechnet, wie viele Kombinationsmöglichkeiten der Anzahl der freien Lagerkanäle  $L - 1$  innerhalb der Anzahl der verfügbaren Lagerkanäle  $2n_x - 2$  vorhanden sind. Zwei Lagerkanäle werden abgezogen, da diese nicht zur Verfügung stehen (der Lagerkanal, der die auszulagernde Ladeeinheit enthält und der Lagerkanal gegenüber, der einen freien Lagerplatz enthält).

Die Umlagerungsfahrt startet an der Position  $p_S$ . Die Wahrscheinlichkeit, dass nach  $i$  Lagerpositionen ein freier Lagerplatz gefunden wird, berücksichtigt, ob insgesamt zwei oder vier mögliche Lagerkanäle verfügbar sind. Zwei Lagerkanäle sind verfügbar, wenn  $i \geq p_S$  ist, dann kann das Shuttle-Fahrzeug nur in eine Richtung des Gangs „suchen“, in der anderen Richtung gibt es keine Lagerposition mehr. Eine Lagerposition beinhaltet zwei Lagerkanäle (links und rechts der Lagerposition). Wenn  $i < p_S$  ist, dann sind in beiden Richtungen des Gangs Lagerpositionen vorhanden. Es gilt für die Anzahl überprüfbarer Lagerkanäle  $c$  an der Position  $(p_S + i)$  und  $(p_S - i)$ :

$$c = \begin{cases} 4, & \text{für } i < p_S \\ 2, & \text{für } i \geq p_S \end{cases} \quad 4.39$$

Die Wahrscheinlichkeit  $w_i$  dafür, dass von einer Start-Position  $p_S$  nach genau  $i$  Positionen ein freier Lagerkanal gefunden wird, beträgt:

$$w_i = \begin{cases} \frac{\sum_{e=1}^c \binom{c}{e} \binom{2n_x-2(p_S+i)}{L-e}}{\binom{2n_x-1}{L}} & \text{für } i \geq p_S \text{ und } L - e \leq 2n_x - 2(p_S + i) \\ \frac{\sum_{e=1}^c \binom{c}{e} \binom{2n_x-4i-2}{L-e}}{\binom{2n_x-1}{L}} & \text{für } i < p_S \text{ und } i \geq 1 \text{ und } L - e \leq 2n_x - 4i - 2 \\ 0 & \text{für } (i < p_S \text{ und } i \geq 1 \text{ und } L - e > 2n_x - 4i - 2) \text{ oder } (i \geq p_S \text{ und } L - e > 2n_x - 2(p_S + i)) \end{cases} \quad 4.40$$

$e$  ist die Anzahl freier Lagerkanäle in den möglichen Ansteuerpositionen.  $c$  bezeichnet die Anzahl vorhandener Kanäle nach  $i$  Positionen, ausgehend von der Position  $p_S$ .  $p_S = 1$  bezeichnet die erste Position im Gang,  $p_S = 2$  die zweite Ansteuerposition, usw.

$i$  wird als Additionsfaktor verwendet, ausgehend von  $p_S$  ( $p_S + i$  oder  $p_S - i =$  Zielposition zur Umlagerung).  $i$  bezeichnet demnach die Anzahl an Positionen, die bis einschließlich zum Erreichen eines freien Lagerplatzes überquert werden müssen.

$w_i$  berechnet ausgehend von der Position, an der die Umlagerung beginnt, die Wahrscheinlichkeit, dass nach  $i$  Positionen ein freier Lagerplatz gefunden wird. Dafür wird im Zähler jeweils die Kombinationsmöglichkeit der freien Lagerkanäle innerhalb der verbliebenen Lagerkanäle berechnet. Die verbliebenen Lagerkanäle sind alle Lagerkanäle, die sich nach den Positionen  $p_S + i$  und  $p_S - i$  befinden. Im Nenner werden die Kombinationen der freien Lagerkanäle innerhalb aller Lagerkanäle im Lager mit Ausnahme des auszulagernden Lagerkanals berechnet. Im Zähler befinden sich demnach alle Möglichkeiten, einen freien Kanal nach  $i$  Positionen zu finden, im Nenner befinden sich alle Möglichkeiten der Verteilung der freien Lagerkanäle innerhalb des Gangs. Daraus folgt die Wahrscheinlichkeit für das Finden eines freien Lagerkanals nach  $i$  Positionen. Die Fallunterscheidungen berücksichtigen den Fall, dass  $i$  größer oder gleich  $p_S$  ist, das bedeutet, dass ein freier Lagerkanal nur noch in einer Richtung gefunden werden kann, da in der anderen Richtung keine Lagerkanäle mehr zur Verfügung stehen. Im umgekehrten Fall stehen in beiden Richtungen Lagerkanäle zur Verfügung. Wenn innerhalb der verbliebenen Lagerkanäle mehr freie als verbliebene Lagerkanäle vorhanden wären, so ergibt  $w_i = 0$  (dritte Fallunterscheidung), da dann in dem Lagerkanal der Position  $i + p_S$  kein freier Lagerplatz mehr gefunden werden kann (d. h. es befindet sich definitiv bereits vor der überprüften Position ein freier Lagerplatz).

Für die gewichtete Wahrscheinlichkeit, dass bei der Position  $p_S + i$  oder  $p_S - i$  ein freier Lagerplatz gefunden wird, gilt:

$$w_{i,g} = w_{i,L1}w_{L1} + w_{i,L2}w_{L2} \quad 4.41$$

$w_{i,L1}$  und  $w_{i,L2}$  geben an welche Anzahl  $L$  für die Berechnung von  $w_i$  berechnet wird.  $w_{i,L1}$  steht für die Berechnung von  $w_i$  mit  $L = L1$ ,  $w_{i,L2}$  steht für die Berechnung von  $w_i$  mit  $L = L2$ . Die Umlagerungsfahrt kann von jeder Ansteuerposition im Lager erfolgen, d. h. jede Position  $p_S$  muss berücksichtigt werden. Dann gilt für die Wahrscheinlichkeit  $w_{i,g,p}$  über alle Positionen  $p_S$ :

$$w_{i,g,p} = \begin{cases} \frac{1}{\frac{1}{2}n_x} \sum_{p_S=1}^{\frac{1}{2}n_x} w_{i,g} \text{ für } \frac{1}{2}n_x \in \mathbb{N} \\ \frac{1}{n_x} \sum_{p_S=1}^{\frac{1}{2}n_x + \frac{1}{2}} j * w_{i,g} \text{ für } \frac{1}{2}n_x \in \mathbb{Q} \end{cases} \quad 4.42$$

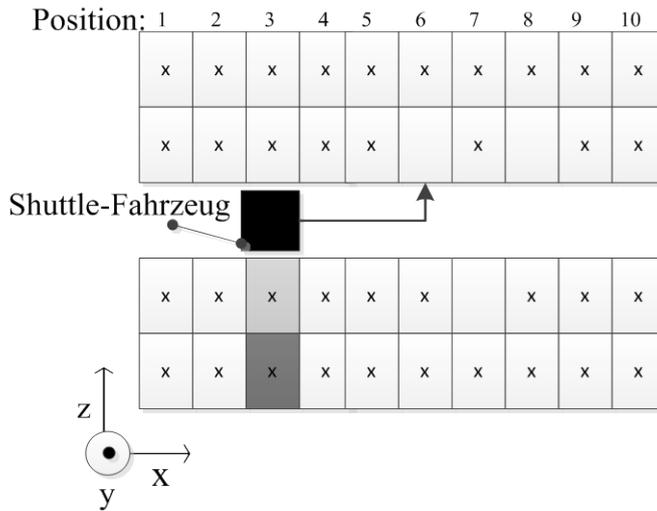
$j$  berücksichtigt den Fall mit ungerader Anzahl an Lagerplätzen. Für  $j$  gilt:

$$j = \begin{cases} 1 \text{ für } p_S = \frac{1}{2}n_x + \frac{1}{2} \\ 2, \text{sonst} \end{cases} \quad 4.43$$

$j$  sorgt für die richtige Gewichtung. Die Position in der Mitte eines Lagers mit ungerader Positionsanzahl pro Ebene wird einmal gewichtet, die weiteren Positionen zweimal (da nur bis zur „Hälfte + Position in der Mitte“ gezählt wird).

Für die Berechnung von  $w_{i,g,p}$  wird nur die Hälfte der Positionen berücksichtigt, da  $w_{i,g}$  für jede Position  $i$  bei den Start-Positionen  $p_S = 1$  und  $p_S = n_x$  den identischen Wert annimmt. Das gilt ebenso für die Start-Positionen  $p_S = 2$  und  $p_S = n_x - 1$ , für  $p_S = 3$  und  $p_S = n_x - 2$ , für  $p_S = 4$  und  $p_S = n_x - 3$ , usw. Die identische Wahrscheinlichkeit  $w_{i,g}$  berechnet sich für die weiteren Positionen nach der gezeigten Zählweise. Die Start-Positionen  $p_S = \frac{1}{2}n_x$  und  $p_S = \frac{1}{2}n_x + 1$  sind nach dieser Zählweise bei einer Ebene mit einer geraden Anzahl an Positionen die letzten beiden Positionen, bei einer weiteren Erhöhung/Verringerung von  $p_S$  ergeben sich erneut die bereits berechneten identischen Werte für  $w_{i,g}$ . Bei einer Ebene mit einer ungeraden Anzahl an Positionen sind die beiden Start-Positionen  $p_S = \frac{1}{2}n_x - \frac{1}{2}$  und  $p_S = \frac{1}{2}n_x + \frac{1}{2} + 1$  nach der gezeigten Zählweise die letzten Positionen. Für die Start-Position  $p_S = \frac{1}{2}n_x + \frac{1}{2}$ , die genau in der Mitte liegt, ist keine weitere Position vorhanden, die eine identische Wahrscheinlichkeit  $w_{i,g}$  ergeben würde. Daher erfolgt die bereits genannte Gewichtung durch  $j$ .

Abbildung 17 zeigt ein Beispiel einer erforderlichen Umlagerung zur Befreiung einer verdeckten Ladeinheit. Das Shuttle-Fahrzeug muss zur Auslagerung der hinteren Ladeinheit (dunkelgrau markiert) zunächst die davor platzierte Ladeinheit (hellgrau markiert) an den nächstmöglichen freien Lagerplatz umlagern, hier ist das ein Lagerplatz an der Position sechs. Es gilt für die in Abbildung 17 sichtbaren zehn Positionen:  $w_{i,g}(p_S = 1) = w_{i,g}(p_S = 10), \dots, w_{i,g}(p_S = 5) = w_{i,g}(p_S = 6)$ .



**Abbildung 17: Umlagerung im doppeltiefen Lager, Sicht von Oben, Rechteck mit x = belegt, Rechteck ohne x = leer**

Für die Berechnung der mittleren Fahrtzeit der Umlagerungsfahrt  $t_{FU}$  gilt:

$$t_{FU} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n_x} w_{i,g,p} \left( \frac{il_x}{v_s} + \frac{v_s}{a_s} \right) & \text{für } il_x \geq \frac{(v_s)^2}{a_s} \\ \sum_{i=1}^{n_x} w_{i,g,p} \left( 2 \sqrt{\frac{il_x}{a_s}} \right) & \text{für } il_x < \frac{(v_s)^2}{a_s} \end{cases} \quad 4.44$$

Die Lastaufnahme- und Abgabezeiten unterscheiden sich, eine Ein- oder Auslagerung im hinteren Lagerplatz benötigt eine längere Zeit als im vorderen Lagerplatz. Die mittleren Lastauf- bzw. Abgabezeiten  $t_{G,U}$  berechnen sich wie folgt. Die Berechnung beinhaltet die Lastaufnahmezeit der umzulagernden Ladeinheit sowie die Lastabgabezeit der anschließend umgelagerten Ladeinheit.

$$t_{G,U} = t_{G(L_T)} + \sum_{b=0}^{L_T-1} \frac{w_b}{1 - w_{L_T}} t_{G(b+1)} \quad 4.45$$

Für die mittlere Lastaufnahmezeit einer Ladeinheit bei der Auslagerung aus einem Lagerplatz gilt die folgende Formel. *DTA* steht für doppeltiefe Auslagerung.

$$t_{G,DTA,x} = \sum_{b=1}^{L_T} \left( \frac{w_{L_T}}{(1 - w_0) L_T} t_{G(b)} \right) + \frac{w_1}{1 - w_0} t_{G(1)} \quad 4.46$$

Die Berechnung der mittleren Spielzeit bei einem Einzelspiel der Shuttle-Fahrzeuge mit Berücksichtigung der Umlagerung ergibt:

$$t_{ES,DTA,x(k)} = 2(t_{EF,x(k)} + t_{P,x}) + t_{G,\ddot{U}P,x} + t_{G,DTA,x} + w_u(2t_{FU} + t_{GU} + 2t_{P,x}) \quad 4.47$$

#### 4.1.3.2.4 Doppelspiel Shuttle-Fahrzeug

##### Einfachtief

Das Doppelspiel durch ein Shuttle-Fahrzeug hat folgenden Ablauf:

1. Das Shuttle-Fahrzeug befindet sich unbeladen am Ganganfang (erster Lagerplatz des Gangs) und nimmt eine Ladeinheit vom Übergabeplatz auf.
2. Das Shuttle-Fahrzeug fährt mit der Ladeinheit zu dem Lagerplatz, in dem die Ladeinheit eingelagert werden soll.
3. Das Shuttle-Fahrzeug gibt die Ladeinheit am Lagerplatz ab.
4. Das Shuttle-Fahrzeug fährt unbeladen zu dem Lagerplatz, aus dem die Ladeinheit ausgelagert werden soll.
5. Das Shuttle-Fahrzeug nimmt die Ladeinheit am Lagerplatz auf.
6. Das Shuttle-Fahrzeug fährt beladen zum Ganganfang und gibt dort die Ladeinheit am Übergabeplatz ab.

Der Ablauf wiederholt sich mit jedem weiteren Doppelspiel.

$w_{i(k),x,LP1}$  bezeichnet die Wahrscheinlichkeit der Lagerplatzansteuerung des Lagerplatzes in der jeweiligen Position  $i$  in der Ebene  $k$  durch das Shuttle-Fahrzeug. Die Wahrscheinlichkeit des Verbleibens in der Position, nach einer Einlagerung, beträgt:

$$w_{0,x(k)} = \sum_{i=1}^{n_x} w_{i(k),x,LP1} \frac{w_{i(k),x,LP2}}{1 - w_{i(k),x,LP1}} + w_{i(k),x,LP2} \frac{w_{i(k),x,LP1}}{1 - w_{i(k),x,LP2}} \quad 4.48$$

Die Wahrscheinlichkeit eines Wechsels der Position wird wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} w_{m,x(k)} = & \sum_{i=1}^{n_x-m} \left( w_{i(k),x,LP1} \frac{w_{i+m(k),x,LP1} + w_{i+m(k),x,LP2}}{1 - w_{i(k),x,LP1}} \right. \\ & + w_{i(k),x,LP2} \frac{w_{i+m(k),x,LP1} + w_{i+m(k),x,LP2}}{1 - w_{i(k),x,LP2}} \\ & + w_{i+m(k),x,LP1} \frac{w_{i(k),x,LP1} + w_{i(k),x,LP2}}{1 - w_{i+m(k),x,LP1}} \\ & \left. + w_{i+m(k),x,LP2} \frac{w_{i(k),x,LP1} + w_{i(k),x,LP2}}{1 - w_{i+m(k),x,LP2}} \right) \end{aligned} \quad 4.49$$

Wenn die Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung auf jeder Seite des Gangs gleich sind (d. h. die Wahrscheinlichkeit des Anfahrens der Anfahrposition setzt sich aus der Addition der beiden gleichen Wahrscheinlichkeiten der gegenüberliegenden Lagerplätze zusammen), vereinfacht sich die Formel zu:

$$w_{0,x(k)} = \sum_{i=1}^{n_y} w_{i(k),x} \frac{\frac{1}{2} w_{i(k),x}}{1 - \frac{1}{2} w_{i(k),x}} \text{ für } w_{i(k),x,LP1} = w_{i(k),x,LP2} \quad 4.50$$

$$w_{m,x(k)} = \sum_{i=1}^{n_y-m} \left( w_{i(k),x} \frac{w_{i+m(k),x}}{1 - \frac{1}{2} w_{i(k),x}} + w_{i(k),x+m} \frac{w_{i(k),x}}{1 - \frac{1}{2} w_{i+m(k),x}} \right) \text{ für } w_{i(k),x,LP1} = w_{i(k),x,LP2} \quad 4.51$$

Für die mittlere Leerfahrt von der Einlagerung zur Auslagerung gilt:

$$t_{L,b,x(k)} = \begin{cases} \sum_{m=1}^{n_x-1} w_{m,x(k)} \left( \frac{ml_x}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a} \right) \text{ für } ml_x \geq \frac{(v_{max})^2}{a} \\ \sum_{m=1}^{n_x-1} w_{m,x(k)} \left( 2 \sqrt{\frac{ml_x}{a}} \right) \text{ für } ml_x < \frac{(v_{max})^2}{a} \end{cases} \quad 4.52$$

Die mittlere Fahrtzeit  $t_{EFL,b,x}$  für das Doppelspiel berechnet sich damit wie folgt:

$$t_{EFL,x(k)} = 2t_{EF,x(k)} + t_{L,x(k)} \quad 4.53$$

Die Schalt- und Positionierzeiten fallen mit der Wahrscheinlichkeit eines Verbleibs in der Position  $w_{0,x(k)}$  zweimal und mit der Wahrscheinlichkeit eines Positionswechsels (Summe der Wahrscheinlichkeiten über  $m$  Positionen)  $\sum_{m=1}^{n_x-1} w_{m,x(k)}$  dreimal an. Es gilt:

$$\sum_{m=1}^{n_x-1} w_{m,x(k)} = 1 - w_{0,x(k)} \quad 4.54$$

Der Erwartungswert der Schalt- und Positionierzeiten bei einem Doppelspiel  $E_{DS,x(k)}$  ergibt damit:

$$E_{DS,x(k)} = 3t_{P,x} \sum_{m=1}^{n_x-1} w_{m,x(k)} + 2t_{P,x} w_{0,x(k)} = (3 - w_{0,x(k)}) t_{P,x} \quad 4.55$$

Die mittlere Spielzeit  $t_{DS,x(k)}$  ergibt:

$$t_{DS,x(k)} = t_{EFL,x(k)} + 2t_{G,\ddot{U}P,x} + 2t_{G,x} + E_{DS,x(k)} \quad 4.56$$

### Doppeltief

Bei einem Doppelspiel im doppeltiefen Shuttle-System kommen die Fahrtzeiten und Lastaufnahmezeiten zur Umlagerung hinzu ( $w_u(2t_{FU} + t_{GU} + 2t_{P,x})$ ). Weiterhin ändern sich die Lastaufnahmezeiten ( $t_{G,DTA,x} + t_{G,DTE,x}$  statt  $2t_{G,x}$ ), da diese sich in Abhängigkeit der Kanaltiefe unterscheiden. Alle verwendeten Zeitanteile sind in Abschnitt 4.1.3.2.3 beschrieben.

$$t_{DS,DT,x(k)} = t_{EFL,b,x(k)} + 2t_{G,\ddot{U}P,x} + t_{G,DTA,x} + t_{G,DTE,x} + E_{DS,x(k)} + w_u(2t_{FU} + t_{GU} + 2t_{P,x}) \quad 4.57$$

### 4.1.3.3 Durchsatz

#### 4.1.3.3.1 Einzelspiel Heber

##### **Einlagerung**

Der mittlere Durchsatz des Hebers  $D_{ES,E,y}$  [LE/h] für Einlagerungsspiele ergibt ohne die Berücksichtigung einer Wartezeit:

$$D_{ES,E,y} = \frac{3600}{t_{ES,E,y}} \quad 4.58$$

Der mittlere Durchsatz, der durch den Heber in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist:

$$D_{ES,E,y(k)} = w_{k,y} D_{ES,E,y} \quad 4.59$$

$D_{ES,E,y}$  ist der theoretisch mögliche mittlere Durchsatz des Hebers. Dieser kann nur dann erreicht werden, wenn der berechnete mittlere Durchsatz aller im System befindlichen Shuttle-Fahrzeuge gleich oder größer  $D_{ES,E,y}$  ist. Ansonsten entstehen Wartezeiten und der Durchsatz  $D_{ES,E,y}$  kann nicht erreicht werden.

Die Wartezeiten des Hebers können durch den Vergleich mit dem mittleren Durchsatz der Shuttle-Fahrzeuge ermittelt werden (Wartezeitmodell, siehe Anhang B), oder durch die Anwendung von Warteschlangenmodellen, siehe Abschnitt 4.1.3.4.

##### **Auslagerung**

Der mittlere Durchsatz des Hebers  $D_{ES,A,y}$  für Auslagerungsspiele ergibt ohne die Berücksichtigung einer Wartezeit:

$$D_{ES,A,y} = \frac{3600}{t_{ES,A,y}} \quad 4.60$$

Der mittlere Durchsatz, der durch den Heber in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist:

$$D_{ES,A,y(k)} = w_{k,y} D_{ES,A,y} \quad 4.61$$

#### 4.1.3.3.2 Doppelspiel Heber

Der mittlere Durchsatz für ein Doppelspiel des Hebers beträgt:

$$D_{DS,y} = \frac{2 * 3600}{t_{DS,y}} \quad 4.62$$

Der mittlere Durchsatz, der durch einen Heber in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist:

$$D_{DS,y(k)} = w_k D_{DS,y} \quad 4.63$$

#### 4.1.3.3.3 Einzelspiel Shuttle-Fahrzeug

##### **Einfachtief**

Der mittlere Durchsatz pro Stunde  $D_{ES,x}$  [LE/h] für ein Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  wird wie folgt berechnet:

$$D_{ES,x(k)} = \frac{3600}{t_{ES,x(k)}} \quad 4.64$$

Der theoretisch erreichbare mittlere Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge eines Gangs wird wie folgt berechnet.

$$D_{ES,x} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{ES,x(k)} \quad 4.65$$

##### **Doppeltief – Einlagerung**

Der mittlere Durchsatz pro Stunde  $D_{ES,DTE,x(k)}$  [LE/h] für ein Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  ergibt:

$$D_{ES,DTE,x(k)} = \frac{3600}{t_{ES,DTE,x(k)}} \quad 4.66$$

Der theoretisch erreichbare mittlere Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge eines Gangs ergibt:

$$D_{ES,DTE,x} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{ES,DTE,x(k)} \quad 4.67$$

##### **Doppeltief – Auslagerung**

Der mittlere Durchsatz pro Stunde  $D_{ES,DTA,x(k)}$  [LE/h] für ein Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  ergibt:

$$D_{ES,DTA,x(k)} = \frac{3600}{t_{ES,DTA,x(k)}} \quad 4.68$$

Der theoretisch erreichbare mittlere Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge eines Gangs ergibt:

$$D_{ES,DTA,G,x} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{ES,DTA,x(k)} \quad 4.69$$

#### 4.1.3.3.4 Doppelspiel Shuttle-Fahrzeug

##### **Einfachtief**

Der mittlere Durchsatz pro Stunde  $D_{DS,x(k)}$  [LE/h] für ein Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  ergibt:

$$D_{DS,x(k)} = \frac{2 * 3600}{t_{DS,x(k)}} \quad 4.70$$

Der theoretisch erreichbare mittlere Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge eines Gangs ergibt:

$$D_{DS,x} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{DS,x(k)} \quad 4.71$$

##### **Doppeltief**

Der mittlere Durchsatz pro Stunde  $D_{DS,DT,x(k)}$  [LE/h] für ein Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  ergibt:

$$D_{DS,DT,x(k)} = \frac{2 * 3600}{t_{DS,DT,x(k)}} \quad 4.72$$

Der theoretisch erreichbare mittlere Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge eines Gangs ergibt:

$$D_{DS,DT,x} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{DS,DT,x(k)} \quad 4.73$$

#### 4.1.3.4 Warteschlangenmodell

##### 4.1.3.4.1 Annahmen

Im Folgenden werden die Annahmen zur Anwendung des Warteschlangenmodells formuliert. Das Warteschlangenmodell dient der Ermittlung der mittleren Wartezeiten zwischen Heber und Shuttle-Fahrzeug. Diese Wartezeiten treten bei einem Heber, der Doppelspiele

ausführen kann, auf, wenn keine Ladeeinheit auf einem Übergabeplatz zur Auslagerung und kein freier Übergabeplatz für eine Einlagerung vorhanden sind. Bei einem Heber, der nur Einlagerungen ausführt, tritt die Wartezeit auf, wenn kein freier Übergabeplatz zur Einlagerung vorhanden ist. Bei einem Heber, der nur Auslagerungen ausführt, tritt die Wartezeit auf, wenn keine Ladeeinheit auf einem Übergabeplatz zur Auslagerung vorhanden ist<sup>13</sup>. Shuttle-Fahrzeuge haben Wartezeiten, wenn keine Ladeeinheiten zur Einlagerung auf einem Übergabeplatz und keine Auslageraufträge vorhanden sind, oder wenn das Shuttle-Fahrzeug eine Ladeeinheit nicht auf dem Übergabeplatz zur Auslagerung abgeben kann, da dieser noch belegt ist.

Für gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme wird folgende Zuordnung für die Begriffe Benutzer und Bediener gewählt:

- Benutzer sind die Ladeeinheiten, die sich auf dem Übergabeplatz, einem Shuttle-Fahrzeug oder auf dem Heber befinden.
- Bediener sind die Heber.

Die Zwischenankunftszeit ist die Zeit, nach der ein Benutzer im Mittel in ein Warteschlangensystem eintritt. Diese Zeit kann unterschiedlich verteilt sein, in Abhängigkeit des zugrundeliegenden Prozesses. Die Bedienzeit ist die Zeit, die ein Bediener im Mittel zur Bedienung eines Benutzers benötigt. Diese Zeit kann ebenfalls unterschiedlich verteilt sein. Folgende Zuordnung wird für die Zwischenankunftszeit und die Bedienzeit gewählt:

- Die Zwischenankunftszeit ist die Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs.
- Die Bedienzeit ist die Spielzeit des Hebers, umgerechnet auf die betrachtete Ebene.

Die Anzahl der Übergabeplätze und die Kapazität eines Shuttle-Fahrzeugs definiert die Kapazität des Warteschlangensystems. Jede Ebene bildet ein eigenes Warteschlangensystem ab.

Der Eintritt eines Benutzers in das Warteschlangensystem erfolgt durch Ankunft einer Ladeeinheit am Ganganfang (gefördert durch das Shuttle-Fahrzeug). Die Bedienung des Benutzers beginnt, sobald der Heber eine Ladeeinheit aus dem Übergabeplatz aufnimmt. Die Zeit, die die Ladeeinheit benötigt, um vom Lastaufnahmemittel des Shuttle-Fahrzeugs auf den

---

<sup>13</sup> Für Berechnung der Wartezeiten ist zusätzlich zum Warteschlangenmodell ein Wartezeitmodell mit einfacheren Berechnungen entwickelt worden, das von einer starken Entkopplung zwischen Heber und Shuttle-Fahrzeug ausgeht. Das Modell geht vereinfachend davon aus, dass der jeweils niedrigere Durchsatz zwischen Heber und Shuttle-Fahrzeug in einer Ebene realisiert wird. Wenn Shuttle-Fahrzeug und Heber aber einen sehr ähnlichen Durchsatz aufweisen, werden stochastisch höher auftretende Wartezeiten nicht berücksichtigt. Das Warteschlangenmodell berücksichtigt diese stochastisch höheren Wartezeiten. Das Wartezeitmodell wird im Anhang B beschrieben.

Übergabeplatz gefördert zu werden, ist konstant und ist in der Spielzeit des Shuttle-Fahrzeugs inbegriffen. Der Benutzer tritt also in das Warteschlangensystem ein und hat dann noch eine konstante Zeit bis zur möglichen Bedienung des Bediensystems. Das wurde so gewählt, damit die Angabe zur Anzahl der Benutzer im Warteschlangensystem auch die Ladeinheit auf dem Shuttle-Fahrzeug berücksichtigen kann.

Das Warteschlangensystem beschreibt die Auslagerung. Die Ergebnisse des Warteschlangensystems gelten aber auch für Einlagerungen, da deren Ablauf identisch, nur in anderer Reihenfolge, stattfindet. Bei doppeltiefen Einlagerungen ergibt sich eine andere Spielzeit für die Shuttle-Fahrzeuge als bei Auslagerungen, da die Umlagerungen nicht auftreten. Das wird durch die entsprechende Spielzeit bei der Zwischenankunftszeit berücksichtigt. Weiterhin können bei den Bedienzeiten des Hebers unterschiedliche Spielzeiten für Ein- und Auslagerungen entstehen, wenn sich der Einlagerungspunkt an einer anderen Position als der Auslagerungspunkt befindet.

Mit diesen Aussagen kann der Grenzdurchsatz pro Ebene ermittelt werden. Für jede Ebene wird der Grenzdurchsatz separat ermittelt. Anschließend werden alle Grenzdurchsätze addiert, um den Grenzdurchsatz des Gangs zu erhalten.

Für die Zwischenankunftszeit  $t_{a(k)}$  und die Bedienzeit  $t_{b(k)}$  in der Ebene  $k$  gilt:

$$t_{a(k)} = \begin{cases} t_{ES,x(k)}, \text{ Einzelspiel, Einfachtief} \\ t_{ES,DTE,x(k)}, \text{ Einzelspiel, Einlagerung, Doppeltief} \\ t_{ES,DTA,x(k)}, \text{ Einzelspiel, Auslagerung, Doppeltief} \\ t_{DS,x(k)}, \text{ Doppelspiel, Einfachtief} \\ t_{DS,DT,x(k)}, \text{ Doppelspiel, Doppeltief} \end{cases} \quad 4.74$$

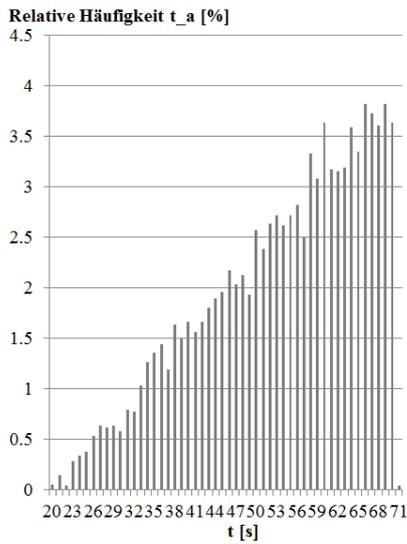
$$t_{b(k)} = \begin{cases} \frac{3600}{D_{ES,E,y(k)}}, \text{ Einzelspiel, Einlagerung} \\ \frac{3600}{D_{ES,A,y(k)}}, \text{ Einzelspiel, Auslagerung} \\ \frac{2 * 3600}{D_{DS,y(k)}}, \text{ Doppelspiel} \end{cases} \quad 4.75$$

#### 4.1.3.4.2 Zwischenankunfts- und Bedienzeiten

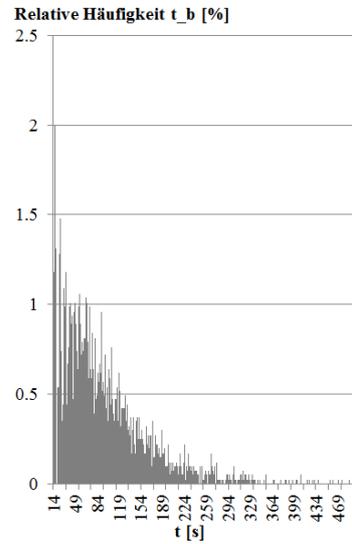
Zur Festlegung eines geeigneten Warteschlangenmodells kann die Verteilung der Zwischenankunfts- und Bedienzeiten ermittelt werden. Die Verteilung wurde mit Simulationsmodellen ermittelt, diese wurden auch zur Validierung des analytischen Modells eingesetzt. Es wurden Simulationen zu drei Szenarien durchgeführt: Einzelspiele Heber und Shuttle-Fahrzeuge, Einzelspiele Heber und Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge, Doppelspiele Heber und

Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge. Es wurden jeweils Auslagerspiele betrachtet, da die Warteschlangenmodelle auf Auslagerungen ausgelegt werden. Prinzipiell kann ein Warteschlangenmodell auf Ein- oder Auslagerungen ausgelegt werden. Wichtig ist nur die richtige Interpretation bei der Übertragung des Warteschlangenmodells auf den konkreten Anwendungsfall. Die Ermittlung der Verteilung der Zwischenankunfts- und Bedienzeiten basieren auf folgenden Simulationsparametern, die der VDI-2692 [1] entnommen sind:  $v_L = 2 \frac{m}{s}$ ,  $v_{Sh} = 2 \frac{m}{s}$ ,  $a_L = 2,5 \frac{m}{s}$ ,  $a_{Sh} = 2 \frac{m}{s}$ ,  $t_{G,y} = 2 s$ ,  $t_{G,x} = 4 s = t_{G,\ddot{u}P,x}$ ,  $t_{P,x} = t_{P,y} = 0,5 s$ ,  $P_E = P_A = -1$ ,  $i = 100$ ,  $n_y = 12$ . Die Lagerung erfolgte chaotisch. Es wurde ein einfachtiefes Shuttle-System simuliert. Je nach Szenario wurden zwischen 5000 – 20000 Zwischenankunfts- und Bedienzeiten ermittelt. Es wurde immer eine Ebene betrachtet, da das Warteschlangenmodell für eine Ebene modelliert wird. Abbildung 18 – Abbildung 21 zeigen die ermittelten Dichten der Verteilungen. Als Klassenbreite wurde eine Sekunde definiert. Bei der Darstellung der Abbildungen wird auf der Abszisse der obere Zeitwert der Klasse angezeigt (z. B. 7 = alle Zwischenankunftszeiten zwischen sechs und sieben Sekunden). Die Ordinate zeigt die relative Häufigkeit des Auftretens einer Zwischenankunftszeit. Im Szenario Doppelspiel Heber und Doppelspiel Shuttle-Fahrzeug wurde die abwechselnde Zuordnung simuliert, da das Warteschlangenmodell für diese ausgelegt wird. Das führt dazu, dass bei Betrachtung einer Ebene ein Heber für Auslagerungen (Entnahme der Ladeinheit vom Übergabeplatz) zuständig ist (und der andere für Einlagerungen). Dementsprechend wird die Bedienzeit des Hebers, der in der gewählten Ebene für Auslagerungen zuständig ist, ermittelt.

**Relative Häufigkeit  
Zwischenankunftszeit, Einzelspiele  
Heber, Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge**

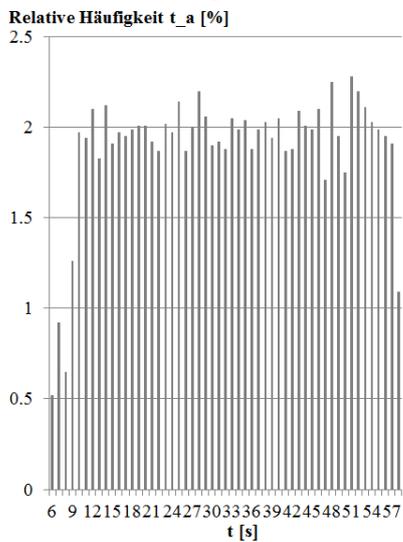


**Relative Häufigkeit Bedienzeit,  
Einzelspiele Heber, Doppelspiele  
Shuttle-Fahrzeuge**

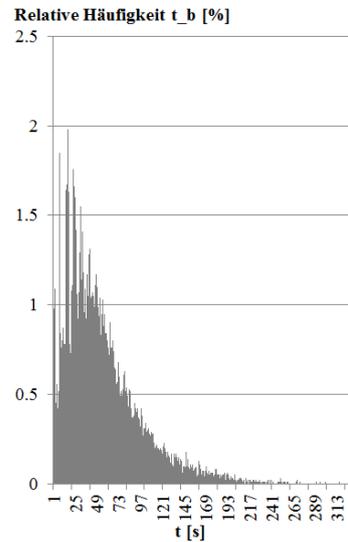


**Abbildung 18: Relative Häufigkeit der Zwischenankunfts- und Bedienzeiten, Einzelspiele Heber und Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge**

**Relative Häufigkeit  
Zwischenankunftszeit, Einzelspiele Heber  
(zwei Heber), Einzelspiele Shuttle-**

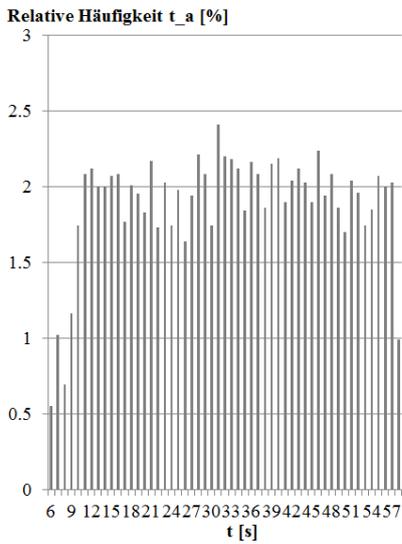


**Relative Häufigkeit Bedienzeit,  
Einzelspiele Heber (zwei Heber),  
Einzelspiele Shuttle-Fahrzeuge**

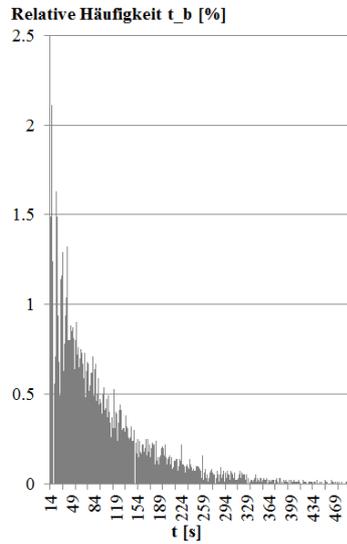


**Abbildung 19: Relative Häufigkeit der Zwischenankunfts- und Bedienzeiten, Einzelspiele Heber (zwei Heber), Einzelspiele Shuttle-Fahrzeuge**

**Relative Häufigkeit Zwischenankunftszeit, Einzelspiele Heber (ein Heber aktiv), Einzelspiele Shuttle-Fahrzeuge**

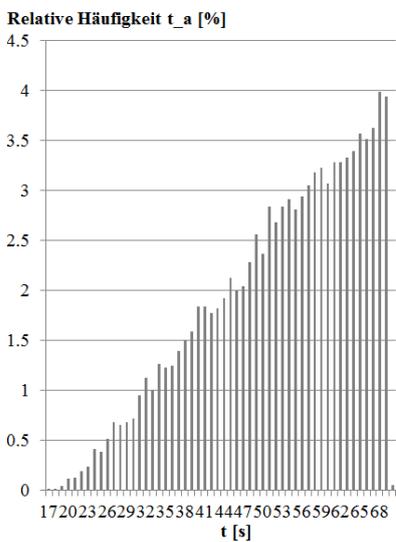


**Relative Häufigkeit Bedienzeit, Einzelspiele Heber (ein Heber aktiv), Einzelspiele Shuttle-Fahrzeuge**

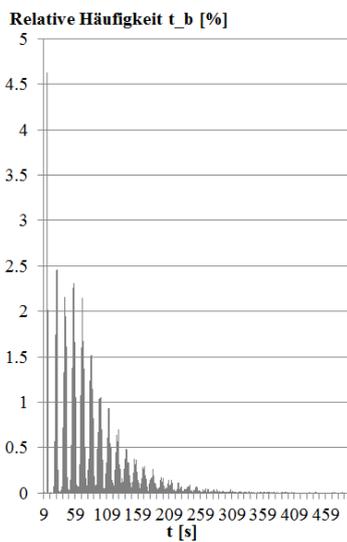


**Abbildung 20: Relative Häufigkeit der Zwischenankunfts- und Bedienzeiten, Einzelspiele Heber (ein Heber aktiv), Einzelspiele Shuttle-Fahrzeuge**

**Relative Häufigkeit Zwischenankunftszeit, Doppelspiele Heber, Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge**



**Relative Häufigkeit Bedienzeit, Doppelspiele Heber, Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge**



**Abbildung 21: Relative Häufigkeit der Zwischenankunfts- und Bedienzeiten, Doppelspiele Heber, Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge**

Die gemessene Dichte der Verteilung zeigt für alle Szenarien bei den Bedienzeiten eine annähernde Dichtefunktion der Exponentialverteilung ab einem bestimmten Zeitpunkt (der früheste Zeitpunkt, ab dem der Heber bereit für die nächste Bedienung ist, d. h. die kürzeste gemessene Bedienzeit). Zwischen dem Zeitpunkt Null und der kürzesten Bedienzeit entspricht die gemessene Dichte der Verteilung nicht der Dichtefunktion der Exponentialverteilung.

lung, da die relative Häufigkeit aller Klassen in diesem Zeitbereich Null ist. Um die gemessene Dichte ab dem Zeitpunkt Null mit der Dichtefunktion einer Verteilung möglichst genau anzunähern, ist z. B. die Gammaverteilung geeignet. Über die Form- und Skalenparameter kann die Dichtefunktion der Gammaverteilung der gemessenen Dichte angenähert werden. Die Dichtefunktion der Gammaverteilung und die zugehörigen Form- und Skalenparameter sind u. a. in [7] beschrieben.

Bei den Doppelspielen der Heber in Abbildung 21 sind zyklusbedingte „Lücken“ gut erkennbar. Diese treten auf, da bei Betrachtung eines Hebers der Heber nach einer Bedienung der Ebene mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit beim nächsten Zyklus (Spiel) wieder diese Ebene auswählt, oder mit einer niedrigeren Wahrscheinlichkeit beim übernächsten Zyklus, oder mit einer wiederum niedrigeren Wahrscheinlichkeit beim dritten Zyklus, usw.<sup>14</sup> Die Bedienzeit variiert je Zyklus nur durch die Anzahl der Ebenen (unterschiedliche Fahrtzeiten), was mit steigender Zykluszahl auch steigende Variationen der Zwischenankunftszeit zulässt. Daher sind die selten auftretenden Zwischenankunftszeiten (die „Lücken“ im Diagramm) bei den ersten Zyklen am stärksten ausgeprägt.

Bei den Zwischenankunftszeiten ergibt sich für Einzelspiele eine Gleichverteilung, für Doppelspiele nimmt die Verteilung die Form eines Dreiecks an. Aus Sicht der Warteschlangentheorie bieten sich unterschiedliche Modelle an. Für die Gleich- und Dreiecksverteilung der Zwischenankunftszeiten könnte G festgelegt werden (General, d. h. unbekannte Verteilung), für die Verteilung der Bedienzeiten M (Exponentialverteilung), siehe dazu auch Abschnitt 3.1.1.

Aus Modellierungssicht bieten M/M/-Warteschlangenmodelle<sup>15</sup> eine vergleichsweise wenig rechenintensive Modellierung, die Berechnungen beinhalten deutlich weniger Iterationen als andere Warteschlangenmodelle, siehe auch [14]. In [21] wurde gezeigt, dass die komplexere und rechenintensivere Modellierung eines M/G/1/K-Warteschlangenmodells nahezu identische Ergebnisse zum ebenfalls angewendeten M/M/1/K-Warteschlangenmodell generierte. D. h. obwohl in diesem Fall die Bedienzeit keiner Exponentialverteilung entsprach, konnte

---

<sup>14</sup> Das lässt sich vergleichen mit dem Würfeln eines idealen Würfels. Wenn eine 1 gewürfelt wird, so wird diese mit der Wahrscheinlichkeit  $1/6 * 1/6 = 1/36$  beim zweiten Wurf wiedergewürfelt. Dass eine 1 beim dritten Wurf erneut gewürfelt wird, tritt mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1/6 * 5/6 * 1/6 = 5/216$  ein. Die Ansteuerung der Ebenen erfolgt nach demselben Prinzip, d. h. bei gleicher Wahrscheinlichkeit jeder Ebenenansteuerung (Lagerstrategie „Chaotische Einlagerung“) gilt:  $1/(\text{Anzahl Ebenen}) * 1/(\text{Anzahl Ebenen})$  ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Ebene bei der zweiten Ansteuerung erneut angesteuert wird,  $1/(\text{Anzahl Ebenen}) * (\text{Anzahl Ebenen} - 1)/(\text{Anzahl Ebenen} - 1) * 1/(\text{Anzahl Ebenen})$  ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Ebene beim dritten Mal erneut angesteuert wird, usw.

<sup>15</sup> Eine Beschreibung der Notationen für Warteschlangenmodelle befindet sich in Abschnitt 3.1.1.

das Modell Ergebnisse erzielen, die ein geringes Fehlermaß zur Simulation aufwiesen (weitgehend kleiner 4%). Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird in dieser Arbeit zunächst die Modellierung mit einem M/M/...-Warteschlangenmodell vorgenommen und dieses mit der Simulation validiert. Bei geringem Fehlermaß besteht keine Notwendigkeit zur weiteren Modellierung. Bei nicht akzeptablen Fehlermaß werden rechenintensivere Warteschlangenmodelle (mit G-Modellen) modelliert und validiert.

Die Modellierung der Warteschlangen bezieht sich im Folgenden auf Auslagerspiele, die Ergebnisse lassen sich dann für Einlagerungen übertragen. Es wird jeweils eine Ebene betrachtet.

Für die Szenarien

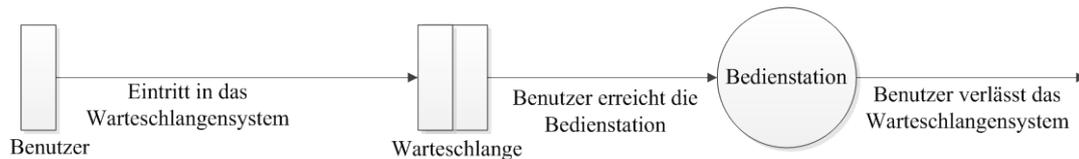
- Einzelspiel Heber und Einzelspiel Shuttle-Fahrzeug mit einem aktiven Heber,
- Einzelspiel Heber und Doppelspiel Shuttle-Fahrzeug und
- Doppelspiel Heber und Doppelspiel Shuttle-Fahrzeug mit abwechselnder Zuordnung der Übergabeplätze (siehe Abbildung 10 rechts in Abschnitt 2.2.1)

bietet sich ein M/M/1/K-Warteschlangenmodell an. Das ist dadurch begründet, dass das Warteschlangenmodell auf einen Bediener (einen Heber) reduziert werden kann. Bei Einzelspielen des Hebers bedient ein Heber die Auslagerungen, daher ist ein M/M/1/K-Warteschlangenmodell geeignet. Bei Doppelspielen der Heber mit einer abwechselnden Zuordnung der Übergabeplätze wird eine Ebene immer nur von einem Heber bei einer Auslagerung bedient. Die Ebene darüber oder darunter wird von dem anderen Heber bedient. Auch hier kann daher die ebenenweise Betrachtung auf einen Bediener (einen Heber) reduziert werden.

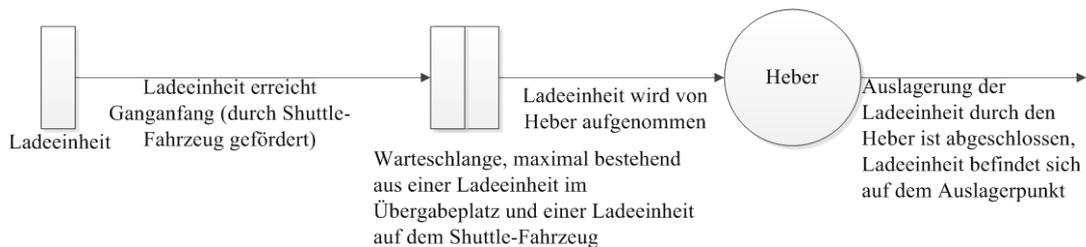
K gibt die maximale Anzahl der Benutzer, die in das Warteschlangensystem eintreten können, an. Bei einer Kapazität des Auslagerübergabeplatzes und des Shuttle-Fahrzeugs von 1 beträgt  $K = 3$ , d. h. es können sich maximal drei Benutzer im Warteschlangensystem befinden. Übertragen auf das betrachtete System bedeutet das, dass bei maximaler Benutzeranzahl eine Ladeinheit vom Heber bedient wird, eine Ladeinheit auf dem Übergabeplatz liegt und sich eine Ladeinheit auf dem Shuttle-Fahrzeug befindet. In [23] wurde ebenfalls ein M/M/1/K-Warteschlangenmodell angewendet. Der Unterschied zu dem in dieser Arbeit modellierten Modell ist, dass das Shuttle-Fahrzeug in [23] als Bediener angenommen wurde. Weiterhin wurden Einlagerungen betrachtet. Die Kapazität des Warteschlangensystems betrug dabei 2, da nur das Shuttle-Fahrzeug und ein Übergabeplatz Ladeinheiten aufnehmen können. Da in dieser Arbeit Auslagerungen betrachtet werden und der Heber als Bediener

angenommen wird, beträgt die Kapazität des Warteschlangensystems 3 (bei einem Übergabepplatz zur Aufnahme und einer Kapazität des Hebers und des Shuttle-Fahrzeugs von einer Ladeeinheit).

Abbildung 22 zeigt das Warteschlangensystem für die genannten Szenarien bei Verwendung der Terminologie der Warteschlangentheorie. Abbildung 23 zeigt das Warteschlangensystem bei Verwendung der Begriffe des Anwendungsfalls.

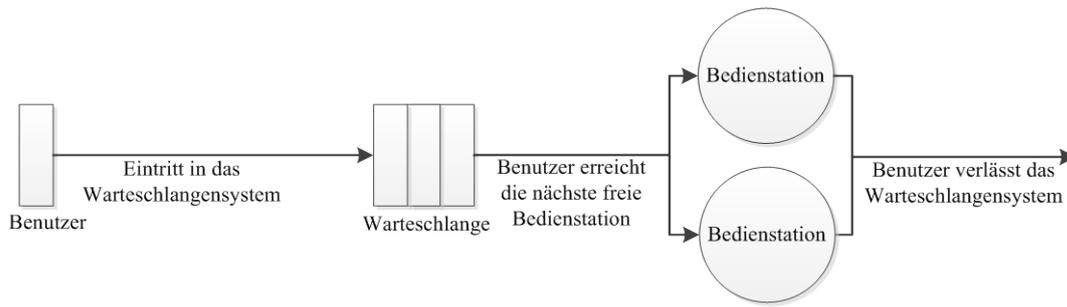


**Abbildung 22: Warteschlangensystem mit einer Bedienstation und einer Kapazität von drei Benutzern, beschrieben mit der Terminologie der Warteschlangentheorie**

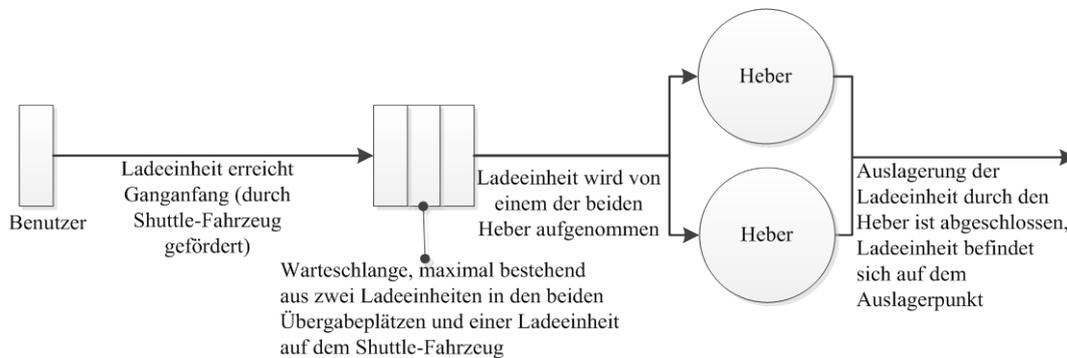


**Abbildung 23: Warteschlangensystem mit einem Heber und einer Kapazität von drei Ladeeinheiten, beschrieben mit den Begriffen des Anwendungsfalls**

Für das Szenario Einzelspiel Heber und Einzelspiel Shuttle-Fahrzeug bietet sich bei zwei aktiven Hebern ein M/M/s/K-Warteschlangenmodell an. Dieses Szenario tritt z. B. ein, wenn es für die Heber und Shuttle-Fahrzeuge in einer Phase mit vielen Auslageraufträgen möglich ist, alle Übergabepplätze für Auslagerungen zu nutzen. Bei zwei Hebern beträgt  $s = 2$ . Bei den o. g. Kapazitäten ergibt  $K = 5$ . Bei maximaler Benutzeranzahl befinden sich zwei Ladeeinheiten auf dem Heber, zwei auf beiden Übergabepplätzen (zwei Heber = zwei Übergabepplätze pro Ebene), und eine Ladeeinheit auf dem Shuttle-Fahrzeug. Ein M/M/s/K-Warteschlangenmodell bildet dann eine beliebige Übergabepplatzbelegung ab, siehe Abschnitt 2.2.1 und Abbildung 10. Abbildung 24 zeigt das dem Szenario entsprechende Warteschlangensystem bei Verwendung der Terminologie der Warteschlangentheorie. Abbildung 25 zeigt das Warteschlangensystem bei Verwendung der Begriffe des Anwendungsfalls.



**Abbildung 24: Warteschlangensystem mit zwei Bedienstationen und einer Kapazität von fünf Benutzern, beschrieben mit der Terminologie der Warteschlangentheorie**



**Abbildung 25: Warteschlangensystem mit zwei Bedienstationen und einer Kapazität von fünf Benutzern, beschrieben mit den Begriffen des Anwendungsfalls**

#### 4.1.3.4.3 M/M/1/K-Warteschlangenmodell

Der mittlere Durchsatz [LE/s] des M/M/1/K-Warteschlangenmodells berechnet sich für eine Ebene  $k$  wie folgt, nach [14]:

$$D_{M/M/1/K,[s],\gamma(k)} = \frac{1 - p^K}{1 - p^{K+1}} \lambda = \frac{1 - p^K}{1 - p^{K+1}} \frac{1}{t_{a(k)}} \quad 4.76$$

Mit:

$\lambda$ : Mittlere Ankunftsrate, d. h. die Anzahl der Ankünfte pro Zeiteinheit [14, 18].

$\lambda$  entspricht dem Kehrwert der mittleren Zwischenankunftszeit, daher kann  $\frac{1}{t_a}$  eingesetzt werden.

Die Umrechnung auf [LE/h] und die Berücksichtigung von Einzel- und Doppelspielen führt zu:

$$D_{M/M/1/K,y(k)} = \begin{cases} 2 * 3600 \frac{1-p^K}{1-p^{K+1}} \frac{1}{t_{a(k)}}, & \text{Doppelspiele} \\ 3600 \frac{1-p^K}{1-p^{K+1}} \frac{1}{t_{a(k)}}, & \text{Einzelspiele} \end{cases} \quad 4.77$$

Der Lastfaktor  $p$  wird wie folgend berechnet [14]:

$$p = \lambda t_b = \frac{t_{b(k)}}{t_{a(k)}} \quad 4.78$$

Für  $t_{a(k)}$  und  $t_{b(k)}$  gelten die im Abschnitt 4.1.3.4.2 festgelegten Berechnungen.

Der mittlere Durchsatz eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$D_{M/M/1/K,x(k)} = D_{M/M/1/K,y(k)} \quad 4.79$$

Der mittlere Durchsatz eines Hebers insgesamt, über alle  $k$  Ebenen, ergibt:

$$D_{M/M/1/K,y} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{M/M/1/K,y(k)} \quad 4.80$$

Der mittlere Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge des Gangs ergibt:

$$D_{M/M/1/K,x} = D_{M/M/1/K,y} \quad 4.81$$

Für die mittlere Spielzeit des Hebers, unter Berücksichtigung der Wartezeiten, gilt:

$$t_{M/M/1/K,w,y} = \begin{cases} \frac{3600}{D_{M/M/1/K,y}}, & \text{Einzelspiele} \\ \frac{2 * 3600}{D_{M/M/1/K,y}}, & \text{Doppelspiele} \end{cases} \quad 4.82$$

Für die mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  gilt:

$$t_{M/M/1/K,w,x(k)} = \begin{cases} \frac{3600}{D_{M/M/1/K,x(k)}} & \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeug} \\ \frac{2 * 3600}{D_{M/M/1/K,x(k)}} & \text{Doppelspiele Shuttle – Fahrzeug} \end{cases} \quad 4.83$$

Für die mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang gilt:

$$t_{M/M/1/K,w,x} = \frac{1}{n_y} \sum_{k=1}^{n_y} t_{M/M/1/K,w,x(k)} \quad 4.84$$

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit des Hebers gilt:

$$t_{w,M/M/1/K,y} = \begin{cases} 3600 \left( \frac{1}{D_{M/M/1/K,y}} - \frac{1}{D_{ES,E,y}} \right), & \text{Einzelspiele Lift, Einlagerung} \\ 3600 \left( \frac{1}{D_{M/M/1/K,y}} - \frac{1}{D_{ES,A,y}} \right), & \text{Einzelspiele Lift, Auslagerung} \\ 2 * 3600 \left( \frac{1}{D_{M/M/1/K,y}} - \frac{1}{D_{DS,y}} \right), & \text{Doppelspiele Lift} \end{cases} \quad 4.85$$

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  gilt:

$$t_{w,M/M/1/K,x(k)} = \begin{cases} 3600 \left( \frac{1}{D_{M/M/1/K,x(k)}} - \frac{1}{D_{ES,x(k)}} \right), & \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Einfachtief} \\ 3600 \left( \frac{1}{D_{M/M/1/K,x(k)}} - \frac{1}{D_{ES,DTE,x(k)}} \right), & \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltiefe Einlagerung} \\ 3600 \left( \frac{1}{D_{M/M/1/K,x(k)}} - \frac{1}{D_{ES,DTA,x(k)}} \right), & \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltiefe Auslagerung} \\ 2 * 3600 \left( \frac{1}{D_{M/M/1/K,x(k)}} - \frac{1}{D_{DS,x(k)}} \right), & \text{Doppelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Einfachtief} \\ 2 * 3600 \left( \frac{1}{D_{M/M/1/K,x(k)}} - \frac{1}{D_{DS,DT,x(k)}} \right), & \text{Doppelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltief} \end{cases} \quad 4.86$$

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs in einem Gang gilt:

$$t_{w,M/M/1/K,x} = \frac{1}{n_y} \sum_{k=1}^{n_y} t_{w,M/M/1/K,x(k)} \quad 4.87$$

Für den mittleren Auslastungsgrad des Hebers gilt:

$$\eta_{M/M/1/K,y} = \begin{cases} \frac{D_{M/M/1/K,y}}{D_{ES,E,y}}, & \text{Einzelspiele Lift, Einlagerung} \\ \frac{D_{M/M/1/K,y}}{D_{ES,A,y}}, & \text{Einzelspiele Lift, Auslagerung} \\ \frac{D_{M/M/1/K,y}}{D_{DS,y}}, & \text{Doppelspiele Lift} \end{cases} \quad 4.88$$

Für den mittleren Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  gilt:

$$\eta_{M/M/1/K,x(k)} = \begin{cases} \frac{D_{M/M/1/K,x(k)}}{D_{ES,x(k)}}, \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Einfachtief} \\ \frac{D_{M/M/1/K,x(k)}}{D_{ES,DTE,x(k)}}, \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltiefe Einlagerung} \\ \frac{D_{M/M/1/K,x(k)}}{D_{ES,DTA,x(k)}}, \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltiefe Auslagerung} \\ \frac{D_{M/M/1/K,x(k)}}{D_{DS,x(k)}}, \text{Doppelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Einfachtief} \\ \frac{D_{M/M/1/K,x(k)}}{D_{DS,DT,x(k)}}, \text{Doppelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltief} \end{cases} \quad 4.89$$

Für den Mittelwert des Auslastungsgrads eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang gilt:

$$\eta_{M/M/1/K,x} = \begin{cases} \frac{D_{M/M/1/K,x}}{D_{ES,x}}, \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Einfachtief} \\ \frac{D_{M/M/1/K,x}}{D_{ES,DTE,x}}, \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltiefe Einlagerung} \\ \frac{D_{M/M/1/K,x}}{D_{ES,DTA,x}}, \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltiefe Auslagerung} \\ \frac{D_{M/M/1/K,x}}{D_{DS,x}}, \text{Doppelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Einfachtief} \\ \frac{D_{M/M/1/K,x}}{D_{DS,DT,x}}, \text{Doppelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltief} \end{cases} \quad 4.90$$

#### 4.1.3.4.4 M/M/s/K-Warteschlangenmodell

Das M/M/s/K-Warteschlangenmodell betrachtet Einzelspiele (Heber und Shuttle-Fahrzeuge). Die Formeln enthalten daher keine Berechnungen zu Doppelspielen.

Der mittlere Durchsatz [LE/s] des M/M/s/K-Warteschlangenmodells (generiert durch zwei Heber) wird für eine Ebene  $k$  wie folgt berechnet, nach [14]:

$$D_{M/M/s/K,[s],2y(k)} = (1 - \pi_K)\lambda = (1 - \pi_K)\frac{1}{t_a} \quad 4.91$$

Die Umrechnung auf [LE/h] führt bei Einzelspielen der Heber zu:

$$D_{M/M/s/K,2y(k)} = 3600(1 - \pi_K)\frac{1}{t_a} \quad 4.92$$

Da der mittlere Durchsatz in der Ebene  $k$  durch zwei Heber generiert wird, erbringt ein Heber folgenden mittleren Durchsatz:

$$D_{M/M/s/K,y(k)} = \frac{1}{2}D_{M/M/s/K,2y(k)} \quad 4.93$$

Die Gleichgewichtswahrscheinlichkeit für  $K$  Benutzer im Warteschlangensystem wird wie folgt berechnet (umgeformt auf Basis von [14],  $s_B$  gibt die Anzahl der Bediener an):

$$\pi_K = \pi_0 \frac{p^K}{s_B! (s_B)^{(K-s_B)}} \quad 4.94$$

Die Gleichgewichtswahrscheinlichkeit für 0 Benutzer im Warteschlangensystem (die Wahrscheinlichkeit für leeres Warteschlangensystem) wird wie folgt berechnet [14]:

$$\pi_0 = \left( \sum_{k=0}^{s_B} \frac{p^k}{k!} + \frac{(s_B)^{s_B}}{s_B!} \sum_{k=s_B+1}^K \frac{p^k}{(s_B)^k} \right)^{-1} \quad 4.95$$

Für  $t_a$  und  $t_b$  gelten die im Abschnitt 4.1.3.4.2 festgelegten Berechnungen.

Der mittlere Durchsatz eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$D_{M/M/s/K,x(k)} = 2D_{M/M/s/K,y(k)} \quad 4.96$$

Der mittlere Durchsatz eines Hebers insgesamt, über alle  $k$  Ebenen, ergibt:

$$D_{M/M/s/K,y} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{M/M/s/K,y(k)} \quad 4.97$$

Der mittlere Durchsatz aller Shuttle-Fahrzeuge des Gangs ergibt:

$$D_{M/M/s/K,x} = 2D_{M/M/s/K,y} \quad 4.98$$

Für die mittlere Spielzeit des Hebers, unter Berücksichtigung der Wartezeiten, gilt:

$$t_{M/M/s/K,w,y} = \frac{3600}{D_{M/M/s/K,y}} \quad 4.99$$

Für die mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs, unter Berücksichtigung der Wartezeit in der Ebene  $k$  gilt:

$$t_{M/M/s/K,w,x(k)} = \frac{3600}{D_{M/M/s/K,x(k)}} \quad 4.100$$

Für die mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang gilt:

$$t_{M/M/s/K,w,x} = \frac{1}{n_y} \sum_{k=1}^{n_y} t_{M/M/s/K,w,x(k)} \quad 4.101$$

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit des Hebers gilt:

$$t_{w,M/M/s/K,y} = \begin{cases} 3600 \left( \frac{1}{D_{M/M/s/K,y}} - \frac{1}{D_{ES,E,y}} \right), & \text{Einzelspiele Lift, Einlagerung} \\ 3600 \left( \frac{1}{D_{M/M/1/K,y}} - \frac{1}{D_{ES,A,y}} \right), & \text{Einzelspiele Lift, Auslagerung} \end{cases} \quad 4.102$$

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  gilt:

$$t_{w,M/M/s/K,x(k)} = \begin{cases} 3600 \left( \frac{1}{D_{M/M/s/K,x(k)}} - \frac{1}{D_{ES,x(k)}} \right), & \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Einfachtief} \\ 3600 \left( \frac{1}{D_{M/M/s/K,x(k)}} - \frac{1}{D_{ES,DTE,x(k)}} \right), & \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltiefe Einlagerung} \\ 3600 \left( \frac{1}{D_{M/M/s/K,x(k)}} - \frac{1}{D_{ES,DTA,x(k)}} \right), & \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltiefe Auslagerung} \end{cases} \quad 4.103$$

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs in einem Gang gilt:

$$t_{w,M/M/s/K,x} = \frac{1}{n_y} \sum_{k=1}^{n_y} t_{w,M/M/s/K,x(k)} \quad 4.104$$

Für den mittleren Auslastungsgrad des Hebers gilt:

$$\eta_{M/M/s/K,y} = \begin{cases} \frac{D_{M/M/s/K,y}}{D_{ES,E,y}}, & \text{Einzelspiele Lift, Einlagerung} \\ \frac{D_{M/M/s/K,y}}{D_{ES,A,y}}, & \text{Einzelspiele Lift, Auslagerung} \end{cases} \quad 4.105$$

Für den mittleren Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  gilt:

$$\eta_{M/M/s/K,x(k)} = \begin{cases} \frac{D_{M/M/s/K,x(k)}}{D_{ES,x(k)}}, & \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Einfachtief} \\ \frac{D_{M/M/s/K,x(k)}}{D_{ES,DTE,x(k)}}, & \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltiefe Einlagerung} \\ \frac{D_{M/M/s/K,x(k)}}{D_{ES,DTA,x(k)}}, & \text{Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltiefe Auslagerung} \end{cases} \quad 4.106$$

Für den Mittelwert des Auslastungsgrads eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang gilt:

$$\eta_{M/M/s/K,x} = \begin{cases} \frac{D_{M/M/s/K,x}}{D_{ES,x}}, \text{ Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Einfachtief} \\ \frac{D_{M/M/s/K,x}}{D_{ES,DTE,x}}, \text{ Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltiefe Einlagerung} \\ \frac{D_{M/M/s/K,x}}{D_{ES,DTA,x}}, \text{ Einzelspiele Shuttle – Fahrzeuge, Doppeltiefe Auslagerung} \end{cases} \quad 4.107$$

#### 4.1.4 Zusammenfassung der analytischen Modelle

Die analytischen Modelle wurden zunächst für die Berechnung der Spielzeit und des Durchsatzes ohne Berücksichtigung von Wartezeiten aufgestellt. Dabei wurde eine einstellbare Verteilung der Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung modelliert. Das bedeutet, Heber und Shuttle-Fahrzeuge können jede Ebene/jeden Lagerplatz mit parametrierbaren Wahrscheinlichkeiten ansteuern. Das ist eine wesentliche Neuerung zu den in der Literatur vorhandenen Modellen und bietet die Möglichkeit der Modellierung von Lagerstrategien, die diese Wahrscheinlichkeiten beeinflussen, insbesondere die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“. Dadurch können Optimierungspotentiale zur Steigerung des Durchsatzes ermittelt werden.

Der Ansatz des analytischen Modells zur Ermittlung der Umlagerungszeit bei doppeltiefen Shuttle-Systemen beinhaltet alle möglichen Positionen im Gang, an denen sich das Shuttle-Fahrzeug befinden kann. Im Vergleich zum bestehenden Modell von Lerher [26] zur Ermittlung der Umlagerungszeit bei doppeltiefen Shuttle-Systemen wird nicht angenommen, dass zunächst alle hinteren Lagerplätze vollständig befüllt werden müssen, bevor eine Umlagerung auftreten kann. Dadurch können Lagerstrategien berücksichtigt werden, die die Positionen am Gangende bei geeignetem Lagerfüllgrad nicht zur Einlagerung verwenden. Das kann bei der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ durch das Bilden einer „Leerzone“ zur Durchsatzsteigerung realisiert werden.

Anschließend erfolgte die Modellierung der Wartezeiten. Es wurden bekannte Warteschlangenmodelle aus der Literatur angewendet, M/M/1/K- sowie M/M/s/K-Warteschlangenmodelle. Zur Einschätzung und anschließenden Festlegung der anzuwendenden Warteschlangenmodelle wurden die Verteilungsfunktionen der Zwischenankunftszeiten und der Bedienzeiten simulativ ermittelt. Die Warteschlangenmodelle wurden dem Anwendungsfall entsprechend angepasst, Ladeeinheiten wurden als Benutzer definiert, Heber als Bediener. Diese Definition erfolgte, da das Warteschlangenmodell für Auslagerungen modelliert wurde. Bei Auslagerungen werden Ladeeinheiten von einem Shuttle-Fahrzeug zu

einem Übergabeplatz gefördert und anschließend nach ggf. auftretender Wartezeit von einem Heber zum Auslagerungspunkt gefördert. Daher trifft die Definition Benutzer auf Ladeeinheiten zu: Diese treten in das System ein (warten auf einem Übergabeplatz oder auf dem Shuttle-Fahrzeug) und werden nach einer ggf. auftretenden Wartezeit bedient (zum Auslagerungspunkt gefördert, an dem sie das System verlassen). Die Bedienung der Ladeeinheit erfolgt durch den Heber, dieser ist immer im System vorhanden und kann mit einer bestimmten Bedienzeit (Lastaufnahme, Fahrt, Lastabgabe usw.) die Bedienung vornehmen und ist anschließend bereit für eine erneute Bedienung eines Benutzers (einer Ladeeinheit). Damit erfüllt der Heber die Definition eines Bedieners. Mit den Modellen ist die Berechnung des Durchsatzes (ebenenweise und für einen Gang), der Spiel- und Wartezeit und des Auslastungsgrades der Fördermittel möglich. Durch die Möglichkeit der einstellbaren Verteilung der Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung kann insbesondere die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ angewendet und deren Optimierungspotential im Vergleich zur Lagerstrategie „Chaotische Einlagerung“ ermittelt werden.

#### **4.2 Simulationsmodell**

Im Folgenden wird das entwickelte Simulationsmodell beschrieben. Zunächst wird die Anwendung von Simulationsstudien erläutert. Anschließend wird auf die angewendete Simulationssoftware, die erforderlichen Eingangsgrößen, die unterschiedlichen Architekturen zur Ermöglichung einer Parametrierung, die Einbindung eines Auftragsgenerators und die Prozesse zur Bearbeitung der Aufträge sowie die Messung der Ausgangsgrößen eingegangen. Teile des Simulationsmodells, z. B. das Modell für ganggebundene Shuttle-Systeme, sind im Rahmen eines Forschungsprojekts der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) entstanden, welches den Titel „Entwicklung situationsabhängiger Lagerstrategien unter Berücksichtigung des Durchsatzes und der Energieeffizienz“ trägt. Es wird dem Kurzbegriff „SmartShuttle“ zugeordnet und hat die IGF-Vorhabensnummer 19508N. Das Simulationsmodell ist daher bei den übereinstimmenden Teilen auch im Forschungsbericht des Projekts in ähnlicher oder gleicher Weise wie in dieser Arbeit vom Autor dieser Arbeit beschrieben worden. Das wird im Folgenden durch eine entsprechende Zitierung berücksichtigt. Das IGF-Forschungsprojekt der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e. V. (BVL) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

In Abschnitt 4.2.1 wird das Forschungsprojekt „SmartShuttle“ kurz beschrieben. Anschließend werden in Abschnitt 4.2.2 Simulationsstudien beschrieben. In Abschnitt 4.2.3 wird auf die verwendete Simulationssoftware eingegangen. Abschnitt 4.2.4 beschreibt die Eingangsgrößen des Simulationsmodells, Abschnitt 4.2.4 beschreibt Möglichkeiten zur Parametrierung und in Abschnitt 4.2.6 erfolgt die Modellbeschreibung.

#### 4.2.1 Forschungsprojekt SmartShuttle

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Entwicklung situationsabhängiger Lagerstrategien für Shuttle-Systeme unter Berücksichtigung des Durchsatzes und der Energieeffizienz“ mit der Kurzbezeichnung „SmartShuttle“ sind ein Simulationsmodell und eine Webseite zur Anwendung für Planer, Anwender und Hersteller von Shuttle-Systemen entstanden. Über die Webseite kann ein individuelles Shuttle-System parametrierbar werden und mit situationsabhängigen Lagerstrategien simuliert werden. Zur Eingabe der Parameter auf der Webseite sind Beispiele, Erklärungen und Zwischenrechnungen enthalten, um die Eingabe so einfach wie möglich zu gestalten. Der Simulationslauf erzeugt Ausgangsgrößen zum Durchsatz und der Energieeffizienz, diese werden in Tabellen- und Diagrammform dem Anwender über eine automatisiert versandte E-Mail zugänglich gemacht. So können im Planungsprozess oder im laufenden Betrieb eines Shuttle-Systems Optimierungspotentiale ermittelt werden. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts tragen zu einem höheren Durchsatz, geringeren Energiekosten, aufwandsreduzierter Planung und einer höheren Anpassungsfähigkeit an wechselnde Anforderungen für Shuttle-Systeme bei [72].

#### 4.2.2 Simulationsstudien

In diesem Abschnitt wird der Hintergrund des Einsatzes von Simulationsmodellen für Simulationsstudien beschrieben. Die VDI-Richtlinie 3633 [73] beschreibt relativ umfassend den Grund der Anwendung von Simulationsmodellen, die Modellentwicklung, Validierung und die Auswertung der Ergebnisse. Das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell ist ein zeit-diskretes Modell. Es muss ein Ereignis eintreten, das eine Änderung einer oder mehrerer Variablen verursachen kann. Der Simulationslauf arbeitet Ereignis für Ereignis ab. Die Zeit zwischen den Ereignissen wird „übersprungen“, da in dieser aus Simulationssicht nichts passiert. Diese Art der Simulation wird auch als ereignisorientierte Simulation bezeichnet. Der interessierte Leser sei bei weiterführendem Interesse zu Simulationsstudien auf die ausführlichen Werke von Banks et al. [7] oder Law [74] hingewiesen.

Simulation wird in der VDI-Richtlinie 3633 [73] wie folgt definiert: „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Er-

kenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.“ Im weiteren Sinne wird dabei unter Simulation „das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell“ verstanden.

Ziel einer Simulationsstudie ist es also, zu Erkenntnissen über reale Systeme zu gelangen. Das Werkzeug, um zu diesen Erkenntnissen zu gelangen, ist das Simulationsmodell. Um zu Erkenntnissen über ein reales System zu gelangen ist die Simulation eine Möglichkeit unter vielen. Experimente am realen System selbst sind eine weitere Möglichkeit, oder Experimente an Miniaturmodellen, oder die mathematische Analyse mithilfe der analytischen Modellbildung (wie in dieser Arbeit ebenfalls durchgeführt).

#### 4.2.3 Simulationssoftware

Die angewendete Simulationssoftware ist AutoMOD, Version 12.6.1.12, ein Produkt des Unternehmens Applied Materials<sup>®</sup>. Die Simulationssoftware verbindet grafisch darstellbare Elemente mit einer Prozessumgebung, die skriptbasiert ist. Grundlage des Modells ist, dass Ladeeinheiten (in der Simulationssoftware als Loads bezeichnet) Befehle erhalten. Simulationsmodelle mit der Simulationssoftware können, müssen aber nicht grafikbasiert modelliert werden. Es ist auch möglich, skriptbasiert ein Simulationsmodell zu programmieren und simulieren. Das spart Rechenleistung. Die Schnelligkeit der Simulationsberechnung eines Simulationslaufes ist auch von der Programmierung abhängig. Bei ungünstiger Programmierung, z. B. durch das Erzeugen sehr vieler Events, kann die Berechnung längere Zeiträume in Anspruch nehmen.

Die Simulationssoftware wird in [7] der applikationsorientierten Simulationssoftware zugeordnet (und als Applikation wird „manufacturing“, d. h. Produktion, zugeordnet), im Gegensatz zu einer generalistischen Simulationssoftware, die für jeden denkbaren Simulationszweck eingesetzt werden kann. Auch in [74] wird sie als Simulationssoftware mit dem Fokus auf Produktion und Fördertechnik beschrieben. Dieser Einordnung kann hinzugefügt werden, dass die Simulationssoftware auch generalistisch einsetzbar ist: Durch die Möglichkeit der skriptbasierten Programmierung mit beliebiger Variablenzeugung und des Zugriffs auf die Zufallsgeneratoren.

Die Vorgehensweise zur Nutzung des Simulationswerkzeuges ist, stark vereinfacht, folgende:

1. Definieren, wann Ladeeinheiten erzeugt werden und wo sie erstmalig im Simulationsmodell auftreten (z. B. in einem Warteschlangenbereich, engl. Queue).

2. Jeder Ladeinheit eine Aktion zuweisen: Fahren (engl. Travel) oder Bewegen (engl. Move) oder Warten (engl. wait).
3. Erzeugen von Variablen/Tabellen zur Messung der Kennzahlen.

Wenn die Ladeinheit sich virtuell bewegen soll, ist die Nutzung eines Fördermittels erforderlich, das die Ladeinheit für ihre Förderung nutzt. Das kann z. B. ein Förderband (engl. Conveyer), ein Fahrerloses Transportfahrzeug (engl. path mover) oder ein Regalbediengerät sein.

Der Move-Befehl dient dazu, der Ladeinheit den Wechsel von einem Element zu einem anderen zu ermöglichen, z. B. von einem Förderband in einen Warteschlangenbereich oder auf ein FTF zu wechseln.

Der wait-Befehl dient dazu, die Ladeinheit eine definierte Zeit warten zu lassen.

#### 4.2.4 Lösungen zur Parametrierung

Simulationsmodelle werden häufig für ein genau definiertes Lagersystem entwickelt. Das bedeutet, es ist z. B. erforderlich, den zu simulierenden Objekten genaue Maße zuzuweisen (wie die Geometrie einer Ladeinheit). Dementsprechend ist die Umsetzung aufwendig, wenn diese Daten variabel sein sollen. Mit der eingesetzten Simulationssoftware können über Schnittstellen zu Datenbanken variable Daten komfortabel eingelesen und somit sehr flexible Modelle aufgebaut werden<sup>16</sup>.

##### 4.2.4.1 Lösung durch Generierung von Simulationsmodellen

Dieser Abschnitt beschreibt eine Lösung zur Parametrierung des Simulationsmodells durch die automatische Generierung von Simulationsmodellen.

Das Simulationsmodell beinhaltet die Möglichkeit bestimmter Parametervariationen der Lagerabmessungen, die zu einer Änderung der Visualisierung des Simulationsmodells führen. Bei der Variation der Parameter, welche die Visualisierung beeinflussen, wird jeweils ein neues Simulationsmodell generiert.

Für die automatische Generierung eines Simulationsmodells wird folgendes Vorgehen gewählt:

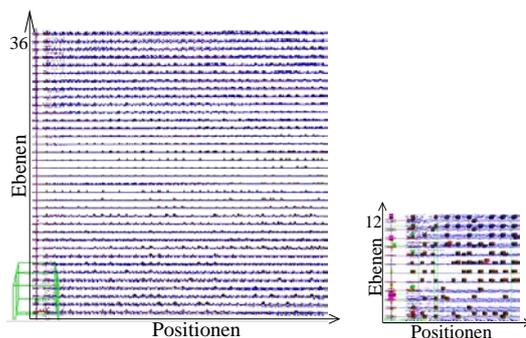
1. Entwickeln eines Basis-Modells mit festgelegten Parameterwerten.

---

<sup>16</sup> Dieser Abschnitt ist auch im IGF-Forschungsbericht zum Forschungsprojekt „SmartShuttle“ enthalten, siehe [71].

2. Eingabe der gewünschten Parameterwerte für das zu generierende Modell in eine Text-Datei.
3. Einlesen der gewünschten Parameterwerte aus der Text-Datei mit der Software Matlab.
4. Die Modell-Dateien des Basis-Modells mit der Software Matlab einlesen. Diese enthalten alle Referenzierungen auf Modellmaße, Anzahl der Komponenten im Modell usw.
5. Variation der Simulationsmodell-Dateien durch einen dafür entwickelten Algorithmus.
6. Erzeugen von Ausgabe-Dateien mit der geänderten Codierung.
7. Ersetzen der Dateien des Basis-Modells durch die Ausgabe-Dateien.
8. Speichern des Ausgabe-Modells.

Nach der Generierung kann das Modell mit der Simulationssoftware geöffnet werden und die visuelle Umgebung wird auf Basis der geänderten Dateien erzeugt. Abbildung 26 zeigt zwei generierte Simulationsmodelle ausschnittsweise in der Seitenansicht.



**Abbildung 26: Simulationsmodelle, mit der Simulationssoftware geöffnet, links hohes Shuttle-System mit 36 Ebenen, rechts relativ dazu ein niedriges Shuttle-System mit 12 Ebenen**

Der Algorithmus berechnet neue Lagerabmessungen auf Basis der Parameterwerte für die Visualisierung des Simulationsmodells und trägt diese und alle weiteren vorgegebenen Parameterwerte an den richtigen Stellen in der jeweiligen Datei des Simulationsmodells ein. Im Folgenden wird ein Beispiel des Algorithmus zur Generierung eines neuen Modells beschrieben. Dabei werden die einzelnen Ebenen des Hebers in die Heber-Datei eingetragen:

1. Zeilenweises Durchsuchen der Heber-Datei bis zur ersten Zeile, in der die Ebenen eingetragen werden.
2. Solange Ebenenzähler  $\leq$  Anzahl der Ebenen gehe zu 3., sonst zu 9.

3. Berechnung der Höhe der jeweiligen Ebene auf Basis der Parameter Anzahl Ebenen und Abstand zwischen zwei Ebenen.
4. Durchsuchen der Zeile nach der Position des zu ändernden Parameterwerts.
5. Ändern des Parameterwerts (Angabe der Höhe der jeweiligen Ebene).
6. Ebenenzähler um 1 erhöhen.
7. Gehe in die nächste Zeile.
8. Gehe zu 2.
9. Falls vorhanden, überflüssige Zeilen mit weiteren Ebenen löschen.

Durch diese Methode ist es möglich, mit geringem Aufwand für eine neue Parameterkombination ein Simulationsmodell zu generieren und anschließend durch Simulationsläufe die interessierenden Ausgangsgrößen zu ermitteln<sup>17</sup>.

#### 4.2.4.2 Lösung durch Verzicht auf Objekte

Die im Folgenden beschriebene Lösung bezieht sich auf das Simulationsmodell für ganggebundene Shuttle-Systeme. Hierbei werden nur Ladeeinheiten abgebildet, weitere Objekte werden nicht genutzt. Dementsprechend ist eine variable Parametrierung möglich und es können beliebige Shuttle-Systeme abgebildet werden.

Um dennoch eine Visualisierung zu ermöglichen, werden für alle Objekte Ladeeinheiten verwendet, die entsprechend der vorzugebenden Parameterwerte in ihren Abmessungen angepasst sind. Für jede Bewegung eines Fördermittels wird die zugeordnete Ladeeinheit bewegt. Die Programmierumgebung nutzt zur Berechnung der benötigten Zeit der Bewegung eine Berechnungsfunktion, die einen der beiden Fälle „Beschleunigung und Bremsen“ und „Beschleunigung, Konstante Geschwindigkeit, Bremsen“ ermittelt und das Ergebnis ausgibt. Mit Hilfe der Visualisierung und tabellarischen Ausgabe von Fahrtzeiten sind auch hier Verifikationen und Validierungen vorgenommen worden.

Letztlich handelt es sich um eine Programmierung mit Variablen, dem Zugriff auf die Systemzeit und der Nutzung der Ladeeinheiten mit der Möglichkeit, diesen Attributen zuzuordnen und sie in Listen zu speichern und abzurufen. Die Visualisierung ist aufgrund der Komplexität äußerst hilfreich während der Entwicklung<sup>18</sup>.

---

<sup>17</sup> Dieser Abschnitt ist in [52] veröffentlicht worden.

<sup>18</sup> Dieser Abschnitt ist auch im IGF-Forschungsbericht zum Forschungsprojekt „SmartShuttle“ enthalten, siehe [71].

#### 4.2.5 Eingangsgrößen

Die Eingangsgrößen sind in sechs Parameterkategorien eingeteilt, siehe Tabelle 10.

**Tabelle 10: Parameterkategorien**<sup>19</sup>

Bezeichnung	Inhalt
Lagerkonfiguration	Beinhaltet Informationen über die Art der Einsatzweise von Shuttle-Fahrzeugen und Hebern
Ganggeometrie	Beinhaltet Informationen über Statik und Regalbau des Shuttle-Systems und über die Kapazitäten von Hebern
Kinematik	Beinhaltet Informationen über die kinematischen Größen und Funktionszeiten von Shuttle-Fahrzeugen und Hebern
Artikelstruktur	Beinhaltet Informationen über Anzahl, Art der Zusammensetzung und Zugriffshäufigkeiten der von einem Shuttle-System zu lagernden und befördernden Artikel
Lagerstrategien	Beinhaltet Informationen über die in einem Shuttle-System angewendeten Lagerstrategien
Tagesauftragsstruktur	Beinhaltet Informationen über die Verteilung der in das Shuttle-System gelangenden Fahraufträge

#### 4.2.6 Modellbeschreibung

Die während eines Simulationslaufs ausgeführten Prozesse können in Kategorien eingeteilt werden<sup>20</sup>:

1. Datenbankbindung (Verarbeitung der Eingabegrößen)
2. Auftragsgenerator
3. Funktion
4. Shuttle-Fahrzeuge
5. Heber
6. Statistik (Berechnung und Verarbeitung der Ausgabegrößen)

Die Prozesse zur Datenbankbindung sorgen dafür, dass die in eine MS-Access Datenbank eingegebenen Parameter vom Simulationsprogramm eingelesen werden. Alternativ ist es auch möglich, die Daten über eine MS-Excel-Tabelle einzulesen. Ein Datensatz enthält alle Eingabedaten für einen durchzuführenden Simulationslauf und wird über SQL- (Structured Query Language) oder MS-Excel-Befehle eingelesen.

Die Prozesse des Auftragsgenerators bestimmen zufällig Artikelnummern zur Auslagerung. Entsprechend der parametrisierten Zugriffshäufigkeit werden Artikelnummern für Schnell- und Langsamdreher (Zone 1 und Zone 2) generiert. Für Modellvarianten mit größerer Zo-

<sup>19</sup> Diese Tabelle ist ähnlicher Form im IGF-Forschungsbericht zum Forschungsprojekt „SmartShuttle“ enthalten, siehe [71].

<sup>20</sup> Die Inhalte dieses Abschnitts sind im Schlussbericht des Forschungsprojekts „SmartShuttle“ [71] in ähnlicher Form veröffentlicht worden.

nenanzahl werden Artikelnummern für die jeweilige Zone erzeugt. Die Prozesse der Shuttle-Fahrzeugen sorgen dafür, dass das richtige Shuttle-Fahrzeug für den jeweiligen Auftrag ausgewählt wird, und steuern alle Bewegungen der Shuttle-Fahrzeuge inkl. ihrer Lastaufnahmemittel. Die Prozesse des Hebers steuern alle Bewegungen des Hebers inkl. dessen Lastaufnahmemittel. Die Prozesse des Hebers und der Shuttle-Fahrzeuge beinhalten zudem eine Vielzahl an Regeln zur Auftragsbearbeitung und Blockadevermeidung, z. B. „Jedes wartende Fördermittel wird durch einen Auftrag für eine Prüfung auf Annahmemöglichkeit eines eingehenden Auftrags aktiviert“, „Jede Ebene darf nur ein Shuttle-Fahrzeug enthalten“ oder „Jede Ebene muss mindestens zwei Lagerplätze für Umlagerungen freihalten“. Diese Regeln werden vor jeder relevanten Entscheidung überprüft. Die Prozesse zur Kategorie Statistik dienen der Erfassung und Aufbereitung von Kennzahlen. Die Kennzahlen (Ausgabegrößen) werden über SQL- oder MS-Excel-Befehle zurück in die Datenbank/MS-Excel-Datei geschrieben<sup>21</sup>.

Das Simulationsmodell kann die Lagerstrategien „Durchsatzbasierte Einlagerung“, „Reihenfolgesortierung der Aufträge“, „Lagerreorganisation“ und „Chaotische Einlagerung“ abbilden. Zur Berücksichtigung des Lagerfüllgrads wird die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ mit der Lagerstrategie „Einlagerung nahe E/A-Punkt“ kombiniert<sup>22</sup>. Dadurch werden für jede Zone die vorderen Lagerpositionen einer Ebene für Einlagerungen bevorzugt angesteuert.

---

<sup>21</sup> Die Beschreibungen der Prozesse sowie die zugehörigen Algorithmen sind im Schlussbericht des Forschungsprojekts „SmartShuttle“ [71] veröffentlicht worden.

<sup>22</sup> Die Lagerplätze können innerhalb einer Zone optional auch chaotisch belegt werden.

## 5 Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen

Die Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen erfolgt durch die Lagerstrategien „Durchsatzbasierte Einlagerung“ (Abschnitt 5.1), „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ (Abschnitt 5.2) und „Lagerreorganisation“ (Abschnitt 5.3).

### 5.1 Durchsatzbasierte Einlagerung

Die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ ordnet die Artikel anhand der Zugriffshäufigkeit Zonen zu. Deshalb wird diese Lagerstrategie auch als Zonierung bezeichnet. Zonierung ist allerdings der allgemeinere Begriff, denn eine Zonierung muss nicht zwingend anhand der Zugriffshäufigkeiten erfolgen, es können auch andere Kriterien für die Zuordnung maßgeblich sein, z. B. die Masse der Ladeinheit. Der Begriff Durchsatzbasierte Einlagerung bezeichnet also eine Art der Zonierung, die ausschließlich die Zugriffshäufigkeit als Maßstab zur Zuordnung nimmt. Die Anzahl der Zonen kann theoretisch so groß sein wie  $\min(\text{Anzahl Lagerplätze}, \text{Anzahl Artikel})$ , vorausgesetzt die in dieser Arbeit getroffene Annahme zur Modellierung *ein Artikel = eine Ladeinheit* trifft zu. Gespräche mit Herstellern von Shuttle-Systemen im Rahmen des Forschungsprojekts „SmartShuttle“ ergaben, dass ein Zwei-Zonen Lager favorisiert wird, das Ladeeinheiten in Schnell- und Langsamdreher unterteilt<sup>23</sup>. Mit steigender Zonenanzahl steigt die Komplexität im laufenden Betrieb. Der Wechsel der Zuordnung von Artikeln zu Zonen und die Leerplätze in vorderen Lagerbereichen nehmen zu. Um die Leerplätze zu reduzieren, sind Ausnahmeregeln erforderlich, wie z. B. die Zone nur ab einem erreichten Zonen-Füllgrad von neunzig % für Artikel mit anderer Zonenzuordnung zu sperren.

Eine Zonierung kann dazu führen, dass

- die Fahrtzeiten der Heber oder
- die Fahrtzeiten der Shuttle-Fahrzeuge oder
- die Fahrtzeiten der Heber und der Shuttle-Fahrzeuge

optimiert werden.

---

<sup>23</sup> Die Hersteller von Shuttle-Systemen, die beim Forschungsprojekt „SmartShuttle“ mitwirkten und die Favorisierung eines Zwei-Zonen-Lagers in Gesprächen mitteilten, sind: Gebhardt-Fördertechnik GmbH, MLOG Logistics GmbH, Vanderlande Industries B.V. und Viastore SYSTEMS GmbH. Die Gespräche fanden telefonisch und im Rahmen der Treffen des projektbegleitenden Ausschusses statt, diese fanden am 12.07.2017, 30.01.2018, 26.09.2018 und 11.07.2019 statt. Zu jedem Termin wurden Protokolle bzw. Foliensätze mit Anmerkungen der Teilnehmer erstellt.

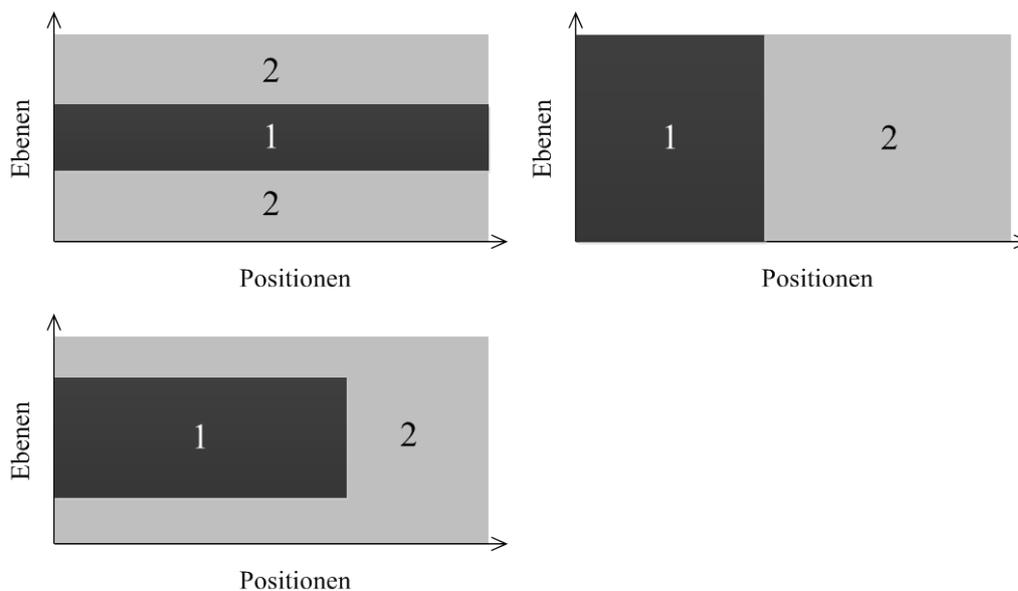
Die Optimierung der Fahrtzeiten durch die Bildung von Zonen sollte auch den Lagerfüllgrad berücksichtigen und daher eine entsprechende „Leerzone“ definieren. In diese Zone wird nicht eingelagert. Die Bildung einer „Leerzone“ ist mit dem analytischen Modell abbildbar, siehe Abschnitt 4.1.4. Denselben Effekt erzielt die Kombination der Lagerstrategien „Durchsatzbasierte Einlagerung“ und „Einlagerung nahe E/A-Punkt“, die im Simulationsmodell angewendet wird, siehe Abschnitt 4.2.6.

Zur Optimierung der Fahrtzeiten der Heber ist es erforderlich, die Anzahl der häufig anzusteuern Ebenen zu begrenzen und diese um den E/A-Punkt zu platzieren. Das kann auch als Reihenzonierung bezeichnet werden.

Zur Optimierung der Fahrtzeiten der Shuttle-Fahrzeuge ist es erforderlich, die Anzahl der häufig anzusteuern Positionen im Gang zu begrenzen und diese nahe des Ganganfangs zu platzieren. Das kann auch als Spaltenzonierung bezeichnet werden.

Zur Optimierung der Fahrtzeiten der Heber und der Shuttle-Fahrzeuge ist es erforderlich, eine Kombination aus den zuvor genannten Maßnahmen durchzuführen. Es werden dann sowohl die häufig anzusteuern Ebenen und die Lagerplätze begrenzt. Das kann auch als Rechteckzonierung bezeichnet werden (auch wenn nicht zwangsläufig ein exaktes Rechteck gebildet wird, der Begriff Rechteck dient zur Vereinfachung).

Abbildung 27 zeigt jeweils ein Beispiel für eine Reihen-, Spalten- und Rechteckzonierung mit zwei Zonen.



**Abbildung 27: Beispiel für Reihenzonierung (oben links), Spaltenzonierung (oben rechts), Rechteckzonierung (unten)**

Welche dieser Zonierungsmöglichkeiten für das individuelle Shuttle-System geeignet ist, wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Wenn die Heber den Engpass bilden, so ist eine Reihenzonierung geeignet. Wenn die Shuttle-Fahrzeuge den Engpass bilden, so ist eine Spaltenzonierung geeignet. Allerdings beeinflusst die Zonierung die Engpassbildung, durch die Zonierung kann eine Änderung des Engpasses eintreten. Wenn der Engpass sich durch die Zonierung verlagert, von Shuttle-Fahrzeugen auf Heber oder umgekehrt, so ist es ggf. erforderlich, Ebenen oder Lagerplätze zusätzlich zu begrenzen, um eine weitere Optimierung des Durchsatzes zu erzielen.

Die Suche nach einem Zonierungsoptimum ist ein iterativer Prozess. Dieser führt in vielen Fällen dazu, dass eine Rechteckzonierung das Optimum darstellt, oder genauer: Eine Lösung, die mit hoher Wahrscheinlichkeit eine geringe Abweichung zum wahren, unbekanntem, Optimum hat. Damit ist aber noch nicht beantwortet, „welches Rechteck“, oder allgemeiner „welche Anordnung“, die optimale Zonierung darstellt, d. h. welche Lagerplätze tatsächlich welcher Zone zugeordnet werden. Hierfür wurden Algorithmen entwickelt, ein „A-Priori-Algorithmus“ (Nutzung von Erfahrungswissen) und ein evolutionärer Algorithmus.

Die Algorithmus zur Implementierung einer Zonierung im Simulationsmodell wird im Anhang C.1 erläutert. Auf die Art der Optimierung der Zonierung des A-Priori-Algorithmus und die dazu erforderlichen Eingangsgrößen wie „Zugriffshäufigkeit der Artikel“ und „Anzahl zu reservierender Lagerplätze pro Zone“ wird in den Abschnitten 5.1.1.1 und 5.1.1.2 eingegangen. Der evolutionäre Algorithmus wird in Abschnitt 5.1.1.3 beschrieben.

#### 5.1.1 Algorithmen zur Ermittlung der optimalen Zonierung

Im Folgenden werden zwei Algorithmen zur Findung einer optimalen Zonierung gezeigt. Genauer: Der Durchsatz bei Anwendung der durch die Algorithmen gefundenen Zonierung weist mit hoher Wahrscheinlichkeit eine geringe Abweichung zum Durchsatz bei Anwendung der optimalen, unbekanntem, Zone auf.

##### 5.1.1.1 Ermittlung der Eingangsgrößen

Der Parameter „Anzahl Zonen“ ist beliebig wählbar, für eine industriepraktische Anwendung ist die Wahl von zwei oder maximal drei Zonen als erster Schritt die empfohlene Variante. Je mehr Zonen abgebildet werden, desto größer ist tendenziell die Anzahl der leerstehenden Lagerplätze in vorderen Bereichen. Wenn jeder Lagerplatz einer Zone zugeordnet wird, und es keine Ausnahmeregeln gibt, so kann auf jedem Lagerplatz auch nur eine Ladeinheit mit derselben Zonenzuordnung eingelagert werden. Bei unterschiedlichen (schwankenden) La-

gerfüllgraden je Zone können so leere Plätze entstehen. Neue einzulagernde Ladeeinheiten müssen dann ggf. längere Wege zurücklegen, um in einen „erlaubten“ Lagerplatz eingelagert werden zu können. Die Leerstände können vermieden werden, wenn Ausnahmeregeln in die Steuerung programmiert werden, z. B. ab einem Lagerfüllgrad von kleiner als neunzig % innerhalb einer Zone wird erlaubt, jeden freien Platz der Zone mit einer beliebigen Ladeeinheit zu füllen. Dadurch sind die Zonen aber nicht mehr vollständig voneinander getrennt, es entsteht ein „Unschärfefaktor“, der anhand des Verhältnisses der „richtig“ und „falsch“ eingelagerten Ladeeinheiten einer Zone und auch insgesamt für das Lager bestimmt werden kann.

Die Vermeidung von zu großen Leerständen wirkt sich dabei vorteilhaft auf die zurückzulegenden Wegstrecken aus. Die Untersuchung, ab welchen Füllgraden innerhalb einer Zone eine Einlagerung beliebiger Ladeeinheiten erlaubt werden sollte, d. h. bis zu welchem „Unschärfefaktor“ der Durchsatz positiv beeinflusst wird, ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, könnte jedoch für zukünftige Arbeiten erforscht werden.

Der Parameter „Anzahl Lagerplätze pro Zone“ kann über die mittlere Anzahl an genutzten Lagerplätzen der Ladeeinheiten im Lager ermittelt werden. Das bedeutet, aus Vergangenheits- oder Prognosedaten wird die Anzahl voraussichtlich benötigter Plätze für eine Ladeeinheit ermittelt. Die Summe der benötigten Plätze für alle Ladeeinheiten der Zone stellt den Parameterwert „Anzahl Lagerplätze pro Zone“ dar. Zu beantworten ist dazu noch die Frage: Welche Ladeeinheit wird welcher Zone zugeordnet? Die Artikel werden dazu nach ihrer Zugriffshäufigkeit des Analysezeitraums (Vergangenheits- oder Prognosedaten) absteigend sortiert in eine Liste eingetragen. Dann wird entsprechend der gewünschten Zugriffshäufigkeit der Zone solange absteigend jeder Artikel der Zone zugeordnet, bis die Zugriffshäufigkeit der Zone erreicht ist (bzw. mit dem nächsten Artikel in der Liste überschritten würde)<sup>24</sup>. Anschließend werden die weiteren Artikel der nächsten Zone nach demselben Vorgehen zugeordnet, usw. Der beschriebene Vorgang kann durch Algorithmen vollständig automati-

---

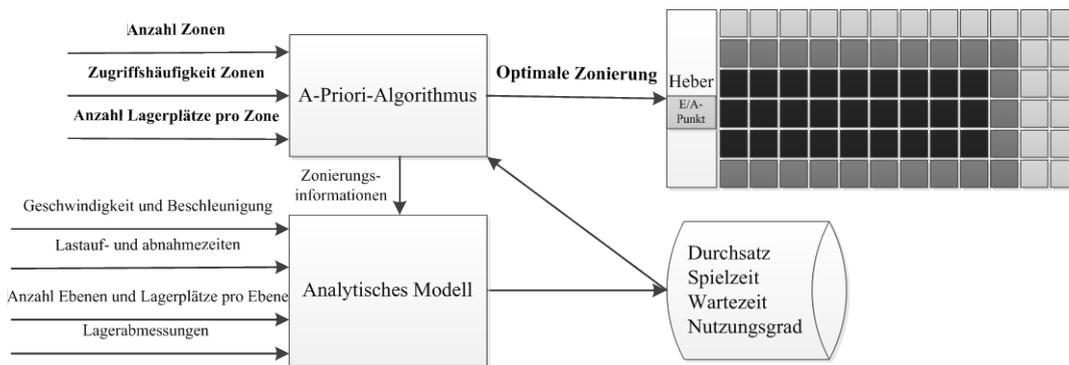
<sup>24</sup> Beispiel: Die gewünschte Zugriffshäufigkeit der ersten Zone (Zone 1) beträgt 60 %. Der erste Artikel auf der Liste hat eine Zugriffshäufigkeit von 30 %. Nach der Zuordnung des ersten Artikels der Liste zu Zone 1 beträgt die Zugriffshäufigkeit der Zone 1 = 60 %. Der zweite Artikel auf der Liste hat eine Zugriffshäufigkeit von 20 %. Nach der Zuordnung des zweiten Artikels der Liste zu Zone 1 beträgt die Zugriffshäufigkeit der Zone 1 = 30 % + 20 % = 50 %. Der dritte Artikel hat eine Zugriffshäufigkeit von 9,8 %. Nach der Zuordnung des dritten Artikels der Liste zu Zone 1 beträgt die Zugriffshäufigkeit der Zone 1 = 50 % + 9,8 % = 59,8 %. Der vierte Artikel hat eine Zugriffshäufigkeit von 5 %. Dieser Artikel wird nicht mehr Zone 1 zugeordnet, da sonst die gewünschte Zugriffshäufigkeit überschritten würde. Dieser Artikel wird der zweiten (Zone 2) Zone zugeordnet. Nach der Zuordnung des vierten Artikels der Liste zu Zone 2 beträgt die Zugriffshäufigkeit der Zone 2 = 5 %. Der Vorgang wiederholt sich, wenn die gewünschte Zugriffshäufigkeit der zweiten Zone erreicht ist, wird der nachfolgende Artikel der dritten Zone zugeordnet. Der Vorgang wird beendet wenn alle Artikel einer Zone zugeordnet sind.

siert werden. Die mittlere Anzahl an genutzten Lagerplätzen stellt hierbei nur eine Variante zur Ermittlung der benötigten Lagerplätze dar. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, statt der mittleren Anzahl genutzter Lagerplätze den Median der genutzten Lagerplätze zu verwenden, oder, bei starken zeitlichen Schwankungen, einen Wert oberhalb oder unterhalb des Mittelwerts oder des Medians zu wählen, z. B. auf Basis der Analyse weiterer Statistiken oder weiterem Erfahrungswissen. Ein Wert oberhalb des Mittelwerts oder des Medians führt dazu, dass eine höhere Wahrscheinlichkeit vorhanden ist, dass eine einzulagernde Ladeeinheit auch einen freien Lagerplatz in der zugeordneten Zone vorfindet. Ein Wert unterhalb des Mittelwerts oder Medians führt dazu, dass die soeben beschriebene Wahrscheinlichkeit geringer ist. Bei der Implementierung von Ausnahmeregeln führt ein höherer Wert zu einem geringeren „Unschärfefaktor“, ein niedriger Wert zu einem höheren „Unschärfefaktor“ in der Zone.

Der Parameter „Zugriffshäufigkeit Zonen“ kann frei gewählt werden, je nachdem wie er gewählt wird, wirkt er sich auf die Größe der Zone aus. Eine Zugriffshäufigkeit von achtzig % für Zone eins umfasst beispielsweise mehr Artikel, und daher mehr Lagerplätze, als eine Zugriffshäufigkeit von sechzig % für Zone eins. Je nachdem, wie der Parameter „Anzahl Zonen“ gewählt wird, werden die Parameterwerte daran angepasst gewählt: Bei zwei Zonen z. B. 80, 20 oder 70, 30 %, bei drei Zonen 60, 30, 10 % oder bei vier Zonen 50, 30, 15, 5 %.

#### 5.1.1.2 A-Priori-Algorithmus

Der A-Priori-Algorithmus basiert auf der Logik bzgl. der Engpassbildung der Heber und Shuttle-Fahrzeuge. Der Algorithmus benötigt zur Anwendung das analytische Modell zur Ermittlung des Durchsatzes, siehe Abschnitt 4.1. Abbildung 28 zeigt vereinfacht die Eingangsgrößen des Algorithmus und des analytischen Modells sowie das Zusammenwirken des Algorithmus mit dem analytischen Modell. Der A-Priori-Algorithmus erhält die Eingangsgrößen, definiert eine Zonierung und übergibt diese Zonierungsinformation an das analytische Modell. Dieses ermittelt die Ausgangsgrößen. Der A-Priori-Algorithmus erhält die Ausgangsgrößen und verwendet diese zur Bewertung der Zonierung. Anschließend definiert der A-Priori-Algorithmus eine neue Zonierung, der Prozess wiederholt sich. Mit Beendigung des A-Priori-Algorithmus wird die optimale Zonierung ausgegeben.



**Abbildung 28: Zusammenwirken A-Priori-Algorithmus und analytisches Modell**

Im Folgenden wird begründet, warum der Algorithmus zu einer Zonenbildung führt, die zu einer Steigerung des Durchsatzes führt, und warum diese Art der Zonenbildung mit hoher Wahrscheinlichkeit eine geringe Abweichung zum unbekanntem Durchsatzoptimum aufweist. Die Begründung bezieht sich auf die Annahmen, die das analytische Modell (oder optional das Simulationsmodell) vorgibt. Anders formuliert: Der Bezug auf ein unbekanntes Optimum wird auf das analytische Modell vorgenommen. Es gibt definitiv eine Zonenbildung, die bei Anwendung des analytischen Modells zum höchstmöglichen Durchsatz führt. Diese Zonenbildung ist unbekannt.

Im Folgenden wird zur besseren Lesbarkeit ausschließlich vom analytischen Modell gesprochen, obwohl die Ausgangsgrößen, die der Algorithmus zur Bewertung benötigt, auch simulativ ermittelt werden können. Dann wird allerdings eine längere Rechenzeit benötigt.

Die Aussage ist: Der Algorithmus findet eine Zonenbildung, die mit hoher Wahrscheinlichkeit nur geringfügig von diesem optimalen unbekanntem Durchsatz abweicht. Dabei ist zu beachten, dass sich diese Begründung immer auf das angewendete Modell und seine Annahmen bezieht. Das heißt, es wird nicht die Aussage getroffen, dass eine durch den Algorithmus gefundene Zonenbildung auch bei einem realen Shuttle-System eine geringe Abweichung zum unbekanntem Durchsatzoptimum aufweist. Wenn die Eingangsgrößen durch Vergangenheits- oder Prognosedaten sorgfältig ermittelt wurden und die Annahmen des analytischen/simulativen Modells zu großen Teilen dem realen System entsprechen, kann allerdings mit hoher Wahrscheinlichkeit erwartet werden, dass die reale Steigerung des Durchsatzes mit geringer Abweichung dem Ergebnis des analytischen/simulativen Modells entspricht. Je eher die Annahmen abweichen, desto unschärfer wird das Ergebnis. Eine Steigerung des Durchsatzes im Vergleich zur chaotischen Einlagerung wird aber auch bei abweichenden Annahmen in vielen Fällen erzielt.

Der Algorithmus basiert auf der Engpassbildung zwischen Shuttle-Fahrzeugen und Hebern. Wenn alle Shuttle-Fahrzeuge eines Gangs einen höheren theoretischen Durchsatz haben als der Heber, so ist dieser der Engpass des Systems.

Der Durchsatz des Shuttle-Systems steigt, wenn der Durchsatz des Hebers erhöht wird. Der Durchsatz des Hebers kann durch eine Fahrzeitminimierung erhöht werden. Eine Fahrzeitminimierung kann durch eine Reduzierung der Fahrwege vorgenommen werden. Eine Reduzierung der Fahrwege kann durch ein häufigeres Ansteuern der Ebenen nahe des E/A-Punkts und ein selteneres Ansteuern der weiter entfernten Ebenen erfolgen.

Wenn eine solche Reduzierung des Fahrwegs erfolgt, so erzeugen die Shuttle-Fahrzeuge in den selten angesteuerten Ebenen einen geringeren Durchsatz. Der erzeugte Durchsatz konzentriert sich, entsprechend den Zugriffshäufigkeiten, hauptsächlich in den stark frequentierten Ebenen. Daher ist ein Vergleich jeder Ebene erforderlich, um zu ermitteln, welcher theoretische Durchsatz welches Fördermittels in dieser Ebene höher ist, siehe Abschnitt 10.3. Die Anwendung von Warteschlangenmodellen zur Ermittlung des erreichbaren Durchsatzes in jeder Ebene ist ebenfalls möglich, siehe Abschnitt 4.1.3.4.

Wenn das Ergebnis des Vergleichs ist, dass der Heber nach der Anwendung der Zonierung von den Shuttle-Fahrzeugen vollständig ausgelastet werden kann, dann tritt eine Durchsatzsteigerung des Systems ein. Diese kann möglicherweise noch weiter optimiert werden, indem die Ebenenanzahl, die stark frequentiert wird, weiter eingrenzt wird.

Wenn dieser Vorgang weiter gedacht wird, so müsste das Optimum des Hebers dann erreicht werden, wenn nur noch die dem E/A-Punkt am nächsten gelegene Ebene angesteuert würde und alle anderen Ebenen nicht mehr. Das Optimum des Hebers würde dadurch tatsächlich erreicht werden, bei Annahme der vollständigen Auslastung durch das Shuttle-Fahrzeug. Diese Art der Zonenbildung ist in der Realität nicht anwendbar: Dann wären nur noch die Lagerplätze in dieser Ebene verfügbar. Anders formuliert: Das ganze Lager, mit Ausnahme der einen Ebene, würde dann nicht benötigt. Die Lagerplätze des Lagers werden aber benötigt, daher kann diese Zonenbildung nicht angewendet werden. Weiterhin wäre der Heber dann nur von einem Shuttle-Fahrzeug abhängig. Da dieses längere Wege zurücklegt, kann es den Heber nicht vollständig auslasten. Das bedeutet, dass der Durchsatz des Shuttle-Systems geringer wäre, als bei einer der vorherigen Iterationen. Die optimale Lösung muss also zwischen der Möglichkeit „Ebenensteuerung für jede Ebene gleichverteilt“ und „Ansteuerung ausschließlich der nächstliegenden Ebene“ liegen.

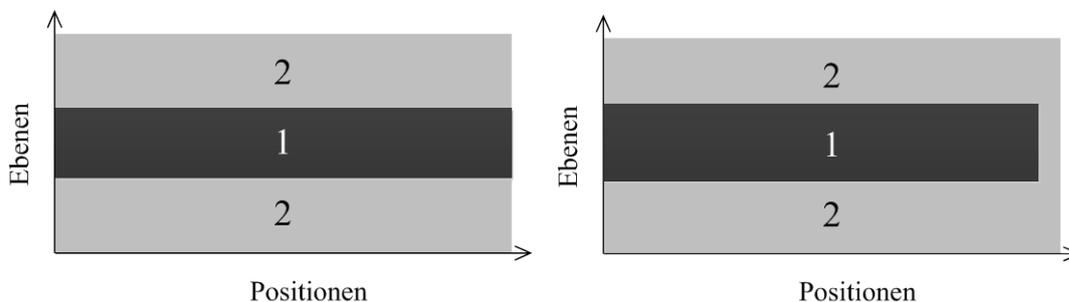
Zur Findung der optimalen Zonenbildung reduziert der Algorithmus im ersten Schritt die Ebenen und füllt die Ebenen mit Zone eins vollständig aus. Es werden Ebenen mit Lager-

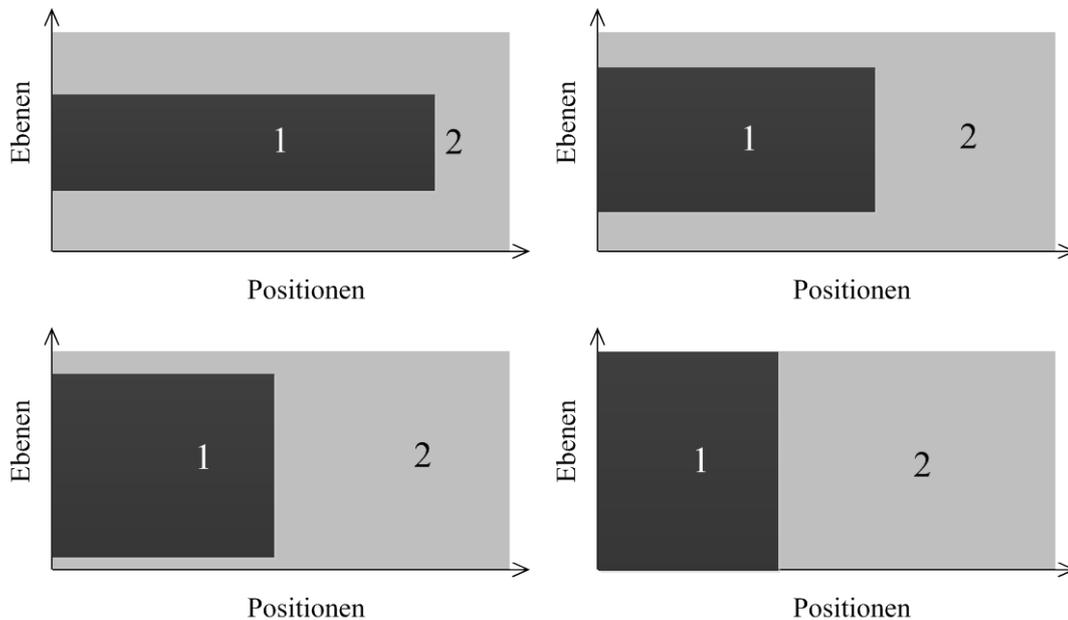
plätzen der Zone eins befüllt, bis die befüllte Anzahl an Lagerplätzen dem Wert des Parameters „Anzahl Lagerplätze pro Zone“ entsprechen. Anschließend reduziert der Algorithmus die Lagerplätze der letzten Position, d. h. die letzte Position darf jetzt nicht mehr mit Zone eins befüllt werden. Das kann dazu führen, dass eine neue Ebene zur Befüllung der Zone eins freigegeben werden muss, da sonst nicht genügend Lagerplätze zur Verfügung stehen.

Zusammengefasst bedeutet das, dass der Algorithmus die logischen Zusammenhänge zur Reduzierung der Fahrwege nutzt und die Zonenbildung iterativ von einer Reihenzonierung zu einer Spaltenzonierung führt. Die meisten dieser Iterationen sind Rechteckzonierungen, die „Randvarianten“ sind Reihen- oder Spaltenzonierungen. Jede Variante wird bewertet, diejenige mit dem höchsten Durchsatz wird ausgegeben.

Die Logik des Algorithmus wurde für den Fall gezeigt, dass der Heber der Engpass ist. Die Logik lässt sich aber genauso begründen, wenn die Shuttle-Fahrzeuge den Engpass darstellen. Dann müssen die Fahrtwege der Shuttle-Fahrzeuge reduziert werden. Das wird durch den Algorithmus realisiert, indem nach einer erfolgten Reihenzonierung schrittweise die Positionen vom Gange bis zum Ganganfang (nur so weit, wie es die Eingangsgrößen erlauben) nicht mehr mit Zone eins belegt werden dürfen.

Der Algorithmus führt alle ihm möglichen Iterationsschritte aus, und überprüft für jede Zonenbildung den erreichbaren Durchsatz. Abbildung 29 zeigt die Veränderung der Zonenbildung mit zwei Zonen vereinfacht und gekürzt (Zwischenschritte werden ausgelassen). Zunächst wird eine Reihenzonierung definiert. Die Positionen der Zone 1 werden schrittweise reduziert, dafür nehmen die Ebenen der Zone 1 zu. Die letzte Zonierungsvariante lässt alle Ebenen zu (Spaltenzonierung). Der Pseudocode des Algorithmus befindet sich im Anhang C.2.





**Abbildung 29: Veränderung der Zonenbildung durch den Algorithmus, Reihenfolge der Iterationen: Von oben links nach oben rechts, dann von Mitte links nach Mitte rechts, dann von unten links nach unten rechts**

#### 5.1.1.3 Evolutionärer Algorithmus

Evolutionäre Algorithmen sind Meta-Heuristiken, die biologische Evolutionsprinzipien nachahmen. Sie können auf beliebige Problemstellungen angewendet werden. Evolutionäre Algorithmen nähern sich an die optimale Lösung an, erreichen diese aber im Normalfall nicht. Genauer: Es kann meist nicht geprüft werden (oder nur mit sehr viel Aufwand), ob die gefundene Lösung die optimale Lösung darstellt. Es kann daher auch nicht geprüft werden, wie groß der Abstand der gefundenen Lösung von der optimalen Lösung ist. Zur Findung einer optimalen Zonenbildung ist ein evolutionärer Algorithmus für das spezifische Anwendungsproblem angepasst worden. Der Einsatz eines evolutionären Algorithmus ist für diesen Anwendungsfall neu, es konnten dazu keine Veröffentlichungen gefunden werden.

In Abschnitt 5.1.1.3.1 erfolgt eine kurze Einführung in evolutionäre Algorithmen. Die Einführung beschränkt sich auf die in dieser Arbeit angewendeten Methoden. Bei weiterführendem Interesse an evolutionären Algorithmen sei auf die Literatur verwiesen, z. B. [75]. Abschnitt 5.1.1.3.2 beschreibt den Ablauf des Algorithmus.

#### 5.1.1.3.1 Evolutionäre Algorithmen

Der folgende Abschnitt orientiert sich an der in [75] gewählten Struktur zur Beschreibung und entnimmt einige grundlegende Inhalte. Manche Sachverhalte werden aber anders dargestellt, da sie für den Anwendungsfall dann einfacher verständlich sind.

Zur Lösung eines Optimierungsproblems gibt es viele Ansätze. Diese werden nach [75] in vier Kategorien eingeteilt. Diese Kategorien werden hier in ergänzter Form wiedergegeben.

- Analytische Lösung: Sehr effizient, aber sehr viel Vorwissen zur Problemlösung nötig.
- Vollständiges Durchsuchen des Parameterraums: Sehr ineffizient, nur bei kleinen Parameterräumen vorteilhaft.
- Nicht gesteuerte Zufallssuche: Der Parameterraum wird zufällig durchsucht, ineffizient.
- Gesteuerte Zufallssuche: Anwendbar, wenn die Funktionswerte (Lösungswerte der Bewertungsfunktion zu den variierten Parameterwerten des Parameterraums) ähnlicher Elemente des Parameterraums ebenfalls ähnlich sind.

Evolutionäre Algorithmen gehören zur Kategorie „gesteuerte Zufallssuche“ innerhalb eines Parameterraums. Das bedeutet, es wird mit Zufallsgeneratoren gearbeitet, aber auch mit Methoden, die „in die richtige Richtung“ steuern, mit dem Ziel, in einer endlichen Abfolge von Iterationen eine Lösung zu erhalten, die näherungsweise dem Optimum entspricht. Wie bereits erwähnt, kann das meist nicht geprüft werden.

Im in dieser Arbeit vorliegenden Fall kann die durch den evolutionären Algorithmus gefundene Lösung mit der des A-Priori-Algorithmus gefundenen Lösung verglichen werden. Bei guter Übereinstimmung der beiden Lösungen ist somit die Wahrscheinlichkeit, eine Lösung nahe dem Optimum gefunden zu haben, höher.

Im Folgenden werden Begriffe evolutionärer Algorithmen beschrieben, die für den entwickelten Algorithmus relevant sind. Die Begriffe kommen z. T. aus der Biologie, und werden entsprechend der hier erfolgten Informatik-Anwendung beschrieben. Bei jedem Begriff wird der Bezug zum in dieser Arbeit behandelten Problem hergestellt:

- Lösungskandidat: Eine Variante von Werten für Eingangsgrößen, die zu einer Lösung führt. Bezogen auf den Anwendungsfall, sind das die Parameterwerte, die der Algorithmus variiert. Der Algorithmus variiert die Zuordnung der Lagerplätze zu Zonen. Jede geänderte Zuordnung ist ein Lösungskandidat.

- Chromosom: Zeichenkette eines Lösungskandidaten. Ein Chromosom ist die Aneinanderreihung von einzelnen Feldern, denen ein Inhalt zugewiesen wird (ein Zeichen). Häufig wird nur ein Chromosom verwendet, dieses enthält die vollständige Information. Bezogen auf den Anwendungsfall, ist das Chromosom eine Aneinanderreihung von Feldern. Die Information, die das Chromosom enthält, definiert die Zuordnung der Lagerplätze zu Zonen.
- Gen: Ein Zeichen des Chromosoms. Das Chromosom repräsentiert die Zeichenkette, jedes Zeichen ist ein Gen. Bezogen auf den Anwendungsfall, ist ein Gen eine Teilinformation, die benötigt wird, um die Zuordnung der Lagerplätze zu Zonen vorzunehmen. Es werden alle Gene benötigt, um die Zuordnung der Lagerplätze zu den Zonen vollständig vorzunehmen.
- Allel: Ausprägung eines Gens, d. h. der Wert des Zeichens, das das Gen enthält (z. B. 1, 2, 3, ... usw.). Bezogen auf die Anwendung, stellt ein Allel einen Zeichenwert dar, der dazu beiträgt, die Zuordnung der Lagerplätze zu Zonen vorzunehmen.
- Phänotyp: Das äußere Erscheinungsbild eines Lösungskandidaten. Bezogen auf den Anwendungsfall ist das die Zuordnung der Zonen zu Lagerplätzen.
- Genotyp: Die genaue genetische Ausstattung des Lösungskandidaten (die Kodierung), also die Zeichenkette (Chromosom) und deren Inhalt (Gene mit Allelen).
- Population: Menge der erzeugten Lösungskandidaten.
- Generation: Eine Population zu einem bestimmten Zeitpunkt, oder genauer: Bei einer bestimmten Iteration des Algorithmus.
- Reproduktion: Erzeugen von neuen Chromosomen. Bezogen auf den Anwendungsfall, werden aus zwei Chromosomen zwei neue Chromosomen erzeugt, die dann andere Informationen enthalten.
- Fitness: Bewertung des Lösungskandidaten. Bezogen auf den Anwendungsfall, wird die Bewertung anhand des Durchsatzes des Shuttle-Systems mit der Zuordnung der Lagerplätze zu Zonen vorgenommen.
- Selektion: Auswahl der Lösungskandidaten der Population, die für die Reproduktion verwendet werden. Bezogen auf den Anwendungsfall, werden die Lösungskandidaten entsprechend der Fitness in Verbindung mit einer Auswahlmethode bestimmt.
- Mutation: Zufällige Variation der Allele von Genen an zufälligen Positionen eines Chromosoms. Bezogen auf den Anwendungsfall, kann die Anzahl zu mani-

pulierender Chromosomen einer Population und die Anzahl zu manipulierender Gene eines Chromosoms beliebig parametrisiert werden.

#### 5.1.1.3.2 Ablauf des Algorithmus

Folgende Schritte werden bei einem evolutionären Algorithmus durchlaufen:

1. Erzeugung einer Anfangspopulation mit einer definierten Menge an Lösungskandidaten. Im Anwendungsfall ist die Menge beliebig parametrisierbar.
2. Während Abbruchkriterium nicht erfüllt
  - a. Bewertung aller noch nicht bewerteten Lösungskandidaten der Population. Im Anwendungsfall geschieht das durch das analytische Modell (optional: Simulationsmodell), der erreichte Durchsatz ist die Fitness des Lösungskandidaten.
  - b. Selektion einzelner Lösungskandidaten. Anhand einer Auswahlmethode werden die Lösungskandidaten selektiert.
  - c. Reproduktion von Chromosomen. Die Chromosomen der selektierten Lösungskandidaten werden verwendet, um neue Chromosomen zu erzeugen. Die selektierten und die neuen Chromosomen bilden eine neue Population.
  - d. Mutation der Chromosomen der Lösungskandidaten der neuen Population.
  - e. Selektion einzelner Lösungskandidaten aus der bestehenden und der neuen Population. Diese bilden die Population der nächsten Iteration.
3. Ausgabe des besten Lösungskandidaten mit zugehöriger Information (Phänotyp, Genotyp, Fitness).

Der Pseudocode zum entwickelten evolutionären Algorithmus befindet sich im Anhang C.3.

## 5.2 Reihenfolgesortierung der Aufträge

Die in diesem Abschnitt behandelte Reihenfolgesortierung bezieht sich auf die Sortierung zur Optimierung des Durchsatzes durch die Reduzierung der Fahrtzeit des Hebers. Die Reihenfolgesortierung wird im Folgenden für ganggebundene und gang- und ebenengebundene Shuttle-Fahrzeuge beschrieben.

Wenn ein Fahrzeugheber ein Shuttle-Fahrzeug mit einer Ladeinheit zur Einlagerung in einer Ebene abgegeben hat, kann die Situation eintreten, dass in mehreren Ebenen beladene Shuttle-Fahrzeuge auf die Auslagerung warten. Der Fahrzeugheber wendet dann die Sortierregel „Wähle Auftrag mit der kürzesten Fahrtzeit“ zur Auswahl des nächsten Auftrages an. Dementsprechend ist die gebildete Auftragsreihenfolge nach dem Kriterium der Fahrtzeitoptimierung entstanden. Das erhöht meist den Durchsatz, kann aber für einzelne

Aufträge zu einer Erhöhung der Auftragsdurchlaufzeit führen, da sie ggf. länger als bei einer auftragsbezogenen Sequenz warten müssen.

Für Behälterheber, die Doppelspiele ausführen, wird dieselbe Sortierregel angewendet. Die Regel bezieht sich dabei auf Aufträge, die in erreichbaren Übergabepunkten auf die Auslagerung warten.

Wenn die Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung“ nicht angewendet werden kann, aufgrund von Prioritäten oder vorgegebenen Auftragsreihenfolgen, kann dieses Potential nicht ausgeschöpft werden. Das kann bei einem Fahrzeugheber dazu führen,

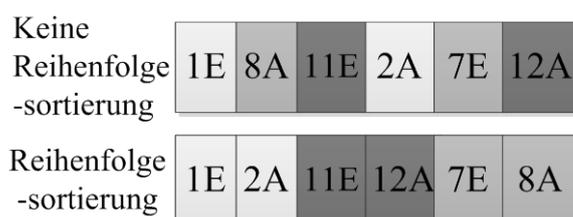
- dass ein Shuttle-Fahrzeug in einer Ebene abgegeben und dann gewartet wird, bis es mit einem Auslagerauftrag zurückkommt, oder
- dass der Heber ein Shuttle-Fahrzeug in einer Ebene zur Einlagerung abgibt und anschließend zu einer Ebene fährt, in der das Shuttle-Fahrzeug noch nicht am Ganganfang wartet.

Ersteres verursacht eine höhere Wartezeit, da der Heber ein vollständiges Spiel des Shuttle-Fahrzeugs abwarten muss.

Bei einem Behälterheber kann die Nicht-Anwendung zu ähnlichen Effekten führen, der Behälterheber kann dann mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit

- trotz mehrerer Ladeeinheiten auf Übergabepunkten zur Auslagerung nicht auslagern, da sich die als nächstes auszulagernde Ladeeinheit noch nicht auf einem Übergabepunkt befindet, oder
- bei mehreren Ladeeinheiten auf Übergabepunkten zur Auslagerung nicht die Ladeeinheit mit dem kürzesten Fahrweg wählen.

Abbildung 30 zeigt die Änderung der Auftragsreihenfolge für einen Behälterheber durch die Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ anhand eines Beispiels. Felder mit gleicher Graustufe symbolisieren Ebenen, die einen Ebenenabstand von eins zu jeder weiteren Ebene mit derselben Graustufe aufweisen. Die Zahl gibt die Ebene an, der Buchstabe die Auftragsart. 1E bedeutet „Einlagerauftrag in Ebene 1“, 2A bedeutet „Auslagerauftrag in Ebene 2“.



**Abbildung 30: Auftragsreihenfolge mit und ohne Reihenfolgesortierung (in Anlehnung an [51])**

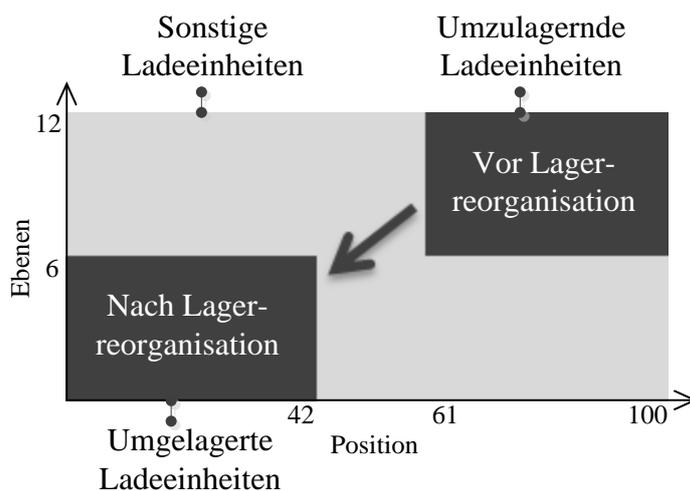
Der Pseudocode der Algorithmen zur Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ befindet sich im Anhang C.4.

### 5.3 Lagerreorganisation

Die Lagerstrategie Lagerreorganisation führt dazu, dass Ladeeinheiten innerhalb des Shuttle-Systems auf Basis von Kriterien umgelagert werden, siehe Abschnitt 2.4.2.3. Die in dieser Arbeit entwickelte Lagerreorganisation kann zur Anpassung einer geänderten Zonierung oder zur vorbereitenden Umlagerung auf Basis zukünftig bekannter Auslageraufträge eingesetzt werden.

Bei einer geänderten Zonierung ist die Aufgabe der Lagerreorganisation, die Ladeeinheiten, die sich nicht mehr in der zugeordneten Zone befinden, in die zugeordnete Zone umzulagern.

Bei der vorbereitenden Umlagerung auf Basis zukünftig bekannter Auslageraufträge ist die Aufgabe der Lagerreorganisation Ladeeinheiten, die zum nächsten Arbeitszyklus des Shuttle-Systems benötigt werden, an günstige Positionen umzulagern, um dadurch den Durchsatz zu erhöhen und die Auftragsdurchlaufzeit zu senken. Abbildung 31 zeigt ein Beispiel dazu.



**Abbildung 31: Positionsänderung der Ladeeinheiten durch Lagerreorganisation (in Anlehnung an [51])**

Der Prozessablauf des Hebbers in einem GEG-System ist folgender:

1. Prüfung, ob Ladeeinheit in Übergabeplätzen vorhanden.
2. Auswahl einer Ladeeinheit nach Kriterien (z. B. kürzeste Wegstrecke).
3. Umlagerung der Ladeeinheit zu einer erlaubten Ebene unter Beachtung von Kriterien.

Der Prozessablauf eines Shuttle-Fahrzeugs in einem GEG-System ist folgender:

1. Prüfung, ob Ladeeinheit zum Übergabeplatz ausgelagert werden kann.
2. Prüfung, ob Ladeeinheit von einem Übergabeplatz eingelagert werden kann.
3. Prüfung, ob Ladeeinheit innerhalb der Ebene umgelagert werden kann.
4. Ladeeinheit je nach Prüfungsergebnis aus-, ein- oder umlagern.

Der Prozessablauf eines Hebers in einem GG-System ist folgender:

1. Prüfung, ob Shuttle-Fahrzeug zur Umlagerung vorhanden ist.
2. Shuttle-Fahrzeug in andere Ebene umlagern.

Der Prozessablauf eines Shuttle-Fahrzeugs in einem GG-System ist folgender:

1. Prüfung, ob Ladeeinheiten innerhalb Ebene umgelagert werden können.
2. Prüfung, ob Ladeeinheiten zur Umlagerung verdeckt sind.
3. Prüfung, ob Ladeeinheiten in andere Ebene umgelagert werden müssen.
4. Umlagerung je nach Prüfergebnis durchführen.
5. Heber bei Bedarf für Ebenenwechsel anfordern.

Die Algorithmen sind für einfach- oder doppeltiefe GEG- und GG-Systeme anwendbar.

Bei einem GG-System wird durch die Parametrierung festgelegt, wie viele Langsamdreher-Ladeeinheiten in die Schnelldreher-Zone umgelagert werden sollen. Die tatsächlich umzulagernden Ladeeinheiten werden per Zufallsgenerator bestimmt. Die Zonen werden genauso definiert wie bei der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“.

Bei einem GEG-System wird bei der Initialbelegung festgelegt, wie viele Ladeeinheiten mit einer Zonenzuordnung, die nicht der Zone des Lagerplatzes entspricht, eingelagert werden. Der für die Einlagerung bestimmte Lagerplatz kann definiert werden, ebenso die Zonenzuordnung des Lagerplatzes und der Ladeeinheit.

Der Algorithmus führt nach der Initiierung solange Umlagerungen aus, bis jede Ladeeinheit sich an einem Lagerplatz befindet, der eine mit der Ladeeinheit übereinstimmende Zonenzuordnung aufweist. Die benötigte Zeit für die Umlagerungen wird erfasst und bei Beendigung des Algorithmus ausgegeben.

Die Algorithmen zur Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ befinden sich im Anhang C.5.

## 6 Validierung

Das folgende Kapitel orientiert sich in der Struktur und Textgestaltung an [21]<sup>25</sup>. Validierung ist die Prüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Original [8]. Es ist sicherzustellen, dass das Modell das Verhalten des realen Shuttle-Systems genau genug widerspiegelt. In dieser Arbeit wird das Verhalten des realen Systems anhand von Simulationsmodellen simuliert. Um das Modell mit dem Simulationsmodell zu validieren, ist zunächst das Simulationsmodell selbst zu validieren<sup>26</sup>. Das verwendete Simulationswerkzeug ermöglicht eine Visualisierung. Diese ist bei der Validierung von Vorteil, denn damit ist genau beobachtbar, ob das Simulationsmodell das gewünschte Verhalten zeigt.

Abschnitt 6.1 beschreibt die Validierung des Simulationsmodells und Abschnitt 6.2 die des analytischen Modells. Abschnitt 6.3 enthält die Zusammenfassung der Validierung.

### 6.1 Validierung Simulationsmodell

Die Validierung des Simulationsmodells bzgl. des Durchsatzes und damit zusammenhängender Kennzahlen erfolgte anhand mehrerer Methoden, die z. T. in der Literatur ausführlich beschrieben sind, u. a. in [8]:

1. Animation
2. Trace-Analyse
3. Expertenanalyse (intern und extern, Projektbegleitender Ausschuss)
4. Vergleich mit Ergebnissen der Literatur (VDI-2692 [2])
5. Vergleich mit Ergebnissen der Partnerunternehmen

Die Animation des Simulationsmodells ist mit der Simulationssoftware möglich und wurde während der Entwicklungszeit fortlaufend genutzt. Das bedeutet, das entwickelte Modell

---

<sup>25</sup> Es sei darauf hingewiesen, dass die gewählte Methode zur Validierung dieselbe wie in [21] ist, aber das zu validierende analytische Modell und das zur Validierung entwickelte Simulationsmodell sind neu. Es sind auch einige der gewählten Faktoren identisch zu [21], da dort ebenfalls Shuttle-Systeme untersucht wurden. Durch die Berücksichtigung von doppeltiefen Shuttle-Systemen gibt es zusätzlich den Faktor „Lagertiefe“, dafür entfallen die in [21] verwendeten Faktoren „Lagerstrategie“ und „Shuttle-Fahrzeuge“. Einige Textbestandteile des Kapitels 5 entsprechen aufgrund der Anwendung derselben Methode vollständig oder weitgehend dem Kapitel 4 in [21]. Auf eine gesonderte Zitierung jedes einzelnen Textbestandteils des Kapitels 5 wird verzichtet, daher steht dieser Hinweis zu Beginn des Kapitels.

<sup>26</sup> Vor der Validierung erfolgt die Verifikation, das ist die Kontrolle der erstellten Programmierung (sind Syntaxfehler/Logikfehler vorhanden?) [8]. Anschließend folgt die Validierung (bildet das Simulationsmodell die Realität den Anforderungen entsprechend ab?). In der Simulationspraxis erfolgt die Validierung meist mit allen Projektbeteiligten, u. a. mit dem Simulationsexperten und den Verantwortlichen für den simulierten Bereich oder der simulierten Anlage(n). Bezogen auf Simulationsmodelle ist die Verifikation und Validierung u. a. in [8, 73] beschrieben.

kann während eines Simulationslaufs visuell beobachtet werden. Fehlerhafte Abläufe konnten so leicht erkannt und behoben werden.

Die Trace-Analyse kam ebenfalls über die ganze Entwicklungszeit zum Einsatz. Die eingesetzte Simulationsoftware ermöglicht es, Objekte während des Simulationslaufs zu verfolgen und Daten aufzuzeichnen. Zur Sicherstellung der richtigen Arbeitsweise des Modells konnte die Trace-Analyse auch visuell durchgeführt werden. Die Objekte wurden visuell verfolgt, mit dreidimensionaler Ansicht. Beispielsweise konnten so Lastaufnahmevorgänge auf Korrektheit überprüft werden. Durch die auf Kennzahlen basierende und die visuelle Trace-Analyse können Fragen wie z. B.

- Wird die richtige Ladeinheit aufgenommen?
- Wird eine erforderliche Umlagerung richtig durchgeführt?
- Wird ein freier Lagerplatz gefunden und richtig belegt?
- Erfolgt die Heber-Shuttle-Übergabe richtig?
- Wird das Shuttle-Fahrzeug in der richtigen Ebene abgegeben?
- Werden Blockierregeln eingehalten (reservierte Lagerplätze, reservierte Aufträge, ein Shuttle-Fahrzeug pro Ebene, Kapazitäten der Fördermittel)?

beantwortet werden.

Wenn die Trace-Analysen zum Ende der Entwicklung die Richtigkeit der Prozesse bestätigen, können durch die Expertenanalyse möglicherweise weitere Fragen aufgeworfen werden. Beispielsweise, ob mit den Annahmen des Modells die Realität in ausreichendem Maße angenähert werden kann, ob die Ausgangsgrößen das Systemverhalten richtig beschreiben oder ob weitere erforderlich sind, welche Vereinfachungen ggf. notwendig sind, usw.

Die Expertenanalyse umfasste mehrere Simulationsexperten, die intern (Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart, Fakultät für Technische Prozesse, Hochschule Heilbronn) und extern (aus den Partnerunternehmen des Forschungsprojekts „SmartShuttle“) die Entwicklung des Simulationsmodells begleiteten<sup>27</sup>. Insbesondere die richtige Wahl der Eingangsgrößen und der Realitätsbezug des Modells wurde ausführlich diskutiert. Weiterhin war die detaillierte Visualisierung der Prozesse zum schnellen Verständnis und zur einfachen Fehlererkennung hilfreich.

---

<sup>27</sup> Die am Forschungsprojekt „SmartShuttle“ teilnehmenden Unternehmen und deren Ansprechpartner sind im zugehörigen Schlussbericht [71] genannt.

Der Vergleich mit Ergebnissen der Literatur ist anhand der VDI-Richtlinie 2692 [2] durchgeführt worden. Unter denselben Annahmen, wie sie in der Richtlinie beschrieben werden, erzielt das Simulationsmodell vergleichbare Ausgangswerte, siehe Anhang D.1. Das analytische Modell der VDI-Richtlinie 2692 selbst wurde ebenfalls über eine Simulation validiert, die Ergebnisse und das positive Fazit dieser Validierung sind veröffentlicht, siehe [76].

Der Vergleich mit Ergebnissen aus den Partnerunternehmen zeigte, dass die Ausgangswerte der Simulationsmodelle übereinstimmen<sup>28</sup>. Die Daten der Partnerunternehmen sind nicht für die Öffentlichkeit freigegeben. Durch die Zugänglichkeit der Webseite des Forschungsprojekts „SmartShuttle“ können auch zukünftig weitere Validierungen in einfacher Weise mit Echtdateien erfolgen.

Abschließend lässt sich zur Validierung des Simulationsmodells sagen, dass die wichtigste Komponente bei der Validierung die Visualisierungsmöglichkeit darstellte. Vor allem durch diese konnte die Vertrauenswürdigkeit des komplexen Modells hergestellt werden, da im Zweifelsfall jeder einzelne Prozess detailliert auf Richtigkeit überprüft werden konnte.

## **6.2 Validierung des analytischen Modells**

Zur Validierung des analytischen Modells wurden die in Abschnitt 4.2 beschriebenen Simulationsmodelle verwendet. Dabei wurden die Varianten gewählt, die dieselbe Annahme bzgl. der vorhandenen Aufträge wie das analytische Modell haben: Es stehen immer Aufträge zur Verfügung. Die Simulationsmodelle ermitteln daher ebenfalls den Grenzdurchsatz. Auch alle weiteren Annahmen im Simulationsmodell sind identisch zu den in Abschnitt 4.1.3.1 beschriebenen Modellannahmen des analytischen Modells, d. h. es werden

- Einzelspiele Heber und Einzelspiele Shuttle-Fahrzeuge,
- Einzelspiele Heber und Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge und
- Doppelspiele Heber und Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge

in einfach- und doppeltiefen Shuttle-Systemen abgebildet.

Das Abbruchkriterium wurde für die Simulationsläufe auf maximal 48 Stunden festgelegt. Bei schnellem Einschwingverhalten wurde die Simulationsdauer verkürzt. Das System ist

---

<sup>28</sup> Eine vollständige Übereinstimmung mit realen Daten und Simulationsdaten ist nicht zu erreichen, daher werden die Abweichungen anhand des Prozentwerts der Abweichung bewertet. Bei größeren Abweichungen wird nach systematischen Fehlern im Simulationsmodell gesucht. Bei Prozentwerten < 10 % wird die Übereinstimmung im Bereich der Shuttle-Systeme in vielen Veröffentlichungen als „gut“ bezeichnet, siehe auch Kapitel 3. Z. T. werden auch Abweichungen zwischen 10 % und 20 % noch als „gute“ Übereinstimmung bezeichnet, siehe u. a. [24].

eingeschwungen, wenn sich der Wert der Messvariablen innerhalb eines definierten Toleranzbereichs befindet und diesen innerhalb eines definierten Zeitraums (Simulationsdauer) nicht mehr verlässt. Das kann mit der eingesetzten Simulationssoftware über Kennlinien (zusätzlich zu den Kennzahlen) beobachtet werden.

Abbildung 32 zeigt ein Beispiel zur Beobachtung einer Kennzahl (es wird immer der gerade aktuelle Wert wiedergegeben, hier: 178,46) und Abbildung 33 zur Anzeige von Kennlinien (die Werte werden im Zeitverlauf als Liniendiagramm dargestellt) während des Simulationslaufs. In dieser Arbeit wurde der Simulationslauf abgebrochen, sobald sich der Durchsatz der Heber erkennbar nur noch in den Dezimalstellen änderte, und ein Wechsel der Ganzzahl ausgeschlossen werden konnte.

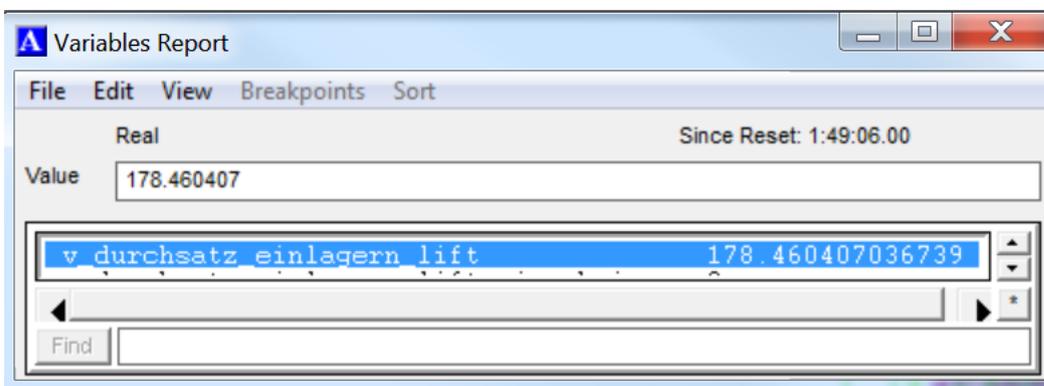


Abbildung 32: Beobachtung einer Kennzahl während des Simulationslaufs

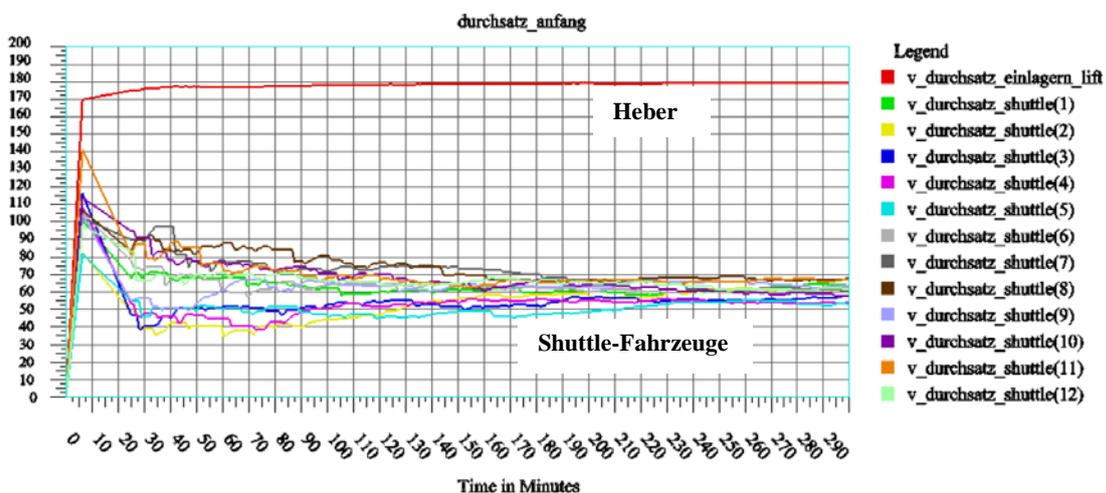


Abbildung 33: Kennlinien zum Durchsatz eines Hebers und der Shuttle-Fahrzeuge

Für die Heberdurchsätze wurde bei allen Varianten sehr schnell (zwischen drei und zehn simulierten Stunden) ein eingeschwungenes Verhalten erzielt, bei den Ausgangsgrößen der Shuttle-Fahrzeuge zeigte sich bei zonierten Shuttle-Systemen in diesem Zeitraum nicht im-

mer ein vollständig eingeschwungenes Verhalten, siehe Abbildung 33. Das liegt daran, dass eine Zonierung dazu führt, dass der Heber bestimmte Ebenen nur noch selten ansteuert. Die dort befindlichen Shuttle-Fahrzeuge führen dementsprechend weniger Spiele pro simulierte Zeiteinheit aus. Daher muss länger simuliert werden, bis sich beispielsweise die Mittelwerte des Durchsatzes oder der Spielzeit auf den annähernd wahren Mittelwert eingeschwungen haben. Das ist allerdings z. T. rechenintensiv. Da die Ausgangsgrößen voneinander abhängig sind, konnten in diesen Fällen die nicht eingeschwungenen Größen durch Umrechnung der eingeschwungenen Größen ermittelt werden. Beispielsweise ist der mittlere realisierte Durchsatz eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang der Durchsatz des Hebers des Gangs (oder der Heber, wenn mehr als ein Heber pro Gang eingesetzt wird), dividiert durch die Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge. Da der Durchsatz des Hebers ein eingeschwungenes Verhalten zeigt, entspricht auch der daraus berechnete Durchsatz eines Shuttle-Fahrzeugs dem annähernd wahren Mittelwert. Der so berechnete Durchsatz eines Shuttle-Fahrzeugs ist der Mittelwert auf Basis der mittleren Durchsätze aller Shuttle-Fahrzeuge. Ein einzelnes Shuttle-Fahrzeug kann durchaus einen anderen mittleren Durchsatz aufweisen, da die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ansteuerung bei einem zonierten Shuttle-System für einzelne Ebene unterschiedlich ist.

### 6.2.1 Fehlermaß

Zur Bewertung der Abweichung der Simulationsergebnisse von den Modellergebnissen wurde ein Fehlermaß definiert und in % angegeben. Das in dieser Arbeit definierte Fehlermaß ist eine Modifizierung der Berechnung des relativen Fehlers, der in Literaturwerken, u. a. [77], beschrieben wird. Der relative Fehler wird berechnet, indem ein exakter (bekannter) Wert von einem Näherungswert subtrahiert und anschließend das Ergebnis durch den exakten Wert geteilt wird. Der exakte Wert ist in dieser Arbeit der Wert, der durch das Simulationsmodell ermittelt wird. Der Näherungswert ist der Wert, der durch das analytische Modell ermittelt wird<sup>29</sup>.

Die Anpassung des verwendeten Fehlermaßes bezieht sich auf den Gewichtungsfaktor, der im Nenner multipliziert wird.

---

<sup>29</sup> Beispiel: Das analytische Modell und das Simulationsmodell ermitteln für eine vorgegebene Parameterkombination die Ausgangsgröße Durchsatz. Das analytische Modell ermittelt 490 LE/h (Näherungswert). Das Simulationsmodell ermittelt 500 LE/h (exakter Wert). Dann wird der relative Fehler wie folgt berechnet:  $(490 \text{ LE/h} - 500 \text{ LE/h}) / (500 \text{ LE/h}) = -10/500 = -1/50 = -0,02 = -2 \%$ . Das bedeutet, das analytische Modell weicht um -2 % vom exakten Wert ab. Das Vorzeichen beinhaltet die Information, ob der Näherungswert größer (positives Vorzeichen) oder kleiner (negatives Vorzeichen) als der exakte Wert ist.

$$F(\vartheta) = \begin{cases} \frac{M(\vartheta) - S(\vartheta)}{S(\vartheta)} * 100 \text{ für } \vartheta = \eta \\ \frac{M(\vartheta) - S(\vartheta)}{S(\vartheta) * G} * 100, \text{ sonst} \end{cases} \quad 6.1$$

Mit:

$S$ : Simulationswert

$M$ : Modellwert

$G$ : Gewichtungsfaktor

$\vartheta$ : Ausgangsgröße, z. B. Durchsatz, Spielzeit, Wartezeit, Auslastungsgrad

Das Fehlermaß nimmt einen positiven Wert bei einer Überbewertung an. Ein negativer Wert des Fehlermaßes zeigt eine Unterbewertung an. Eine Überbewertung tritt auf, wenn der vom analytischen Modell berechnete Wert größer als der gemessene Wert des Simulationsmodells ist. Eine Unterbewertung tritt im umgekehrten Fall auf.

Das Fehlermaß gewichtet kleinere Werte geringer. Das hat den Hintergrund, dass kleinere Werte als Basis dazu führen können, dass das Fehlermaß sehr große Werte annimmt, was aber keineswegs anzeigt, dass diese Abweichung von Relevanz ist. Beispielsweise würde eine vom Modell berechnete Wartezeit von 0,3 Sekunden und eine vom Simulationsmodell ermittelte Wartezeit von 0,01 Sekunden ohne Gewichtungsfaktor zu einem sehr hohen Fehlermaß führen. Die Berechnung von  $0,3 - 0,01$  ergibt 0,29 Abweichung von 0,01 als Basis. Das entspricht  $0,29/0,01 = 29 = 2900\%$  Abweichung. Diese Abweichung hat jedoch kaum eine Auswirkung auf die Modellgüte, da es sich um sehr kleine Werte handelt, die kaum ins Gewicht fallen in Relation zu weiteren Spielzeitanteilen wie die Lastaufnahmezeit oder die Fahrtzeit. Für die Berechnung des Fehlermaßes beim Auslastungsgrad ( $\eta$ ) findet der Gewichtungsfaktor keine Anwendung, da er bei Anwendung die Abweichungen für Werte unter 10 % zu gering berechnen würde.

Der Gewichtungsfaktor hat das Ziel, ein realistisches Fehlermaß zu ermitteln, das den tatsächlichen Einfluss des Fehlers auf das Shuttle-System wiedergibt.

Der Gewichtungsfaktor wird wie folgt definiert:

$$G = \begin{cases} 10^4 & \text{für } \frac{1}{10^3} \leq S < \frac{1}{10^2} \\ 10^3 & \text{für } \frac{1}{10^2} \leq S < \frac{1}{10} \\ 10^2 & \text{für } \frac{1}{10} \leq S < 1 \\ 10 & \text{für } 1 \leq S < 10 \\ 1, & \text{sonst} \end{cases} \quad 6.2$$

### 6.2.2 Versuchsplanung

Die Validierung überprüft das analytische Modell für relevante, d. h. praxisnahe, Bereiche des Parameterraums. Die Ausgangsgrößen des analytischen Modells werden mit denen des Simulationsmodells verglichen. Dafür sind Versuche mit einer Variierung der Parameterwerte notwendig. Das Aufstellen von Versuchsplänen ist ein Gebiet der statistischen Versuchsplanung. Ziel ist es dabei, Aussagen über das Verhalten eines realen Systems oder eines Modells zu gewinnen, bei Minimierung des Aufwandes durch die Versuche. Es wird daher versucht, die Anzahl der Versuche zu minimieren. In der Literatur gibt es umfangreiche Beschreibungen zur Vorgehensweise für unterschiedliche Zielsetzungen, u. a. in [78, 79].

In der statistischen Versuchsplanung wird bei Eingangsgrößen auf ein reales System oder ein Modell von Parametern gesprochen. Eingangsgrößen, die in den Versuchsplan eingehen, werden als Faktoren und die Variierung der Werte oder Ausprägungen dieser Faktoren als Stufen bezeichnet. Ein Faktor stellt daher bereits eine Auswahl dar. Häufig werden zwei oder dreistufige Versuchspläne erstellt. Ein Versuchsplan legt für jeden Faktor Stufen fest, d. h. Werte oder Ausprägungen, die der Faktor annehmen kann. Bei zwei Stufen kann der Faktor demnach zwei Werte annehmen, bei drei Stufen drei. Teilweise werden keine numerischen Werte verwendet, sondern Symbole wie +, -, ++, --, die eine andere Ausprägung des Faktors anzeigen [78, 79]. Ein Faktor „Lagerstrategie“ kann beispielsweise durch ein solches Symbol angegeben werden.

Ein vollfaktorieller Versuchsplan untersucht jede Stufenkombination der Faktoren. Je mehr Faktoren vorhanden sind, desto umfangreicher werden die Versuchspläne. Durch unterschiedliche Methoden besteht die Möglichkeit, die Versuchspläne zu minimieren. Angestrebt wird dabei den durch die Minimierung erzeugten Informationsverlust so gering wie möglich zu halten. Das führt zu teilfaktoriellen Versuchsplänen, dabei wird nicht mehr jede Stufe mit jeder Stufe kombiniert [78, 79].

Versuchspläne werden auch durch die Auswahl der Faktoren oder deren Zusammenfassung minimiert [78, 79]. So können mehrere Parameter zu einem Faktor zusammengefasst wer-

den, z. B. können die Parameter Anzahl Lagerplätze, Anzahl Ebenen, Abstand je Ebene und Abstand je Lagerplatz zu einem Faktor „Lagergröße“ zusammengefasst werden.

Die Auswirkung eines Faktors auf die Ausgangsgröße(n) wird als Effekt bezeichnet [78, 79]. Bei der Validierung sind Effekte (noch) nicht von Interesse, es werden lediglich die Ausgangsgrößen des Modells mit den simulierten Werten verglichen und deren Abweichung berechnet, um bewerten zu können, ob das Modell hinreichend genau ist. Die Ermittlung von Effekten ist relevant für Kapitel 7, bei der Anwendung der Modelle zur Ermittlung des Systemverhaltens. Dennoch führen die Versuchspläne „nebenbei“ dazu, dass Effekte ermittelt werden könnten.

#### 6.2.2.1 Faktorbildung

Für die Validierung des analytischen Modells werden teilfaktorielle Versuchspläne nach individuellen Kriterien festgelegt [78]. Die individuelle Kriterienfestlegung ist eine Methode, die dann angewendet wird, wenn die Anwendung es ermöglicht, Parameterwerte aus Erfahrungswissen festzulegen. Das bedeutet, der Versuchsplan wird für das aktuelle Experiment maßgeschneidert [78]. Es wurden praxisnahe Parameterwerte und sinnvolle Kombinationen festgelegt. Die Festlegung erfolgte aus Erfahrungswissen zu realen Anlagen, die z. B. durch die realen Shuttle-Systeme der Partnerunternehmen des Forschungsprojekts „SmartShuttle“ oder gängige Richtlinien [1, 80] bekannt sind. Die Faktoren für die Versuchspläne werden aus den vorhandenen Parametern zusammengefasst.

Tabelle 11 zeigt die Parameter und die daraus zusammengefassten Faktoren für die Versuchspläne. Jede Stufe eines Faktors wird aus der Kombination der einzelnen Parameterwerte gebildet.

**Tabelle 11: Parameter und Faktoren**

Parameter	Faktoren
Anzahl Ebenen	Lagergröße (L)
Abstand der Ebenen [m]	
Position E/A-Punkt [m]	
Zahl der Lagerpositionen pro Ebene	
Abstand der Lagerpositionen [m]	
Lagerfüllgrad [%]	
Geschwindigkeit Heber [m/s]	Schnelligkeit (SN)
Beschleunigung Heber [m/s <sup>2</sup> ]	
Zeit Lastaufnahme Heber [s]	
Positionier- und Schaltzeiten [s]	
Geschwindigkeit Shuttle-Fahrzeug [m/s]	
Beschleunigung Shuttle-Fahrzeug [m/s <sup>2</sup> ]	
Zeit Lastaufnahme [s]	Verteilung (V)
Positionier- und Schaltzeiten [s]	
Anzahl Zonen	

Lagerplätze je Zone	
Wahrscheinlichkeit Zonenansteuerung	
Zonenzuordnung zu Lagerplätzen	
Lagertiefe	Lagertiefe (LT)
Spielbildung Heber	Spielbildung (SP)
Spielbildung Shuttle-Fahrzeug	

Der Faktor Lagergröße vereint alle Parameter, die die Größe des Lagers und damit die zurückzulegenden Strecken für Heber und Shuttle-Fahrzeuge beeinflussen. Der Faktor Schnelligkeit fasst die Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte sowie die Lastaufnahme-, Schalt- und Positionierzeiten für Heber und Shuttle-Fahrzeuge zusammen. Der Faktor Verteilung wird aus den Zonierungsparametern gebildet. Der Faktor Lagertiefe gibt die Lagertiefe an. Der Faktor Spielbildung vereint die Spielbildung von Heber und Shuttle-Fahrzeug, es werden Einzel- oder Doppelspiele gebildet.

Die Stufen der einzelnen Faktoren wurden nach praxisrelevanten Werten ausgewählt, d. h. sie bilden Shuttle-Systeme ab, die mit ähnlichen Werten betrieben werden. Dabei wurden obere und untere Grenzen bei der Auswahl der Stufen definiert (und mittlere Werte bei drei Stufen), z. B. Lagergröße klein, mittel oder groß.

Tabelle 12 zeigt die Stufeneinstellung für den Faktor Lagergröße. Die variierten Parameterwerte sind grau markiert. Die Stufen bilden drei praxisrelevante Lagergrößen ab. Stufe 1 entspricht der VDI-2692 [1].

**Tabelle 12: Stufeneinstellung für den Faktor Lagergröße**

Faktor Lagergröße (L)	Stufe 1 („klein“)	Stufe 2 („mittel“)	Stufe 3 („groß“)
Symbol	-	o	+
Anzahl Ebenen	12	24	36
Abstand der Ebenen [m]	0,4	0,4	0,4
Position E/A-Punkt [m]	-1	-1	-1
Zahl der Lagerpositionen pro Ebene	100	125	150
Abstand der Lagerpositionen [m]	0,5	0,5	0,5
Lagerfüllgrad [%]	50	50	50

Tabelle 13 zeigt die Stufeneinstellung für den Faktor Schnelligkeit. Die variierten Parameterwerte sind grau markiert. Stufe 1 repräsentiert im Wesentlichen Shuttle-Systeme der ersten Generation. Derzeitig geplante/realisierte Shuttle-Systeme weisen häufig Werte zwischen den Stufen 2 und 3 auf.

**Tabelle 13: Stufeneinstellung für den Faktor Schnelligkeit, ET = Einfachtief, DT = Doppeltief**

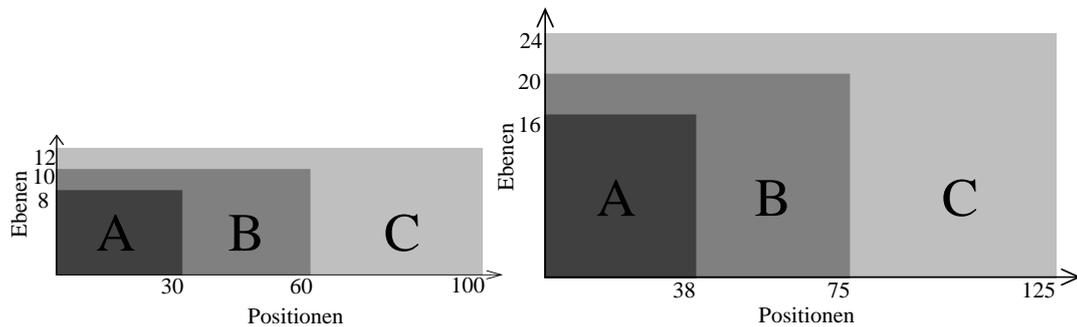
Faktor Schnelligkeit (SN)	Stufe 1 („langsam“)	Stufe 2 („mittel“)	Stufe 3 („schnell“)
Symbol	-	o	+
Geschwindigkeit Heber [m/s]	2	4	7
Beschleunigung Heber [m/s <sup>2</sup> ]	2,5	4	7

Zeit Lastaufnahme Heber [s]	8	4	2,5
Positionier- und Schaltzeiten [s]	0,5	0,5	0,5
Geschwindigkeit Shuttle-Fahrzeug [m/s]	2	3,5	6
Beschleunigung Shuttle-Fahrzeug [m/s <sup>2</sup> ]	2	3,5	6
Zeit Lastaufnahme [s]	4 (ET), 6 (DT)	3 (ET), 4,5 (DT)	2 (ET), 3 (DT)
Positionier- und Schaltzeiten [s]	0,5	0,5	0,5

Tabelle 14 zeigt die Stufeneinstellung für den Faktor Verteilung. Stufe 1 ist die Gleichverteilung und Stufe 2 eine an die jeweilige Lagergröße angepasste Zonierung mit drei Zonen. Abbildung 34 visualisiert die Definition der Stufeneinstellung der Stufe 2 sowie die dadurch gebildete Zonierung in Abhängigkeit der Stufeneinstellung des Faktors Lagergröße.

**Tabelle 14: Stufeneinstellung des Faktors Verteilung**

Faktor Verteilung (V)	Stufe 1 („Gleichverteilung“)	Stufe 2 („Einstellbare Verteilung“)
Symbol	-	o
Anzahl Zonen	1	3
Lagerplätze je Zone	Zone 1 = Alle vorhandenen Lagerplätze	Zone 1 = $\frac{3}{10} * (\text{Zahl der Lagerpositionen pro Ebene} * \frac{2}{3} * \text{Anzahl Ebenen} * 2)$ Zone 2 = $\frac{3}{5} * (\text{Zahl der Lagerpositionen pro Ebene} * \frac{5}{6} * \text{Anzahl Ebenen} * 2) - \text{Zone 1}$ Zone 3 = Alle Lagerplätze - Zone 1 - Zone 2
Wahrscheinlichkeit Zonenansteuerung	1	Zone 1 = 0,6 (60%) Zone 2 = 0,3 (30%) Zone 3 = 0,1 (20%)
Zonenzuordnung zu Lagerplätzen	Zone 1 = Jeder Lagerplatz	Zone 1 = Von Lagerposition 1 bis ( $\frac{3}{10} * \text{Zahl der Lagerpositionen pro Ebene}$ ) und von Ebene 1 bis ( $\frac{2}{3} * \text{Anzahl Ebenen}$ ), rechts- und linksseitig identische Zuordnung Zone 2 = Von Lagerposition 1 bis ( $\frac{3}{5} * \text{Zahl der Lagerpositionen pro Ebene}$ ) und von Ebene 1 bis ( $\frac{5}{6} * \text{Anzahl Ebenen}$ ), rechts- und linksseitig identische Zuordnung, für alle Lagerplätze die nicht Zone 1 zugeordnet werden Zone 3 = Von Lagerposition 1 bis letzte Lagerposition und von Ebene 1 bis letzte Ebene, rechts- und linksseitig identische Zuordnung, für alle Lagerplätze, die nicht Zone 1 oder Zone 2 zugeordnet werden



**Abbildung 34: Stufeneinstellung des Faktors Verteilung der Stufe 2 für die Lagergrößen der Stufe 1 (links) und Stufe 2 (rechts)**

Tabelle 15 zeigt die Stufeneinstellung des Faktors Lagertiefe. Stufe 1 bildet ein einfachtiefes Lager ab, Stufe 2 ein doppeltiefes.

**Tabelle 15: Stufeneinstellung des Faktors Lagertiefe**

Faktor Spielbildung (SP)	Stufe 1	Stufe 2
Symbol	-	o
Lagertiefe	Einfachtief	Doppeltief

Tabelle 16 zeigt die Stufeneinstellung des Faktors Spielbildung. Stufe 1 bildet Einzelspiele der Heber und der Shuttle-Fahrzeuge ab, Stufe 2 Doppelspiele und Stufe 3 Einzelspiele der Heber und Doppelspiele der Shuttle-Fahrzeuge.

**Tabelle 16: Stufeneinstellung des Faktors Spielbildung**

Faktor Spielbildung (SP)	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Symbol	-	o	+
Spielbildung Heber	Einzelspiele (Auslagerung)	Doppelspiele	Einzelspiele
Spielbildung Shuttle-Fahrzeug	Einzelspiele (Auslagerung)	Doppelspiele	Doppelspiele

#### 6.2.2.2 Auswahl und Ermittlung der Ausgangsgrößen

Die Ausgangsgrößen, d. h. die Ergebniswerte, die jeder Versuch eines Versuchsplanes liefert, sind der Durchsatz, die Spielzeit unter Berücksichtigung der Wartezeit, die Wartezeit und der Auslastungsgrad des Hebers und der Shuttle-Fahrzeuge. Diese wurden mit den Simulationsmodellen gemessen und mit dem analytischen Modell berechnet.

Besondere Relevanz hat der Durchsatz des Hebers, da der Heber die Schnittstelle zu angrenzenden Systemen ist, und damit der Durchsatz des Hebers dem Durchsatz des Shuttle-Systems entspricht (genauer: Der Durchsatz aller Heber im Shuttle-System entspricht dem Durchsatz des Shuttle-Systems, d. h. der Durchsatz eines Hebers wird multipliziert mit der Anzahl der Heber im Shuttle-System). Die Ausgangsgrößen, die sich auf die Shuttle-

Fahrzeuge beziehen, sind bzgl. der Bewertung des Modells von geringerer Bedeutung, da sie sich nicht auf das gesamte Shuttle-System beziehen und daher keine unmittelbare Auswirkung auf den Durchsatz des Shuttle-Systems haben. Anders formuliert: Wenn das Modellergebnis für den Durchsatz des Hebers mit sehr geringer Abweichung dem Simulationsergebnis entspricht, aber der Durchsatz eines Shuttle-Fahrzeugs hohe Abweichungen zwischen Modell- und Simulationsergebnis aufweist, so kann das Modell zur Unterstützung bei der Planung eines Shuttle-Systems angewendet werden, umgekehrt aber nicht oder nur stark eingeschränkt.

Für das analytische Modell werden je nach Stufenkombination die passenden Formeln angewendet, diese sind in Abschnitt 4.1 beschrieben. Beispielsweise wird für die Berechnung des Durchsatzes des Hebers unter Berücksichtigung der Wartezeit je nach Warteschlangenmodell die Formel  $D_{M/M/1/K,y}$  oder  $D_{M/M/s/K,y}$  verwendet, siehe Abschnitte 4.1.3.4.3 und 4.1.3.4.4. Alle Formeln wurden in ein Softwarewerkzeug programmiert (Software Matlab des Unternehmens MathWorks®). Über die Software Matlab wurden anschließend alle Berechnungen durchgeführt.

Mit dem Simulationsmodell wurden die Ausgangsgrößen gemessen, d. h. es wurden Algorithmen programmiert, die nach jedem Spiel des Hebers oder eines Shuttle-Fahrzeugs die dafür benötigte Zeit messen und die Anzahl der durchgeführten Spiele erhöhen. Nach jedem Spiel erfolgt die bereits genannte Mittelwertbildung, die Summe aller gemessenen Spiel- und Wartezeiten wird durch die Anzahl der durchgeführten Spiele dividiert.

### 6.2.2.3 Versuchsplan

Tabelle 17 zeigt den aufgestellten Versuchsplan und Tabelle 18 die zugehörige Legende. Die Ausgangsgrößen werden nicht dargestellt. Ziel dieses Versuchsplans ist es, möglichst praxisnahe Parameterkombinationen abzubilden. Insgesamt wurden 50 Versuche durchgeführt und die Ergebnisse des jeweiligen Simulationslaufs den Ergebnissen der analytischen Berechnung gegenübergestellt.

**Tabelle 17: Versuchsplan, ohne Darstellung der Ausgangsgrößen (Legende gemäß Tabelle 18)**

Nr.	L	SN	V	LT	SP	Nr.	L	SN	V	LT	SP	Nr.	L	SN	V	LT	SP
1	-	-	-	-	-	18	-	o	-	o	+	35	o	-	o	-	o
2	-	-	-	-	o	19	o	o	o	o	o	36	o	o	o	o	-
3	-	-	-	-	+	20	o	+	o	o	o	37	o	+	o	o	-
4	-	-	-	o	-	21	o	-	o	o	o	38	+	-	-	-	o
5	-	-	-	o	o	22	-	+	-	-	-	39	+	o	-	o	o
6	-	-	-	o	+	23	-	+	-	-	o	40	+	+	-	o	o
7	-	-	o	o	o	24	-	+	-	-	+	41	-	+	o	o	+
8	-	-	o	o	+	25	-	+	-	o	-	42	o	-	o	-	+

9	-	-	o	-	-	26	-	+	-	o	o	43	o	o	o	o	+
10	-	-	o	-	o	27	-	+	-	o	+	44	o	+	o	o	+
11	-	o	o	o	-	28	-	o	o	o	o	45	+	o	-	o	+
12	-	+	o	o	-	29	-	+	o	o	o	46	+	+	-	o	+
13	-	o	-	-	-	30	o	o	-	o	o	47	+	o	o	o	+
14	-	o	-	-	o	31	o	+	-	o	o	48	+	+	o	o	+
15	-	o	-	-	+	32	o	-	-	-	-	49	+	o	-	-	+
16	-	o	-	o	-	33	o	o	-	o	-	50	+	+	-	-	+
17	-	o	-	o	o	34	o	+	-	o	-						

**Tabelle 18: Legende zum Versuchsplan**

L	Faktor Lagergröße
SN	Faktor Schnelligkeit
V	Faktor Verteilung
LT	Faktor Lagertiefe
SP	Faktor Spielbildung
-	Stufe 1
o	Stufe 2
+	Stufe 3

Tabelle 19 zeigt einen Ausschnitt des Versuchsplans mit den Ausgangsgrößen und Tabelle 20 die zugehörige Legende. Der vollständige Versuchsplan ist im Anhang D.2 enthalten.

**Tabelle 19: Ausschnitt des Versuchsplans**

Nr.	Bez.	D		F	SZ		F	W		F	A		F
		MO	SI										
1	Li-WZ	180.58	180.04	0.30%	19.94	20.00	-0.30%	0.00	0.06	-0.10%	1.00	1.00	0.28%
	Sfa-WZ	30.10	30.01	0.30%	119.61	119.97	-0.30%	30.10	30.01	0.30%	119.61	119.97	-0.30%
	Li-W	179.92	180.04	-0.07%	20.01	20.00	0.07%	179.92	180.04	-0.07%	20.01	20.00	0.07%
	Sfa-W	29.99	30.01	-0.07%	120.05	119.97	0.07%	29.99	30.01	-0.07%	120.05	119.97	0.07%

**Tabelle 20: Legende zum Ausschnitt des Versuchsplans**

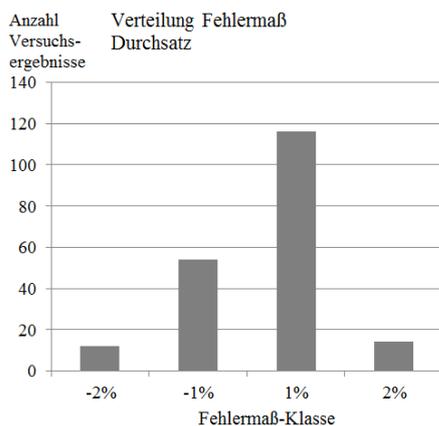
D	Durchsatz
SZ	Spielzeit
W	Wartezeit
A	Auslastungsgrad
SP	Faktor Spielbildung
MO	Analytischer Modellwert
SI	Simulierter Wert
F	Fehlermaß
Li-WZ	Heber Wartezeitmodell
Sfa-WZ	Shuttle-Fahrzeug Wartezeitmodell
Li-W	Heber Warteschlangenmodell 1 (M/M/1/K (Faktor SP, Stufen o und +) oder M/M/sK (Faktor SP, Stufe -))
Sfa-W	Shuttle-Fahrzeug Warteschlangenmodell (M/M/1/K (Faktor SP, Stufen o und +) oder M/M/sK (Faktor SP, Stufe -))

#### 6.2.2.4 Auswertung des Versuchsplans

Alle betrachteten Ausgangsgrößen zur Beschreibung des Systemverhaltens sind voneinander abhängig. Der realisierte Durchsatz des Shuttle-Systems ist das Verhältnis einer gewählten Zeiteinheit (hier: LE/h) und der benötigten Spielzeit unter Berücksichtigung der Wartezeit.

Der Auslastungsgrad ist das Verhältnis der Spielzeit ohne Wartezeit zur Spielzeit mit Wartezeit (= das Verhältnis des Durchsatzes unter Berücksichtigung der Wartezeit zum Durchsatz ohne Berücksichtigung der Wartezeit).

Für die im Folgenden beschriebenen Auswertungen wird für jeden Versuch das Fehlermaß des Durchsatzes des Hebers und der Shuttle-Fahrzeuge bei Anwendung des Wartezeit- sowie des Warteschlangenmodells verwendet. Abbildung 35 zeigt die Verteilung des Fehlermaßes für die Ausgangsgröße Durchsatz für alle Versuche des Versuchsplans. Es wurden Klassen mit der Klassenbreite 1 % gebildet. Die Klasse 1 % enthält alle Versuche mit einem Fehlermaß zwischen 0 – 1 %, die Klasse 2 % alle Versuche zwischen 1 – 2 %, usw. Es zeigt sich in den Versuchen insgesamt ein sehr geringes Fehlermaß, alle Werte liegen zwischen -2 % und 2 %, die meisten Versuchsergebnisse hatten ein Fehlermaß zwischen -1 % und 1 %. Das größte Fehlermaß beträgt beim Durchsatz 1,58 %.



**Abbildung 35: Verteilung Fehlermaß für die Ausgangsgröße Durchsatz, gesamter Versuchsplan**

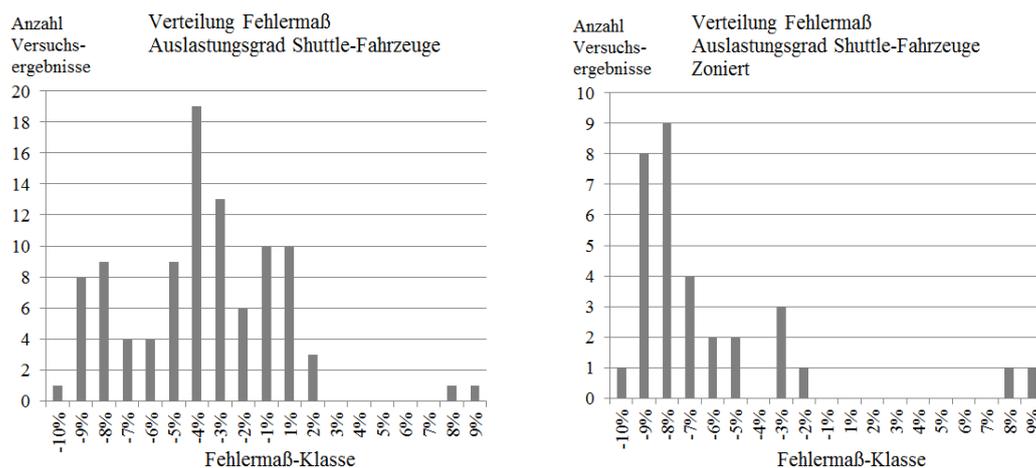
Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Fehlermaß bzgl. des Durchsatzes sehr gering ist. Eine weitere Systematisierung, z. B. die Suche nach systematischen Unter- oder Überbewertungen der Modelle, ist aufgrund des geringen Fehlermaßes für die Durchsatzergebnisse nicht erforderlich<sup>30</sup>.

<sup>30</sup> In den in Kapitel 3 analysierten Veröffentlichungen werden z. T. Abweichungen der analytischen Modelle zwischen 10 und 20 % noch als akzeptabel bezeichnet, wie auch in Abschnitt 6.1 genannt. Es wird von nutzbaren Modellen geschrieben, z. B. in [24]. Je genauer ein Modell, desto eher erreichen die aus den Ergebnissen der Modelle abgeleiteten Maßnahmen ihre erzielte Wirkung. Es kommt dabei auch auf den Anwendungsfall an. Wenn z. B. ein Shuttle-System auf das Optimierungspotential untersucht wird und die Abweichung des Modells zu einer Simulation beträgt um die 10 %, so kann der Anwender des Shuttle-Systems diese Ergebnisse mit einer Unsicherheit von 10 % verwenden. Der Anwender kann, um sich abzusichern, davon ausgehen, dass das Modell den optimierten Durchsatz um 10 % überbewertet. Dann zieht er diese 10 % davon ab. Das Modell ist damit immer noch nutzbar, der Anwender kann immer noch Schlussfolgerun-

Bei der Analyse des Auslastungsgrades der Shuttle-Fahrzeuge tritt z. T. ein größeres Fehlermaß auf. Hier kann eine Systematisierung zu weiteren Erkenntnissen führen. Abbildung 36 zeigt die Verteilung des Fehlermaßes der Shuttle-Fahrzeuge über alle Versuche und die Versuche mit einer Zonierung. Es ist eine tendenzielle Unterbewertung (mit Ausnahme des Versuchs Nr. 12, der die beiden Ergebnisse ganz rechts liefert) zu erkennen, d. h. der simulierte Auslastungsgrad ist meist leicht höher als der analytisch ermittelte. Der Auslastungsgrad ist das Verhältnis zwischen Spielzeit ohne Wartezeit und Spielzeit mit Wartezeit.

Die weitere Analyse der Ergebnisse zeigt, dass höhere Fehlermaße bei den Versuchen, die beim Faktor Verteilung die Stufe o aufweisen, zu finden sind. Der Faktor Verteilung mit der Stufe o bedeutet, dass eine Zonierung angewendet wird (Lagerstrategie Durchsatzbasierte Einlagerung). Es ist erkennbar, dass die meisten Versuche mit der Stufeneinstellung o beim Faktor Verteilung Fehlermaße zwischen -5 % und -10% aufweisen. Die weitere Analyse des Versuchsplan zeigt, dass einfachtiefe zonierte Shuttle-Systeme Fehlermaße zwischen -1 % und -4% aufweisen, d. h. die Unterbewertung des Auslastungsgrads trifft auf zonierte doppeltiefe Shuttle-Systeme stärker zu.

Weitere systematische Abweichungen sind aus dem Versuchsplan nicht zu erkennen. Das Modell neigt insgesamt zu einer leichten Unterbewertung zwischen 1 % - 4 %. Bei Anwendung des analytischen Modells für die doppeltiefe Shuttle-Systeme und die Lagerstrategie Durchsatzbasierte Einlagerung ist von einer höheren Unterbewertung des Auslastungsgrads auszugehen. Diese beträgt auf Basis der Versuchsergebnisse zwischen 5 – 10 %.



**Abbildung 36: Verteilung Fehlermaß über alle Versuche (links) und über die Versuche mit einer Zonierung (rechts), Auslastungsgrad Shuttle-Fahrzeuge**

gen daraus ziehen, die evtl. etwas vorsichtiger ausfallen. Bei geringerer Abweichung können die Schlussfolgerungen und zu treffenden Maßnahmen „weniger vorsichtig“ ausfallen.

### 6.3 Zusammenfassung der Validierung

Die Validierung des Simulationsmodells erfolgte durch verschiedene Methoden, wobei die Visualisierungsmöglichkeit jedes einzelnen Prozesses das wichtigste Werkzeug war. Die Trace-Analyse lieferte Kennzahlen, die die Vertrauenswürdigkeit in das Modell weiter bekräftigten. Die Begleitung durch Experten half u. a. bei der Orientierung der Entwicklung an reale Shuttle-Systeme.

Die Validierung des analytischen Modells erfolgte durch den Vergleich mit einem Simulationsmodell. Es wurde ein Versuchsplan aufgestellt, der das Ziel verfolgte, die analytisch modellierten Lagerkonfigurationen mit praxisrelevanter Lagerabmessung und Kinematik abzubilden. Es wurden folgende Faktoren definiert: Lagergröße, Schnelligkeit, Verteilung, Lagertiefe und Spielbildung. Diese vereinen jeweils einen Parametersatz. Für die Faktoren wurden entweder zwei oder drei Stufen definiert. Es wurde ein Versuchsplan mit 50 Versuchen gebildet. Die Ergebnisse zeigen, dass das analytische Modell mit maximal 2 % Abweichung bei der Ausgangsgröße Durchsatz ein sehr geringes Fehlermaß aufweist. Die Ermittlung der Wartezeiten zwischen Heber und Shuttle-Fahrzeugen wurden durch zwei unterschiedliche Modelle ermittelt, beide Modelle liefern annähernd dieselben Ergebnisse. Der Durchsatz wird mit sehr geringem Fehlermaß ermittelt, der Auslastungsgrad der Shuttle-Fahrzeuge wird bei der Kombination doppeltiefe und zonierte Shuttle-Systeme zwischen 5 – 10 % unterbewertet. Das analytische Modell, das einfach- und doppeltiefe Shuttle-Systeme und die Spielbildungen Einzelspiele Heber und Shuttle-Fahrzeuge, Doppelspiele Heber und Shuttle-Fahrzeuge sowie Einzelspiele Heber und Doppelspiele Shuttle-Fahrzeuge abbildet, kann auf Basis der Versuchsergebnisse mit der gezeigten geringen Abweichung zu den Simulationsergebnissen zur Anwendung und Erforschung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen als geeignet angenommen werden.

## 7 Anwendung und Auswertung

In diesem Kapitel werden das entwickelte analytische Modell und das Simulationsmodell im Rahmen von Studien zur Erforschung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen angewendet. Das Kapitel 6, das die Validierung betrachtet und in dem die Zielrichtung des Versuchsplans ist, die Modelle zu validieren, und dieses Kapitel, in dem die Zielrichtung der Versuche ist, Auswirkungen auf das Systemverhalten durch verschiedene Eingangsgrößen oder die Änderung einzelner oder mehrerer Eingangsgrößen zu bestimmen, lassen sich nicht vollständig voneinander trennen. Die Ergebnisse der in Kapitel 6 durchgeführten Versuche zeigen ebenfalls Auswirkungen auf das Systemverhalten und es können Aussagen daraus abgeleitet werden. Umgekehrt können die Ergebnisse der in diesem Kapitel durchgeführten Versuche auch zur Validierung beitragen, indem sie für weitere Parameterkombinationen Ergebnisse zum Simulationsmodell und zum analytischen Modell liefern und damit weitere Vergleiche ermöglichen.

Die Abschnitte 7.1 bis 7.3 zeigen Versuche, deren Ergebnisse den Einfluss der Lagerstrategien auf das Systemverhalten von Shuttle-Systemen zeigen.

### 7.1 Durchsatzbasierte Einlagerung

Die durchgeführten Versuche haben das Ziel, den Einfluss unterschiedlicher Zonierungsvarianten auf den Durchsatz von Shuttle-Systemen zu quantifizieren. Weiterhin wird die Anwendung der Algorithmen zur Findung der optimalen Zonenbildung gezeigt, und damit für die untersuchte Variante das annähernd maximale Optimierungspotential durch die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ ermittelt.

#### 7.1.1 Anwendung der Lagerstrategie Durchsatzbasierte Einlagerung

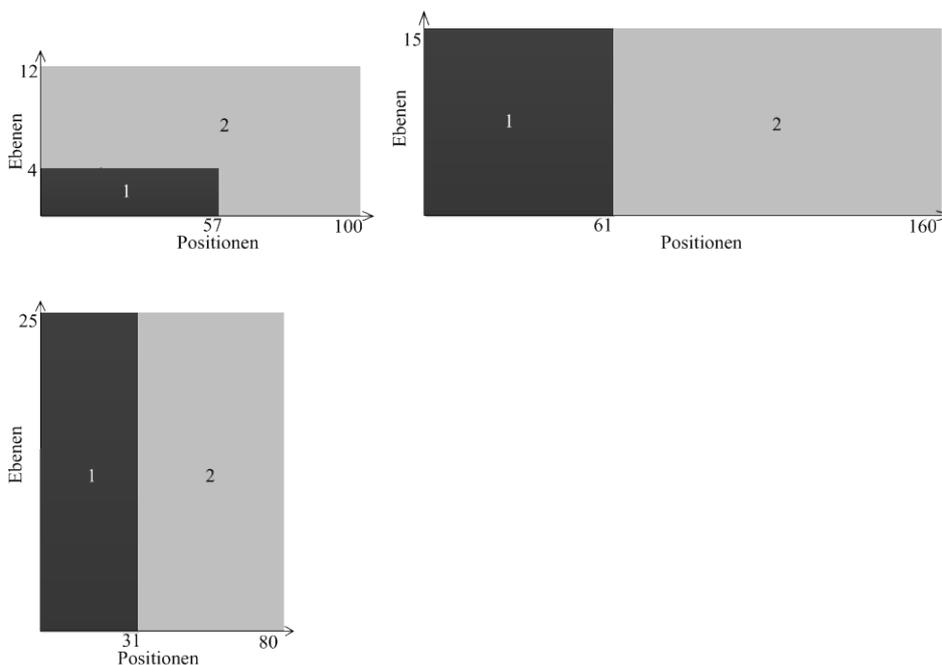
Die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ führt zu kürzeren Wegstrecken der Fördermittel, da häufig benötigte Ladeeinheiten im vorderen Bereich eingelagert werden<sup>31</sup>. Im Folgenden werden vier Varianten beispielhaft gezeigt und beschrieben. Zwei Varianten beziehen sich auf ganggebundene, zwei weitere auf gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme. Dabei zeigt jeweils eine Variante einen durchsatzsteigernden Effekt durch die Zonierung, die andere zeigt diesen Effekt nicht bzw. nur minimal. Die vollständigen Eingangsdaten der beschriebenen Versuche befinden sich im Anhang E.1. Die

---

<sup>31</sup> Die Versuche dieses Abschnitts wurden auch im Schlussbericht des Forschungsprojekts „SmartShuttle“ [71] veröffentlicht.

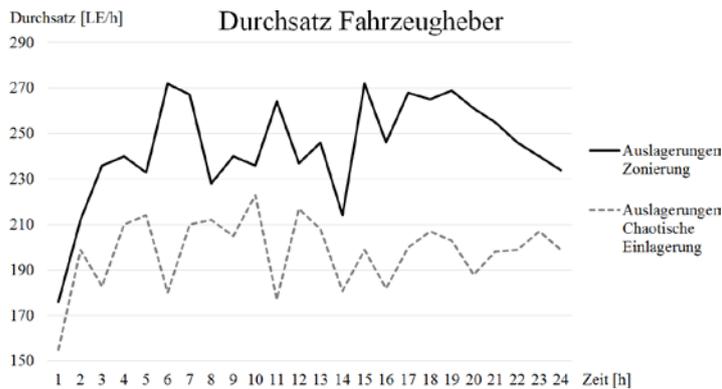
Ausgangsgrößen wurden durch das Simulationsmodell ermittelt. Die Gründe, in welchen Fällen deutliche Effekte erzielbar sind und in welchen nicht, werden im Folgenden genannt.

Abbildung 37 zeigt die Zonierung für die untersuchten Varianten. Abbildung 38 zeigt den Durchsatz bei Anwendung der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ im Vergleich zur Lagerstrategie „Chaotische Einlagerung“ bei einem ganggebundenem Shuttle-System (Variante 1). Der Auftragseingang ist in beiden Varianten jeweils pro Stunde identisch parametrisiert, er liegt leicht über dem maximal erreichbaren Durchsatz. Das bedeutet, nach einer Warmlaufphase in der ersten Stunde hat das System immer Aufträge zur Bearbeitung in der Warteschlange. Die Ladeeinheiten in Zone 1 haben eine Zugriffshäufigkeit von 80 % und machen 20 % aller Ladeeinheiten im Lager aus. Der Lagerfüllgrad beträgt 95 %. Zone 1 wird rechteckig nahe des E/A-Punkts gebildet (von zwölf Ebenen sind acht für Ladeeinheiten der Zone 1 ausgeschlossen). Der E/A-Punkt befindet sich einen Meter oberhalb von Ebene eins, zwischen Ebene zwei und drei.



**Abbildung 37: Zonierung für Variante 1 (links oben), Variante 2 und 3 (rechts oben), Variante 4 (links unten)**

Die mittlere Durchsatzsteigerung bei Anwendung der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ beträgt für diese Parametrierung 23 %.



**Abbildung 38: Zonierung (rechts), Variante 1. Durchsatz Zonierung und Chaotische Einlagerung (links), Variante 1**

Tabelle 21 zeigt die Daten zum Durchsatz des in Abbildung 38 gezeigten simulativen Versuchs.

**Tabelle 21: GG-System, Chaotische Einlagerung und Durchsatzbasierte Einlagerung im Vergleich, Variante 1**

Bezeichnung	Variante 1a	Variante 1b	Änderung
Lagerstrategie	Chaotische Einlagerung	Durchsatzbasierte Einlagerung	
Mittlerer Durchsatz	198,17 LE/h	244,04 LE/h	23,15 %

Der sehr deutliche durchsatzsteigernde Effekt kommt durch verschiedene Faktoren zustande. Zum einen wurde die Ebenenanzahl für Zone 1 deutlich eingegrenzt, es wurden nur vier Ebenen nahe des E/A-Punktes zugelassen (bei drei Shuttle-Fahrzeugen im Gang). Zum anderen hatte der Heber relativ langsame Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte. Da nur 20 % der Ladeeinheiten Artikel für Zone 1 enthielten, konnten dennoch zusätzlich die Fahrtwege der Shuttle-Fahrzeuge verkürzt werden, indem die hinteren Lagerplätze mit Langsamdreher-Ladeeinheiten befüllt wurden. Die Shuttle-Fahrzeuge konnten den Heber auslasten, es fand kein Wechsel des Engpasses statt. Engpass blieb also der Heber. Durch die Reduzierung der Fahrtwege des Hebers konnte dieser die Aufträge in deutlich kürzerer Zeit bearbeiten. Durch die Anwendung der Modelle lassen sich die Auswirkungen der genannten Zusammenhänge (die z. T. auch schon vor der Anwendung der Modellierung bekannt oder vermutet worden waren) quantifizieren.

Tabelle 22 zeigt die Ausgangsdaten der Variante 2 (GG-System).

**Tabelle 22: GG-System, Chaotische Einlagerung und Durchsatzbasierte Einlagerung im Vergleich, Variante 2**

Bezeichnung	Variante 2a	Variante 2b	Änderung
Lagerstrategie	Chaotische Einlagerung	Durchsatzbasierte Einlagerung	
Mittlerer Durchsatz	521 LE/h	526 LE/h	0,96 %

In Variante 2 wird ersichtlich, dass der Durchsatz nur geringfügig steigt. Es wurden keine Ebenen für Ladeeinheiten für Zone 1 ausgeschlossen und es wurden mehr Shuttle-Fahrzeuge als in Variante 1 (fünf) eingesetzt. Auf Ladeeinheiten der Zone 1 wurde zu 70 % zugegriffen, 40 % der Ladeeinheiten im Shuttle-System sind Ladeeinheiten für Zone 1. Diese wurden gleichmäßig im vorderen Bereich eingelagert. Die Wegstrecke des Fahrzeughebers wurde dadurch nicht verringert. Der Engpass war in dieser Variante der Heber, die Shuttle-Fahrzeuge konnten ihn auch mit längeren Wegstrecken auslasten. Daher resultiert der kaum vorhandene Effekt auf den Durchsatz bei Verkürzung der Wegstrecken der Shuttle-Fahrzeuge.

Tabelle 23 zeigt die Ausgangsdaten der Variante 3.

**Tabelle 23: GEG-System, Chaotische Einlagerung und Durchsatzbasierte Einlagerung im Vergleich, Variante 3**

Bezeichnung	Variante 3a	Variante 3b	Änderung
Lagerstrategie	Chaotische Einlagerung	Durchsatzbasierte Einlagerung	
Mittlerer Durchsatz	700,25 LE/h	1028,8 LE/h	54,63 %

In Variante 3 wird ersichtlich, dass die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ einen hohen Einfluss auf den Durchsatz hat. Das Shuttle-System enthielt fünfzehn Ebenen. Die Heber wurden relativ schnell parametrisiert, die Shuttle-Fahrzeuge relativ langsam. Die Zonierung verlagerte die Ladeeinheiten der Zone 1 (20 %) nach vorne. Es wurden keine Ebenen für Ladeeinheiten der Zone 1 ausgeschlossen. Die Shuttle-Fahrzeuge bildeten in dieser Variante den Engpass. Die Shuttle-Fahrzeuge konnten durch die Zonierung ihre Wegstrecken sehr stark verkürzen und dadurch die Heber besser auslasten.

Tabelle 24 zeigt die Ausgangsdaten der Variante 4.

**Tabelle 24: GEG-System, Chaotische Einlagerung und Durchsatzbasierte Einlagerung im Vergleich, Variante 4**

Bezeichnung	Variante 4a	Variante 4b	Änderung
Lagerstrategie	Chaotische Einlagerung	Durchsatzbasierte Einlagerung	
Mittlerer Durchsatz	541,67 LE/h	540,29 LE/h	-0,25 %

Variante 4 zeigt, dass die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ zu keiner Steigerung des Durchsatzes führt. Das Shuttle-System ist relativ kurz und hoch. Die Heber haben lange Wegstrecken zurückzulegen. Bei der Zonierung wurden keine Ebenen für Ladeeinheiten der Zone 1 ausgeschlossen, sie wurden also gleichmäßig im vorderen Bereich eingelagert. Der Heber bildet in diesem System den Engpass, das bedeutet, die Shuttle-Fahrzeuge haben ihn bereits bei einer chaotischen Einlagerung vollständig ausgelastet. Eine

Zonierung, die keine Ebenen ausschließt, ändert die Wegstrecke des Hebers nicht. Eine Durchsatzsteigerung ist dadurch nicht möglich.

Die gewählten Parameterwerte der Varianten haben einige Parameterkombinationen, die zu Durchsatzsteigerungen führen, gezeigt. Ebenso wird gezeigt, in welchen Fällen keine oder geringe Effekte generiert werden, sei es durch eine ungünstige Bildung der Zonen oder andere Faktoren. Tabelle 25 zeigt die Ergebnisse aller Varianten. Die Varianten 1 und 3 steigern den Durchsatz, die Varianten 2 und 4 nicht oder kaum. Die Ergebnisse zeigen, dass es Zusammenhänge gibt, die für die Wahl der Zonierung berücksichtigt werden sollten.

**Tabelle 25: Ergebnisse der Varianten**

Bezeichnung	Mittlerer Durchsatz		Änderung
	Chaotische Einlagerung	Durchsatzbasierte Einlagerung	
Variante 1	198,17 LE/h	244,04 LE/h	23,15 %
Variante 2	521 LE/h	526 LE/h	0,96 %
Variante 3	700,25 LE/h	1028,8 LE/h	54,63 %
Variante 4	541,67 LE/h	540,29 LE/h	-0,25 %

Im Folgenden werden Schlussfolgerungen zu den Effekten auf den Durchsatz bei Anwendung der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ gezogen.

In einem Shuttle-System gibt es einen Engpass. Dieser ist entweder bei den Shuttle-Fahrzeugen oder bei den Hebern zu finden. Wenn die Heber der Engpass sind, so kann über den Ausschluss der am weitesten vom E/A-Punkt entfernten Ebenen für Ladeeinheiten der Zone 1 die Wegstrecke verkürzt werden. Mit jeder Verkürzung haben die Heber aber gleichzeitig auch weniger Shuttle-Fahrzeuge zur Verfügung (zumindest bei GEG-Systemen), die sie bedienen. Das bedeutet, es gibt einen kritischen Punkt, ab dem ein Wechsel des Engpasses stattfindet. Wenn die Shuttle-Fahrzeuge der Engpass sind, so können die Ladeeinheiten der Zone 1 in jeder Ebene gleichmäßig im vorderen Bereich eingelagert werden. Durch die Verkürzung der Wegstrecken der Shuttle-Fahrzeuge kann der Heber besser ausgelastet werden. Auch hierbei kann ein Wechsel des Engpasses stattfinden, sodass dann ebenfalls ein Ausschluss von Ebenen in Frage kommen kann.

Großen Einfluss hat zudem die Anzahl der Ladeeinheiten der Zone 1 und deren Zugriffshäufigkeit. Wenn die Anzahl der Ladeeinheiten der Zone 1 gering und deren Zugriffshäufigkeit hoch ist, so kann die Zonierung hohe Durchsatzsteigerungen erzielen. Je eher sich die Zugriffshäufigkeit auf die Ladeeinheiten einer Gleichverteilung annähert, desto weniger Effekte zeigt eine Zonierung.

Die kinematischen Parameter führen ebenfalls zu Effekten bei der Zonierung. Diese führen wieder zur bereits beschriebenen Engpass-Thematik. Wenn die Heber im Vergleich zu den Shuttle-Fahrzeugen relativ langsam agieren und der theoretisch erzielbare Durchsatz (bei der

Annahme, dass das Fördermittel nie warten muss) sehr viel geringer als der der Shuttle-Fahrzeuge ist, so ist durch Zonierung viel Potential zur Optimierung vorhanden. Wenn die theoretischen Durchsätze der Shuttle-Fahrzeuge und der Heber sich als Ausgangsbasis sehr ähnlich sind, ist weniger Potential vorhanden.

Bei einem hohen Shuttle-System hat der Heber lange Wegstrecken, wenn diese durch Ebenenausschluss reduziert werden können, kann das zu deutlichen Durchsatzsteigerungen führen. Bei einem sehr langen Shuttle-System kann die Verkürzung der Wegstrecke der Shuttle-Fahrzeuge ebenfalls dazu führen.

#### 7.1.2 Anwendung des A-Priori- und des evolutionären Algorithmus

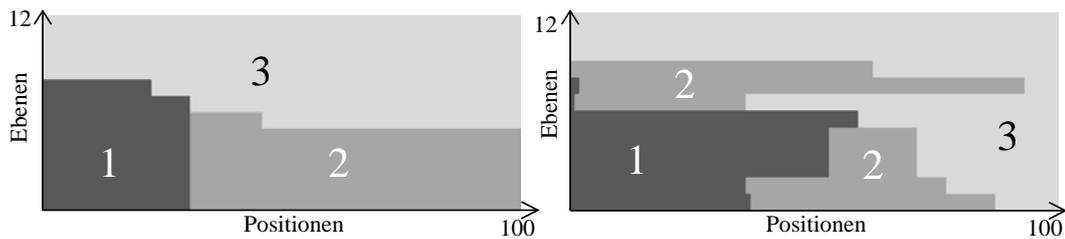
In diesem Abschnitt wird die Optimierung des Durchsatzes bei Anwendung des A-Priori- und des evolutionären Algorithmus gezeigt<sup>32</sup>. Es ist zum einen von Interesse, in welchem Maße ein Optimierungspotential vorhanden ist, und zum anderen, welcher der Algorithmen sich dem wahren, unbekanntem, Optimum besser annähert. Weiterhin werden die Ergebnisse des analytischen Modells mit denen des Simulationsmodells verglichen. Zur Ermittlung des Grenzdurchsatzes und zum Vergleich mit dem analytischen Modell gilt für das Simulationsmodell die Annahme, dass ständig Aufträge zur Verfügung stehen.

Die Parameterwerte zu den Versuchen befinden sich im Anhang E.2.

Die optimale Definition von Zonen bei erhöhter Beschleunigung und Geschwindigkeit des Hebers erhöht tendenziell die Anzahl der häufig verwendeten Ebenen. Die optimale Definition von Zonen mit erhöhter Beschleunigung und Geschwindigkeit der Shuttle-Fahrzeuge verringert tendenziell die Anzahl der häufig verwendeten Ebenen, siehe auch [51]. Das liegt an der Engpassbildung, je schneller der Heber fährt, desto geringer ist die Größe des Unterschiedes des theoretischen Durchsatzes zwischen den Shuttle-Fahrzeugen und dem Heber. Abbildung 39 zeigt zwei Beispiele für durch die Algorithmen definierte optimale Zonen. Die Zonen sind mit Zahlen gekennzeichnet. Der evolutionäre Algorithmus wurde mit einer Generationsgröße von 20 parametrisiert, der Variationsanteil zur Mutation lag bei 70 %.

---

<sup>32</sup> Die Algorithmen sind in Abschnitt 5.1.1 beschrieben. Die Versuchsergebnisse des A-Priori-Algorithmus wurden in [85] veröffentlicht.



**Abbildung 39: Optimale Zonen, links durch den A-Priori-Algorithmus definiert, rechts durch den evolutionären Algorithmus (beide Variante 3, Einzelspiele)**

In Tabelle 26 bis Tabelle 32 werden die Ergebnisse der untersuchten Varianten gezeigt. Die kursiv geschriebenen Werte wurden durch das Simulationsmodell bestimmt, die anderen durch das analytische Modell. Die Aussage „Zonen = 1“ in den Tabellen impliziert die Lagerstrategie „Chaotische Einlagerung“. Die Varianten 1 - 3 zeigen die Definition von Zonen und das Optimierungspotential für unterschiedliche Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte von Hebern und Shuttle-Fahrzeugen. Variante 4 zeigt die Möglichkeit, einen geringeren Lagerfüllgrad durch eine nicht angeforderte Zone zu berücksichtigen (Variante 4 weicht nur mit einem geringeren Lagerfüllgrad von Variante 1 ab). Variante 5 zeigt den Effekt der Zonenbildung für ein höheres Shuttle-System (Variante 5 weicht mit 36 Ebenen von Variante 2 ab, die anderen Parameterwerte sind identisch). Die Durchsatzergebnisse in Tabelle 26 bis Tabelle 32 beziehen sich auf den Durchsatz eines Hebers. In den gezeigten Szenarien werden zwei Heber pro Gang verwendet. Somit kann pro Gang der doppelte Durchsatz erzielt werden. Der A-Priori-Algorithmus hat die Zonenbildung unter der Annahme optimiert, dass die Heber Doppelspiele ausführen können. Die Übergabepplätze sind abwechselnd der Ein- und der Auslagerung zugeordnet, siehe auch Abbildung 10 in Abschnitt 2.2.1. Bei Phasen, in denen nur Einzelspiele durchzuführen sind, können beide Heber dadurch als Ein- oder Auslagerheber arbeiten. Das bedeutet, wenn z. B. nur Auslageraufträge eingehen, werden beide Heber für die Abarbeitung der Auslagerungen genutzt.

**Tabelle 26: Ergebnisse, Variante 1**

Bezeichnung	Durchsatz Heber [LE/h]			
	Einzelspiele			
Zonen	1	2	3	6
Variante 1 A-Priori	494,01 (494,75)	565,11 (552,42)	632,19 (616,23)	627,98 (615,84)
Variante 1 evolutionär	494,01 (494,75)	580,79 (542,30)	644,19 (593,89)	650,10 (596,45)

**Tabelle 27: Ergebnisse, Variante 2, Einzelspiele**

Bezeichnung	Durchsatz Heber [LE/h]			
	Einzelspiele			
Zonen	1	2	3	6
Variante 2 A-Priori	319,34 (319,70)	331,71 (332,67)	343,83 (341,52)	344,14 (341,14)
Variante 2 evolutionär	319,34 (319,70)	330,075 (323,75)	339,38 (320,5)	339,63 (337,15)

**Tabelle 28: Ergebnisse, Variante 2, Doppelspiele**

Bezeichnung	Durchsatz Heber [LE/h]			
	Doppelspiele			
Zonen	1	2	3	6
Variante 2 A-Priori	344,89 (344,08)	353,90 (350,93)	365,64 (358,15)	365,89 (357,75)
Variante 2 evolutionär	344,89 (344,08)	352,08 (351,72)	365,96 (354,44)	361,92 (356,03)

**Tabelle 29: Ergebnisse, Variante 3, Einzelspiele**

Bezeichnung	Durchsatz Heber [LE/h]			
	Einzelspiele			
Zonen	1	2	3	6
Variante 3 A-Priori	466,41 (466,59)	482,46 (480,49)	491,64 (490,82)	487,08 (485,44)
Variante 3 evolutionär	466,41 (466,59)	483,17 (480,01)	495,69 (493,82)	488,58 (485,21)

**Tabelle 30: Ergebnisse, Variante 3, Doppelspiele**

Bezeichnung	Durchsatz Heber [LE/h]			
	Doppelspiele			
Zonen	1	2	3	6
Variante 3 A-Priori	512,75 (510,84)	526,65 (522,21)	539,86 (532,53)	528,94 (524,25)
Variante 3 evolutionär	512,75 (510,84)	525,29 (524,47)	535,55 (526,85)	531,99 (524,61)

**Tabelle 31: Ergebnisse, Variante 4**

Bezeichnung	Durchsatz Heber [LE/h]	
	Einzelspiele	
Zonen	1	4
Variante 4 A-Priori	494,01 (494,75)	659,40 (645,32)
Variante 4 evolutionär	494,01 (494,75)	691,64 (630,06)

**Tabelle 32: Ergebnisse, Variante 5**

Bezeichnung	Durchsatz Heber [LE/h]			
	Einzelspiele		Doppelspiele	
Zonen	1	3	1	3
Variante 5 A-Priori	259,16 (260,64)	304,41 (303,64)	294,10 (297,98)	328,24 (327,22)
Variante 5 evolutionär	259,16 (260,64)	294,63 (293,35)	294,10 (297,98)	321,58 (315,63)

Die Ergebnisse zeigen das Optimierungspotential der Zonenbildung durch die beiden Algorithmen. Alle prozentualen Durchsatzsteigerungen beziehen sich auf den Vergleich zwischen der Zonierung einer Variante mit der Lagerstrategie „Chaotische Einlagerung“.

Der Vergleich der analytisch und simulativ ermittelten Ergebnisse zeigt die weitgehende Übereinstimmung des analytischen Modells mit dem Simulationsmodell. Teilweise ist eine leichte Überbewertung des Durchsatzes des analytischen Modells zu erkennen, insbesondere bei Einzelspielen des Hebers in den Varianten 1 und 4. Der A-Priori-Algorithmus und der evolutionäre Algorithmus liefern vergleichbare Ergebnisse, die weitgehend mit dem Simulationsmodell übereinstimmen, z. T. sind Überbewertungen des analytischen Modells erkennbar. Die höchste Abweichung hat Variante 4 mit 9,77 % Abweichung des analytischen Modells zum Simulationsmodell bei der Zonierungsvariante des evolutionären Algorithmus. Beide Algorithmen erzielen bei ihrer Optimierung ähnliche Durchsatzergebnisse, auch wenn

sich die tatsächlichen gebildeten Zonen voneinander unterscheiden. Es kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass beide Algorithmen eine ähnliche Optimierung erreichen, und dass diese Optimierung mit hoher Wahrscheinlichkeit eine geringe Abweichung zum wahren, unbekanntem, Optimum aufweist.

Die folgenden Prozentwerte beziehen sich auf die Optimierung mit dem A-Priori-Algorithmus (die Prozentwerte auf Basis des evolutionären Algorithmus sind ähnlich). In der Variante 1 kann der Durchsatz um 27,97 % gesteigert werden, in den Varianten 2 – 3 zwischen 5,29 % und 7,77 %. Die Berücksichtigung niedriger Lagerfüllgrade erbringt eine deutliche Durchsatzerhöhung von 33,48 % (Variante 4). Je längere Strecken der Heber zurücklegen muss, desto höher ist das Potential zur Optimierung. Variante 5 steigert den Durchsatz bei einer Zonierung bis zu 17,46 %. Das ist eine deutlich höhere Steigerung als bei Variante 2, die mit Ausnahme der Anzahl der Ebenen dieselben Parameterwerte wie Variante 5 aufweist (Variante 5: 36 Ebenen, Variante 2: 12 Ebenen).

Es lässt sich feststellen, dass das Potential zur Durchsatzsteigerung je nach Parameterkombination unterschiedlich ausfällt. Weiterhin wurde das Potential zur Durchsatzsteigerung für eine unterschiedliche Anzahl an Zonen erforscht. Einige Aussagen des Kapitels 5, die logisch begründet wurden, lassen sich durch die Versuchsergebnisse quantifizieren, d. h. die Stärke der Ausprägung des eingetretenen Effekts kann mit den Modellen ermittelt werden:

- Mit steigender Anzahl an Ebenen steigt das Potential zur Durchsatzsteigerung, da der Fahrweg des Hebers mit jeder weiteren Ebene stärker reduziert werden kann (vgl. Durchsatzsteigerung der Variante 2 mit 12 Ebenen und Variante 5 mit 36 Ebenen).
- Mit steigender Anzahl an Positionen im Gang steigt das Potential zur Durchsatzsteigerung (vorausgesetzt die Shuttle-Fahrzeuge bilden den Engpass), da die Fahrwege des Shuttle-Fahrzeugs verkürzt werden.
- Je schneller der Heber agiert (Fahrzeiten und Lastaufnahmezeiten), desto geringer ist das Potential zur Durchsatzsteigerung (vgl. Durchsatzsteigerung der Varianten 1 und 3).
- Niedrige Füllgrade sollten bei einer Zonierung durch eine „Leerzone“ berücksichtigt werden (vgl. Durchsatzsteigerung der Variante 4).
- Bereits mit zwei Zonen ist eine deutliche Steigerung des Durchsatzes möglich. Die weitere Erhöhung der Anzahl der Zonen führt in geringerem Maße zu weiteren Durchsatzsteigerungen (und erfordert für die Anwendung in der Praxis eine komplexere Steuerung).

## 7.2 Reihenfolgesortierung der Aufträge

Die folgenden Versuche zeigen die Auswirkung der Reihenfolgesortierung zur Optimierung der Fahrtzeiten des Hebers. Als Referenz dient die Lagerstrategie „Chaotische Einlagerung“. Zur Ermittlung des Grenzdurchsatzes gilt die Annahme, dass immer Aufträge zur Verfügung stehen.

### 7.2.1 Anwendung mit Annahme Grenzdurchsatz

Im Folgenden werden Versuche für gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme unter Annahme des Grenzdurchsatzes durchgeführt<sup>33</sup>. Das analytische Modell setzt diese voraus, das Simulationsmodell wird zum Vergleich mit derselben Annahme parametrisiert<sup>34</sup>. Die Parameterwerte zu den Versuchen werden im Anhang E.3 gezeigt.

In Tabelle 33 werden die Ergebnisse des analytischen Modells und des Simulationsmodells gezeigt. Die kursiv geschriebenen Werte wurden durch das Simulationsmodell bestimmt, die anderen durch das analytische Modell. Die Durchsatzergebnisse in den folgenden Tabellen und Abbildungen beziehen sich auf den Durchsatz eines Hebers. In den hier gezeigten Szenarien werden zwei Heber pro Gang verwendet. Somit kann pro Gang der doppelte Durchsatz erzielt werden. Die Heber führen Doppelspiele aus, die Übergabeplätze sind abwechselnd einer Ein- oder einer Auslagerung zugeordnet, siehe auch Abbildung 10 in Abschnitt 2.2.1.

**Tabelle 33: Ergebnisse Reihenfolgesortierung**

Bezeichnung	Durchsatz Heber [LE/h]		
	1	2	3
Chaotische Einlagerung	518,72 <i>(517,5)</i>	597,92 <i>(596,13)</i>	518,71 <i>(516,92)</i>
Chaotische Einlagerung und Reihenfolgesortierung	<i>(542,82)</i>	<i>(614,71)</i>	<i>(534,99)</i>

Die Ergebnisse quantifizieren Aussagen des Abschnitts 5.2, d. h. die Stärke der Ausprägung des Effekts wird bestimmt.

Folgende Aussagen können quantifiziert werden:

- Mit absteigenden Parameterwerten zur Beschleunigung und Geschwindigkeit steigt das Potential der Reihenfolgesortierung (da dann die Fahrtzeit des Hebers höher ist). Das kann auch auf die Wegstrecke oder die Anzahl der Ebenen über-

<sup>33</sup> Die Versuchsergebnisse wurden in [51] veröffentlicht.

<sup>34</sup> Das Simulationsmodell kann ebenso auftragsbasiert parametrisiert werden, siehe dazu die Versuche zum Einfluss der Reihenfolgesortierung des Abschnitts 7.2.2.

tragen werden, mit steigender Wegstrecke/Anzahl der Ebenen steigt das Potential der Reihenfolgesortierung (da das dann auch zu einer höheren Fahrtzeit führt). Das zeigt die Durchsatzsteigerung durch die Reihenfolgesortierung der Variante 1 im Vergleich zur Variante 2.

- Eine Erhöhung der kinematischen Werte für die Shuttle-Fahrzeuge verursacht keine weitere Steigerung des Durchsatzes, wenn die Heber der Engpass sind (die Ergebnisse der Variante 3 sind denen der Variante 1 ähnlich). Das ist dadurch begründet, dass die Heber bereits bei niedrigeren kinematischen Werten der Shuttle-Fahrzeuge vollständig ausgelastet sind.

### 7.2.2 Anwendung mit unterschiedlichen Auftragseingängen

Im Folgenden werden Varianten für gang- und ebenengebundene und ganggebundene Shuttle-Systeme mit unterschiedlichen Auftragseingängen parametrisiert. Dabei wird die Auswirkung der Anwendung der Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ auf den Durchsatz, die Auftragsdurchlaufzeit und die Warteschlangenlänge gezeigt und Schlussfolgerungen zu den Eingangsgrößen auf das Optimierungspotential gezogen.

Die Parameterwerte zu jeder Variante sind im Anhang E.4 zu finden. Variante 1 hat relativ hohe Lastaufnahmezeiten und relativ kurze Fahrwege (12 Ebenen). Variante 2 hat relativ niedrige Lastaufnahmezeiten und relativ lange Fahrwege (36 Ebenen).

#### 7.2.2.1 Gang- und ebenengebundenes Shuttle-System

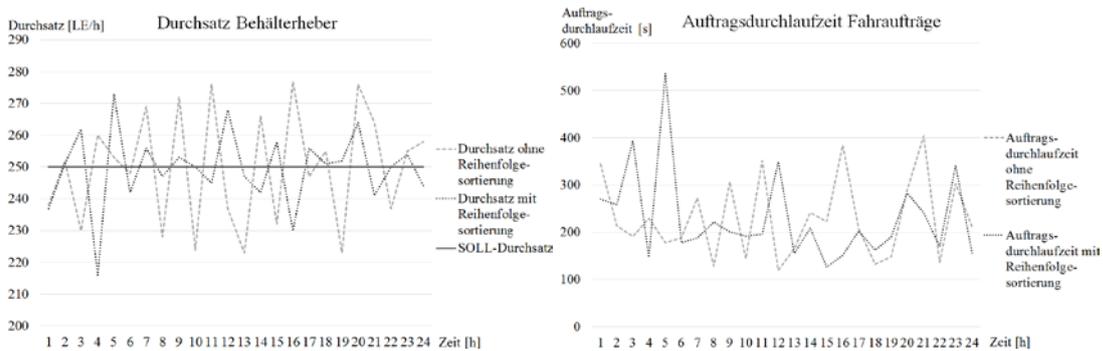
Der Auftragseingang wird je Variante mit einem Wert pro Stunde parametrisiert, der bearbeitet werden kann, ohne ein dauerhaftes Warteschlangenswachstum der Aufträge zu erzeugen (keine Überlastung des Systems). Weiterhin wird ein Auftragseingang parametrisiert, der das System überlastet. Heber und Shuttle-Fahrzeuge führen, wann immer möglich, Doppelspiele aus. Es wurde ein Ladeeinheitenkreislauf simuliert, d. h. die ausgelagerten Ladeeinheiten kamen nach einer parametrisierten Zeit wieder als Einlageraufträge zurück ins System. Dadurch wurden weitestgehend Doppelspiele ausgeführt.

Abbildung 40 zeigt die stündlichen Mittelwerte des Durchsatzes und der Auftragsdurchlaufzeit für die Anwendung der Reihenfolgesortierung sowie der Nicht-Anwendung im Verlauf von vierundzwanzig Stunden. Es sind 250 Auslageraufträge pro Stunde parametrisiert worden. Erkennbar pendeln die Mittelwerte um den SOLL-Durchsatz (Auftragseingang Auslageraufträge pro Stunde)<sup>35</sup>. Der Durchsatz wird nur auf die Auslageraufträge bezogen. Jeder Ausla-

---

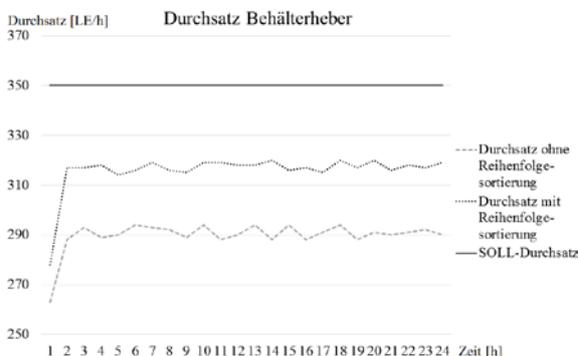
<sup>35</sup> Die Schwankungen sind stochastisch bedingt. Das Simulationsmodell erzeugt die parametrisierten Aufträge pro Stunde mit einer Gleichverteilung.

gerauftrag kehrt als Einlagerauftrag ins System zurück, daher wird jede Stunde eine ähnliche Anzahl Einlageraufträge bearbeitet. Das System kann diesen Auftragseingang dauerhaft bewältigen. Die Auftragsdurchlaufzeit ist in beiden Fällen ähnlich. Es findet kein dauerhaftes Wachstum der Auftragsdurchlaufzeiten statt, was ebenfalls zeigt, dass das System nicht überlastet wird.



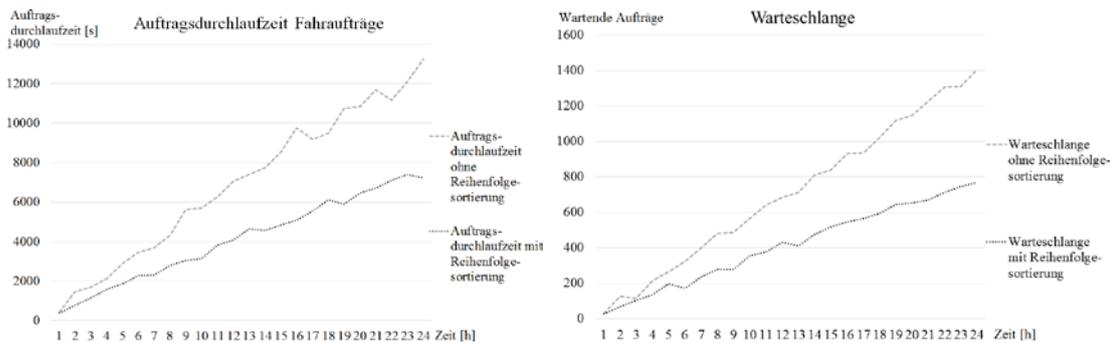
**Abbildung 40: Durchsatz Auslageraufträge (links), Auftragsdurchlaufzeit Auslageraufträge (rechts), Variante 1, 250 Aufträge pro Stunde**

Abbildung 41 zeigt den mittleren Durchsatz für die Anwendung und Nicht-Anwendung der Reihenfolgesortierung bei einem Auftragseingang von 350 Auslageraufträgen pro Stunde. Der Mittelwert des Durchsatzes über 23 Stunden beträgt bei Anwendung der Reihenfolgesortierung 317,43 LE/h (nur ausgelagerte LE) und bei der Nicht-Anwendung 290,91 LE/h. Das entspricht einer Durchsatzsteigerung um 9,21 % durch die Reihenfolgesortierung der Aufträge. Stunde 1 wird bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt, da sie die „Einschwingphase“ darstellt, d. h. das Shuttle-System wartet zu Beginn zunächst, bis zufallsverteilt die ersten Aufträge eingehen. In den weiteren Stunden 2 - 23 liegt ein eingeschwungener Zustand vor, da bei einem Übergang in die nächste Stunde bereits noch wartende Aufträge vorliegen können. Daher sind die Stunden 2 - 23 relevant für die Mittelwertbildung.



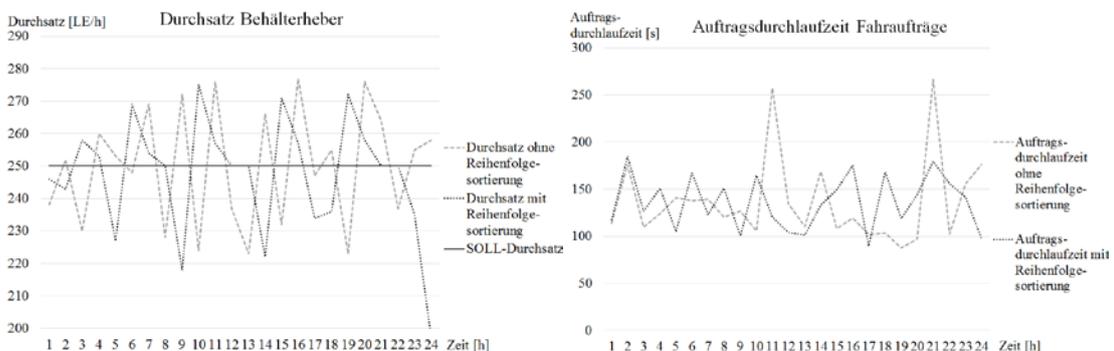
**Abbildung 41: Durchsatz Auslageraufträge, Variante 1, 350 Aufträge pro Stunde**

Abbildung 42 zeigt die stündlichen Mittelwerte der Auftragsdurchlaufzeit und der Warteschlange der Auslageraufträge. Die Auftragsdurchlaufzeit wächst bei der Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ etwas langsamer. Es findet ein dauerhaftes Wachstum der Auftragsdurchlaufzeiten statt. Das zeigt, dass das System bei einem dauerhaften Auftragseingang dieser Größenordnung überlastet wird. Erkennbar ist die Korrelation zwischen Auftragsdurchlaufzeit und Warteschlange. Die folgenden Abbildungen beschränken sich daher auf die Auftragsdurchlaufzeit.



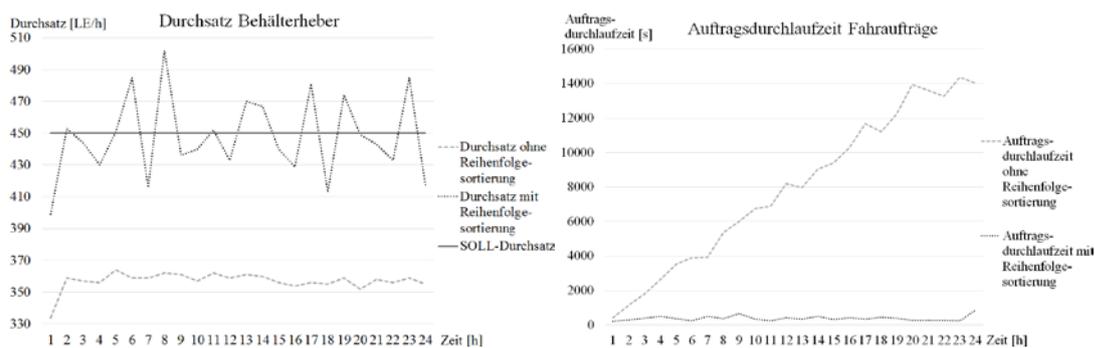
**Abbildung 42: Auftragsdurchlaufzeit Auslageraufträge (links), Warteschlange Auslageraufträge (rechts), Variante 1, 350 Aufträge pro Stunde**

Abbildung 43 zeigt die stündlichen Mittelwerte des Durchsatzes und der Auftragsdurchlaufzeit für die Anwendung und Nicht-Anwendung der Reihenfolgesortierung für die Variante 2 mit 36 Ebenen bei einem Auftragseingang von 250 Auslageraufträgen pro Stunde, im Verlauf von vierundzwanzig Stunden. Erkennbar pendeln die Mittelwerte um den SOLL-Durchsatz (Auftragseingang Auslageraufträge pro Stunde). Das System kann diesen Auftragseingang dauerhaft bewältigen. Die Auftragsdurchlaufzeit ist in beiden Fällen ähnlich. Es findet kein dauerhaftes Wachstum der Auftragsdurchlaufzeiten statt, was zeigt, dass das System nicht überlastet wird.



**Abbildung 43: Durchsatz Auslageraufträge (rechts), Auftragsdurchlaufzeit Auslageraufträge (links), Variante 2, 250 Aufträge pro Stunde**

Abbildung 44 zeigt die stündlichen Mittelwerte des Durchsatzes und der Auftragsdurchlaufzeit für die Anwendung und Nicht-Anwendung der Reihenfolgesortierung bei einem Auftragseingang von 450 Auslageraufträgen pro Stunde. Der Mittelwert des Durchsatzes über 23 Stunden beträgt bei Anwendung der Reihenfolgesortierung 459,70 LE/h<sup>36</sup> (nur ausgelagerte LE) und bei der Nicht-Anwendung 358,09. Das entspricht einer Durchsatzsteigerung um 25,58 % durch die Reihenfolgesortierung der Aufträge. Zu beachten ist dabei, dass der Grenzdurchsatz bei 450 Aufträgen pro Stunde mit Anwendung der Reihenfolgesortierung noch nicht erreicht ist (der Durchsatz pendelt um 450 LE/h), d. h. bei mehr Aufträgen pro Stunde würde die Steigerung noch höher ausfallen. Die Auftragsdurchlaufzeit bleibt bei der Reihenfolgesortierung weitgehend konstant, d. h. das System wird noch nicht überlastet. Es findet ein dauerhaftes Wachstum der Auftragsdurchlaufzeiten bei der Nicht-Anwendung der Reihenfolgesortierung statt. Das zeigt, dass das System bei einem dauerhaften Auftragseingang dieser Größenordnung bei der Nicht-Anwendung überlastet wird.



**Abbildung 44: Durchsatz Auslageraufträge (rechts), Auftragsdurchlaufzeit Auslageraufträge (links), Variante 2, 450 Aufträge pro Stunde**

Die Ergebnisse zeigen, dass die Anwendung der Reihenfolgesortierung einen Einfluss auf den Grenzdurchsatz hat, der von verschiedenen Eingangsgrößen abhängig ist.

Die Lastaufnahmezeiten der Heber sind bei Variante 1 relativ hoch im Verhältnis zu den Fahrtzeiten, bei Variante 2 sind diese deutlich geringer. Die Reihenfolgesortierung verkürzt die Fahrtzeit der Fahrten zwischen der Ein- und Auslagerung einer Ladeinheit. Da das Lager relativ niedrig (4,4 m, 12 Ebenen) und zusätzlich hohe Lastaufnahmezeiten vorhanden sind, ist das Potential zur Optimierung geringer als bei Variante 2. Hohen Einfluss auf das

<sup>36</sup> Der Mittelwert des Durchsatzes ist mit 459,70 LE/h höher als der stündliche Auftragseingang von 450 LE/h. Das ist dadurch begründet, dass alle bearbeiteten Aufträge der Stunden 2 – 24 berücksichtigt werden. Das sind auch Aufträge, die in Stunde 1 im Shuttle-System eingegangen sind, aber zu Beginn der Stunde 2 noch nicht bearbeitet wurden (die Aufträge befinden sich noch in der Warteschlange). Daher wurden etwas mehr als 450 Aufträge pro Stunde innerhalb der Stunden 2 – 24 bearbeitet und der mittlere Durchsatz ist etwas höher als 450 LE/h.

Optimierungspotential der Reihenfolgesortierung t demnach das Verhältnis der Fahrtzeit zur Lastaufnahmezeit. Die Fahrtzeiten wiederum sind abhängig von der Fahrstrecke, der Beschleunigung und der Geschwindigkeit der Fördermittel. Lange Fahrstrecken führen damit zu einem höheren Einfluss der Reihenfolgesortierung auf das Optimierungspotential, ebenso geringe Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte.

Bei beiden Varianten erhöht sich der Grenzdurchsatz, d. h. die Systeme können einen höheren Auftragseingang dauerhaft bewältigen. Überlastungen des Systems in Phasen mit Auftragspitzen werden bei Anwendung der Reihenfolgesortierung schneller abgearbeitet.

#### 7.2.2.2 Ganggebundenes Shuttle-System

Die Versuche für GG-Systeme zeigen ähnliche Ergebnisse wie im vorherigen Abschnitt 7.2.2.1.

Der Mittelwert des Durchsatzes über 23 Stunden beträgt für Variante 1 mit 250 Auslageraufträgen pro Stunde bei Anwendung der Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ 173,87 LE/h (nur ausgelagerte Ladeeinheiten) und bei der Nicht-Anwendung 168,48 LE/h. Das entspricht einer Durchsatzsteigerung um 3,2 % durch die Reihenfolgesortierung der Aufträge. Es findet ein dauerhaftes Wachstum der Auftragsdurchlaufzeiten statt, das System wird überlastet. Bei 150 Auslageraufträgen pro Stunde findet noch keine Überlastung des Systems statt.

Der Mittelwert des Durchsatzes über 23 Stunden beträgt für Variante 2 mit 250 Auslageraufträgen pro Stunde bei Anwendung der Reihenfolgesortierung 214,04 LE/h (nur ausgelagerte Ladeeinheiten) und bei der Nicht-Anwendung 192,39 LE/h. Das entspricht einer Durchsatzsteigerung um 11,25 % durch die Reihenfolgesortierung der Aufträge. Das System wird bei 150 Auslageraufträgen pro Stunde noch nicht überlastet.

Für ganggebundene Shuttle-Systeme kann dieselbe Schlussfolgerung wie für GEG-Systeme getroffen werden (siehe Abschnitt 7.2.2.1): Längere Fahrwege, geringere Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte und niedrigere Lastaufnahmezeiten erhöhen das Optimierungspotential der Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“.

Die Steigerung des Durchsatzes fällt bei GG-Systemen geringer als bei GEG-Systemen aus, auch der Unterschied der Varianten 1 und 2 ist geringer als bei GEG-Systemen. Das ist u. a. dadurch begründet, dass nur ein Fahrzeugheber pro Gang eingesetzt wird, und daher auch nur ein Heber optimiert wird. Weiterhin ist der Anteil der Stillstandszeiten bei Einzelspielen an der Spielzeit des Fahrzeughebers tendenziell höher als bei einem Behälterheber, da der Fahrzeugheber bei einer Auslagerung zunächst das Shuttle-Fahrzeug erst wieder in einer

Ebene abgeben muss, bevor er ein anderes Shuttle-Fahrzeug mit einer Ladeinheit abholen kann. Bei einer Einlagerung muss der Fahrzeugheber zunächst ein Shuttle-Fahrzeug aus einer Ebene abholen. Da durch die Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ die Fahrtzeit optimiert wird, ist das Optimierungspotential für Fahrzeugheber geringer.

Solange das System nicht dauerhaft überlastet wird, kann die Reihenfolgesortierung der Aufträge dazu beitragen, dass Schwankungen der Auftragsdurchlaufzeit oder der Warteschlangenlänge reduziert werden, da z. B. eingehende Auftragsspitzen schneller abgearbeitet werden.

Das Potential kann aber nur insoweit ausgeschöpft werden, wie die Shuttle-Fahrzeuge die Anforderungen bedienen können (Engpass-Thematik). Bei GEG-Systemen sind häufig die Heber der Engpass, sodass das Optimierungspotential weitgehend oder vollständig ausgeschöpft werden kann. Bei GG-Systemen müssen zur Ausschöpfung des Potentials in Phasen mit Auftragsspitzen ggf. weitere Shuttle-Fahrzeuge im System genutzt werden. Mit jedem weiteren Shuttle-Fahrzeug im System kann der Durchsatz gesteigert werden, allerdings ist der Anstieg mit jedem weiteren Shuttle-Fahrzeug etwas geringer. Der Durchsatz konvergiert in Richtung eines Grenzwertes. Wenn vor der Auftragsspitze eine geringe Anzahl an Shuttle-Fahrzeugen im Einsatz waren (Anzahl Shuttle-Fahrzeuge  $\ll$  Anzahl Ebenen), kann eine Erhöhung der Shuttle-Fahrzeuge sinnvoll sein. Wenn sich allerdings bereits mehrere Shuttle-Fahrzeuge im Shuttle-System befinden, so fällt die Durchsatzsteigerung eher gering aus (Shuttle-Fahrzeuge  $\geq$  (Anzahl Ebenen)/2), siehe [21] und [67].

### 7.3 Lagerreorganisation

#### 7.3.1 Ganggebundenes Shuttle-System

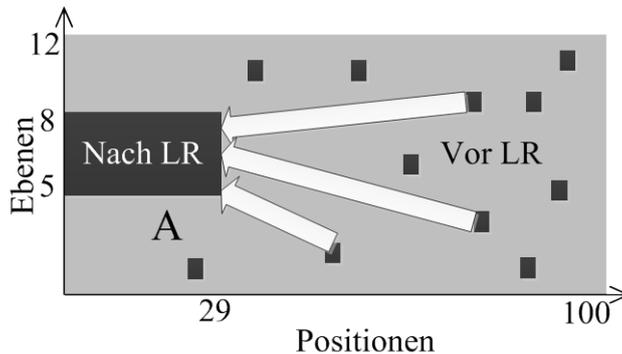
Die Lagerreorganisation kann zur Anpassung einer geänderten Zonierung oder zur Vorbereitung auf bereits bekannte Auslageraufträge des nächsten Arbeitszyklus des Shuttle-Systems angewendet werden<sup>37</sup>. Die Ausgabedaten zur Lagerreorganisation beinhalten die benötigte Zeit für die Umlagerung einer definierten Anzahl von Ladeeinheiten.

In Abbildung 45 wird ein Beispiel zur Vorbereitung auf bereits bekannte Auslageraufträge gezeigt (Varianten 1 und 2, GG-System). Alle Eingangsdatensätze zu den Varianten befinden sich im Anhang E.5. Es sollen 418 Ladeeinheiten an günstige Positionen im vorderen Bereich umgelagert werden, da sie zum nächsten Arbeitszyklus benötigt werden. Der Bereich, in den die Ladeeinheiten umgelagert werden, kann wie eine Zone parametrier

---

<sup>37</sup> Die Versuche dieses Abschnitts wurden im Schlussbericht des Forschungsprojekts „SmartShuttle“ veröffentlicht [71].

werden. Der E/A-Punkt befindet sich zwischen der sechsten und siebten Ebene. Variante 1 enthält schnellere kinematische Parameter, Variante 2 langsamere.



**Abbildung 45: Positionsänderung der Ladeeinheiten durch Lagerreorganisation**

Tabelle 34 zeigt die benötigte Zeit für die Umlagerung von 418 Ladeeinheiten. Weiterhin wird in Tabelle 35 die Zeit zur Abarbeitung der Auslageraufträge im nächsten Arbeitszyklus und entsprechende Durchsatz gezeigt, einmal bei Anwendung der Lagerreorganisation und einmal ohne eine vorherige Lagerreorganisation.

**Tabelle 34: Zeit für Umlagerungen, Varianten 1 und 2**

Bezeichnung	Variante 1	Variante 2
Zeit für Umlagerungen	215 min	560 min

**Tabelle 35: Durchsatz und Bearbeitungszeit, Varianten 1 und 2**

Bezeichnung	Ohne Lagerreorganisation	Lagerreorganisation
Durchsatz Variante 1 [LE/h]	223,92	232,22
Durchsatz Variante 2 [LE/h]	110,00	138,56
Bearbeitungszeit Variante 1 [min]	112	108
Bearbeitungszeit Variante 2 [min]	228	181

Die Bearbeitungszeit der 418 Aufträge (nach Beginn des nächsten Arbeitszyklus) ist für Variante 1 ohne Lagerreorganisation um rund 3 % höher als mit Lagerreorganisation. In Variante 2 ist die Bearbeitungszeit ohne Lagerreorganisation um 26 % höher als mit Lagerreorganisation. In Variante 1 ist der Fahrzeugheber schneller und kann dadurch weniger von den kürzeren Wegstrecken profitieren. Die Shuttle-Fahrzeuge lasten den Heber auch ohne Lagerreorganisation vollständig aus. Das trifft bei Variante 2 nicht zu, hier kann der Fahrzeugheber mehr von den kürzeren Wegstrecken profitieren, da er langsamer agiert. Auch die Shuttle-Fahrzeuge können den Fahrzeugheber bei Anwendung der Lagerreorganisation besser auslasten, da sie ebenfalls langsamer agieren.

Die Beispiele zeigen, dass die Lagerreorganisation für bestimmte Parameterkombinationen günstige Ergebnisse hinsichtlich einer Vorbereitung auf bekannte Auslageraufträge erzielen kann. Wie schon bei der Durchsatzbasierten Einlagerung ist die Thematik ähnlich: Es kommt

darauf an, welche Fördermittel den Engpass bilden. Wenn die Heber vor und nach einer Lagerreorganisation vollständig ausgelastet sind, dann kann eine Optimierung nur über die Wegstrecke des Hebers erfolgen. Sofern die Shuttle-Fahrzeuge der Engpass sind, dann kann eine Optimierung über die Wegstrecken der Shuttle-Fahrzeuge erfolgen.

Bei einer Anpassung der Zonierung aufgrund neuer Artikel und/oder geänderter Zugriffshäufigkeiten ist eine Lagerreorganisation erforderlich (zumindest für eine zeitnahe Zonenumstellung, es ist auch möglich, die Zonen langsam anzupassen, über die neuen Einlagerungen). Dann kann mit dem Simulationsmodell jederzeit ermittelt werden, wie hoch der zeitliche Aufwand für die erforderlichen Umlagerungen ist.

### 7.3.2 Gang- und ebenengebundenes Shuttle-System

Die Parameterwerte des Versuchs befinden sich im Anhang E.6. Die Heber können Doppelspiele ausführen, die Übergabeplätze sind abwechselnd einer Ein- oder Auslagerung zugeordnet, siehe auch Abbildung 10 in Abschnitt 2.2.1. Die Kapazität der Übergabeplätze beträgt eins.

Im hier beschriebenen Szenario wird gezeigt, wie durch die Lagerreorganisation Auftragsdurchlaufzeiten gesenkt sowie der Durchsatz in Phasen mit Spitzenbelastung gesteigert werden kann<sup>38</sup>. Die Ladeeinheiten werden an günstigere Lagerplätze umgelagert. Das Szenario bezieht sich auf eine durchgeführte Lagerreorganisation und vergleicht die Zeit der Auftragsbearbeitung und des Durchsatzes mit dem Fall, dass keine Lagerreorganisation durchgeführt wurde. Dabei wird von einer Bearbeitung von 480 Aufträgen ausgegangen, die umgelagert wurden und sich auf Lagerplätzen nahe dem E/A-Punkt befinden (Ebene 1 – 6, je Ebene die Lagerplätze 1 – 42). Die Artikel waren zuvor (ungünstig) im hinteren Bereich des Lagers platziert, zufallsverteilt auf den Ebenen 6 – 12 und den Lagerplätzen 61 - 100. Jeder Auftrag bezieht sich auf einen Artikel, der einem bestimmten Lagerplatz zugeordnet ist. Abbildung 33 in Abschnitt 5.3 zeigt die Anordnung der 480 Artikel vor und nach der Lagerreorganisation im Shuttle-System. Die dunkelgraue Markierung vorne links zeigt die Lagerplätze der umgelagerten Artikel im Shuttle-System. Die einzeln markierten Lagerplätze rechts symbolisieren die ungünstige Anordnung der Artikel vor der Lagerreorganisation.

Die Lagerreorganisation benötigte für die Durchführung der erforderlichen Umlagerungen 94,6 Minuten.

---

<sup>38</sup> Die in diesem Abschnitt beschriebenen Versuchsergebnisse zur Lagerreorganisation mit GEG-Systemen wurden in [51] veröffentlicht.

In der Phase mit Spitzenbelastung werden in diesem Szenario nur Auslageraufträge ausgeführt, die Heber und Shuttle-Fahrzeuge führen Einzelspiele aus. Auslageraufträge sind häufig zeitkritisch, da diese Lieferfristen haben. Daher kann die Liefertreue in Phasen hoher Auftragseingänge durch die Priorisierung der Auslageraufträge erhöht werden. Die Auslageraufträge werden nach der Durchführung der Lagerreorganisation zufallsverteilt abgearbeitet, dabei werden die Ebenen 1 – 6 und die Lagerplätze 1 – 42 angesteuert. Zum Vergleich werden die Ergebnisse ohne Lagerreorganisation ermittelt, dabei werden die Ebenen 7 – 12 und die Lagerplätze 61 – 100 angesteuert.

Tabelle 36 zeigt die Ergebnisse nach Durchführung der Lagerreorganisation sowie ohne eine Lagerreorganisation. Die kursiv geschriebenen Werte wurden mit dem Simulationsmodell ermittelt, die weiteren mit dem analytischen Modell. Die Ergebnisse zum Durchsatz beziehen sich auf den Durchsatz eines Hebers. Pro Gasse kann der doppelte Durchsatz erzielt werden, da für eine Gasse zwei Heber eingesetzt werden.

**Tabelle 36: Bearbeitungszeit Lagerreorganisation**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Ohne Lagerreorganisation</b>	<b>Lagerreorganisation</b>
Durchsatz [LE/h]	212,13 ( <i>212,81</i> )	509,80 ( <i>500,70</i> )
Bearbeitungszeit [min]	67,88 ( <i>67,67</i> )	28,25 ( <i>28,76</i> )

Die Ergebnisse zeigen den Zeitbedarf für die Lagerreorganisation sowie die Zeitersparnis bei Bearbeitung der Aufträge im nächsten Arbeitszyklus des Shuttle-Systems (z. B. Vorbereitung des Lagers durch die Lagerreorganisation in der Nacht, Bearbeitung der Aufträge in der Frühschicht). Die Bearbeitungszeit konnte durch die Lagerreorganisation mehr als halbiert werden. Der Durchsatz steigt um 140,32 %.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Lagerreorganisation einen wichtigen Beitrag zur Vorbereitung auf bekannte Aufträge des nächsten Arbeitszyklus leisten kann. Die Bearbeitungszeit kann dadurch deutlich gesenkt werden.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden ein analytisches Modell und ein Simulationsmodell zur Ermittlung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen entwickelt. Zur Optimierung des Systemverhaltens wurden Lagerstrategien entwickelt. Es wurde ein analytisches Modell für einfach- und doppeltiefe gang- und ebenengebundene Shuttle-Systeme entwickelt. Weiterhin wurde ein Simulationsmodell für einfach- und doppeltiefe gang- und ebenengebundene und ganggebundene Shuttle-Systeme entwickelt.

Ziel der Arbeit ist es, mit dem analytischen Modell und dem Simulationsmodell einen Beitrag zur Ermittlung und Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen zu leisten, der neue Erkenntnisse zu den Auswirkungen der Lagerstrategien auf Shuttle-Systeme liefert. Die neuen Modelle und Algorithmen sollen von Wissenschaftlern, Planern, Betreibern und Herstellern von Shuttle-Systemen sowie Entwicklern von Steuerungssoftware zur Optimierung eingesetzt werden können. Als Optimierungskriterium wird in dieser Arbeit die Maximierung des Durchsatzes betrachtet.

Die Literaturrecherche zum Stand der Forschung zeigt, dass es inzwischen ein breites Spektrum an Veröffentlichungen zu Shuttle-Systemen gibt. Als besonders relevant für diese Arbeit erweist sich, dass alle veröffentlichten analytischen Modelle die Annahme der Gleichverteilung der Lagerplatzbelegung nutzen. Es konnte keine Modellierung mit einstellbarer Verteilung der Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung gefunden werden. Diese ist für die Anwendung der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ erforderlich. Weiterhin wurde die Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ bisher hauptsächlich angewendet, um eine feste Reihenfolge einzuhalten oder um Blockaden zu vermeiden. Die Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ wurde ebenfalls in keiner Veröffentlichung zu Shuttle-Systemen thematisiert. Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur Schließung dieser Forschungslücke durch die analytische und simulative Modellierung mit einstellbarer Verteilung der Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung und die Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen durch die Lagerstrategien „Durchsatzbasierte Einlagerung“, „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ und „Lagerreorganisation“.

Die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ ordnet Artikel aufgrund von Zugriffshäufigkeiten Zonen zu. Die Lagerplätze werden ebenfalls geeigneten Zonen zugeordnet, mit dem Ziel der Durchsatzsteigerung. Die Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ sortiert die Reihenfolge der Abarbeitung der wartenden Auslageraufträge, mit dem Ziel der Durchsatzsteigerung oder auf Basis eines anderen Kriteriums, wie z. B. die Einhaltung von Prioritäten, Fristen oder festen Vorgaben. In dieser Arbeit wurde die Sortierung mit dem Ziel

der Durchsatzsteigerung erforscht. Die Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ lagert Ladeeinheiten um. Das kann zur Anpassung an eine neue Zonierung oder als Vorbereitung für bekannte Auslageraufträge des nächsten Arbeitszyklus geschehen. Bei der Vorbereitung für bekannte Auslageraufträge werden Ladeeinheiten an geeignete Lagerplätze umgelagert. Mit Beginn des nächsten Arbeitszyklus können die Auslageraufträge dann aufgrund der besseren Positionierung im Lager schneller bearbeitet werden.

Das analytische Modell und das Simulationsmodell benötigen eine Vielzahl an Eingangsgrößen, die verschiedenen Kategorien zugeordnet sind, u. a. die Lagerkonfiguration, die Ganggeometrie und die Kinematik. Das analytische Modell beschreibt das Systemverhalten der Shuttle-Systeme über die Ausgangsgrößen Durchsatz, Spielzeit, Wartezeit und Auslastungsgrad. Das Simulationsmodell ermittelt zusätzlich zu diesen Ausgangsgrößen die Auftragsdurchlaufzeit und die Warteschlangenlänge der wartenden Aufträge.

Im Vergleich zum bestehenden Modell von Lerher [26] zur Ermittlung der Umlagerungszeit bei doppeltiefen Shuttle-Systemen wird nicht angenommen, dass zunächst alle hinteren Lagerplätze der Lagerkanäle vollständig befüllt werden müssen, bevor eine Umlagerung auftreten kann. Dadurch können Lagerstrategien berücksichtigt werden, die die Positionen am Gangende bei geeignetem Lagerfüllgrad nicht zur Einlagerung verwenden. Das ist bei der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ das Bilden einer „Leerzone“ zur Durchsatzsteigerung.

Das analytische Modell wurde für eine einstellbare Verteilung der Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung entwickelt. Das ist neu, bisher vorhandene Modelle können nur gleiche Wahrscheinlichkeiten für die Ansteuerung jedes Lagerplatzes abbilden. Heber und Shuttle-Fahrzeuge können im entwickelten Modell jede Ebene/jeden Lagerplatz mit parametrierbaren Wahrscheinlichkeiten ansteuern. Es wurden Warteschlangenmodelle aus der Literatur für die Ermittlung der Wartezeiten von Hebern und Shuttle-Fahrzeugen interpretiert und angewendet. Das analytische Modell kann die Lagerstrategien „Chaotische Einlagerung“ und „Durchsatzbasierte Einlagerung“ abbilden.

Das Simulationsmodell weist ebenfalls die einstellbare Verteilung der Wahrscheinlichkeit der Lagerplatzansteuerung auf. Es lässt einen variablen Auftragseingang pro Stunde zu. Das Simulationsmodell kann die Lagerstrategien „Chaotische Einlagerung“, „Durchsatzbasierte Einlagerung“, „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ und „Lagerreorganisation“ abbilden.

Zur Optimierung der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ wurden Optimierungsalgorithmen entwickelt, ein A-Priori-Algorithmus (basiert auf Erfahrungswissen) und ein evolutionärer Algorithmus. Beide Algorithmen ordnen Lagerplätzen nach dem Kriterium der

Durchsatzsteigerung Zonen zu und finden eine Lösung, die mit hoher Wahrscheinlichkeit nahe dem wahren Optimum liegt. Zur Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ wurden Algorithmen zur Sortierung der Aufträge entwickelt. Zur Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ wurden Algorithmen zur Umlagerung von Ladeeinheiten aufgrund neuer Zonenzuordnungen der Lagerplätze und Ladeeinheiten entwickelt. Damit lässt sich die Anpassung einer neuen Zonierung oder die Vorbereitung auf bekannte Aufträge des nächsten Arbeitszyklus realisieren.

Das Simulationsmodell wurde mit den Methoden Animation, Trace-Analyse, Expertenanalyse sowie Vergleich der Ergebnisse der Literatur und realer Systeme validiert. Das analytische Modell wurde mit dem Simulationsmodell validiert. Es wurde ein Versuchsplan nach individuellen Kriterien mit 50 Versuchen aufgestellt. Ziel des Versuchsplans ist die Abdeckung eines realitätsnahen Parameterraums. Die Eingangsgrößen wurden zu Faktoren verdichtet. Für jeden Faktor wurden Stufen definiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das analytische Modell ein sehr geringes Fehlermaß aufweist. Für den mittleren Durchsatz betragen alle Abweichungen einen kleineren Wert als 2 %. Das analytische Modell kann auf Basis der Versuchsergebnisse zur Anwendung und Erforschung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen als geeignet angenommen werden.

Durch Studien mit dem analytischen Modell und dem Simulationsmodell konnten die Potentiale der Lagerstrategien „Durchsatzbasierte Einlagerung“, „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ und „Lagerreorganisation“ quantifiziert werden. Die Ergebnisse zeigen Durchsatzsteigerungen bei Anwendung der Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerungen“ bis zu 54 %. Bei Anwendung der Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ zeigen die Ergebnisse eine Durchsatzsteigerung bis zu 25 %. Die Ergebnisse zur Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ zeigen eine Reduzierung der Bearbeitungszeit der Aufträge in der nächsten Betriebsphase des Shuttle-Systems um über die Hälfte, entsprechend steigt der Durchsatz um mehr als das Doppelte.

Durch die Studien konnten auch Eingangsgrößen auf das Optimierungspotential der Lagerstrategien ermittelt werden. Mit den Modellen können die Auswirkungen der Änderungen der Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen erforscht werden und neue Erkenntnisse zum Systemverhalten gewonnen werden, oder logisch begründete oder zumindest vermutete Zusammenhänge bestätigt oder auch widerlegt werden. Einige der in dieser Arbeit erforschten und quantifizierten Zusammenhänge zum Systemverhalten von Shuttle-Systemen werden im Folgenden beispielhaft genannt.

Inwieweit die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ und „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ zu einer Durchsatzsteigerung führen, ist von mehreren Eingangsgrößen abhängig. Mit steigender Höhe des Shuttle-Systems steigt das Potential zur Durchsatzsteigerung, da durch eine Zonierung und/oder eine Sortierung der Aufträge häufig die Fahrwege des Hebers reduziert werden können. Mit steigenden Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerten des Hebers sinkt das Potential zur Durchsatzsteigerung, da diese die Fahrtzeiten und damit auch den Einfluss der Länge des Fahrweges reduzieren. Mit sinkenden Lastaufnahmezeiten des Hebers steigt das Potential zur Durchsatzsteigerung, da dann die Fahrwege (und damit die Fahrtzeiten) einen höheren Einfluss auf den Durchsatz haben. Spezifisch für die Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ übt die Größe der ersten Zone und deren Zugriffshäufigkeit einen hohen Einfluss auf das Potential zur Durchsatzsteigerung aus. Eine abnehmende Zonengröße und eine zunehmende Zugriffshäufigkeit erhöhen das Potential zur Durchsatzsteigerung. Spezifisch für die Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ übt die Anzahl der wartenden Aufträge einen Einfluss auf das Potential zur Durchsatzsteigerung aus, eine steigende Anzahl wartender und für den Heber erreichbarer Aufträge führt zu einem zunehmenden Potential zur Durchsatzsteigerung.

Die Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ kann zur Anpassung einer neuen Zonierung eingesetzt werden. Durch die bessere Platzierung der Ladeeinheiten entsprechend der Zugriffshäufigkeiten kann der Durchsatz erhöht werden. Dabei führt eine zunehmende Anzahl an umgelagerten Ladeeinheiten an erlaubte Lageplätze zu einer Steigerung des Potentials zur Durchsatzsteigerung. In anderen Worten: Je weniger die neue Zonierung Ähnlichkeiten mit der bisherigen aufweist, desto eher wird der Durchsatz nach Durchführung der Lagerreorganisation gesteigert. Bei einer Vorbereitung auf bekannte Aufträge des nächsten Arbeitszyklus hat die Anzahl der bekannten Aufträge einen Einfluss auf das Potential zur Durchsatzsteigerung. Je mehr Aufträge vor dem Arbeitszyklus bekannt sind, desto höher ist das Potential zur Durchsatzsteigerung nach Durchführung der Lagerreorganisation. Mit dem Simulationsmodell lässt sich ermitteln, wie viel Zeit die Durchführung in Anspruch nimmt. Die Dauer der Durchführung der Lagerreorganisation ist u. a. vom Lagerfüllgrad und der Anzahl der umzulagernden Ladeeinheiten abhängig. Wenn wenige Lagerplätze frei sind, so müssen die Lagerplätze zunächst befreit werden, was zu weiteren Umlagerungen und damit zu einer Verlängerung der Dauer führt. Häufige Ebenenwechsel (weil in der Ebene für die umzulagernde Ladeeinheit kein Lagerplatz zur Verfügung steht) führen ebenfalls zu einer Verlängerung der Dauer.

Das Ziel dieser Arbeit wurde erreicht. Mit dem analytischen Modell und dem Simulationsmodell ist ein Beitrag zur Ermittlung und Optimierung des Systemverhaltens von Shuttle-

Systemen geschaffen worden, der neue Erkenntnisse zu den Auswirkungen der Lagerstrategien auf das Systemverhalten von Shuttle-Systemen liefert. Zudem ist die Parametrierung eines Teils der in dieser Arbeit entwickelten Simulationsmodelle über eine Website öffentlich zugänglich für die Erforschung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen, im Rahmen des Forschungsprojekts „SmartShuttle“.

Ausblick: Das analytische Modell und das Simulationsmodell sind erweiterbar um Lagerkonfigurationen und Lagerstrategien. Mit den entwickelten Modellen können weitere Zusammenhänge der Eingangsgrößen zum Systemverhalten erforscht werden. Die wahrscheinlichkeitstheoretische Modellierung zur Abbildung einer einstellbaren Verteilung der Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung und der Ansatz zur Ermittlung der Umlagerungszeit bei doppeltiefen Shuttle-Systemen kann auf andere Systeme angepasst oder erweitert werden. Die in dieser Arbeit entwickelten Algorithmen können von Herstellern und Betreibern von Shuttle-Systemen für die Steuerung ihrer Shuttle-Systeme übernommen werden, um das Systemverhalten zu optimieren. Zur Lagerstrategie „Durchsatzbasierte Einlagerung“ können Ausnahmeregeln für die Einlagerung in Zonen und deren Einfluss auf den „Unschärfefaktor“, den Füllgrad der Zonen und den Durchsatz erforscht werden. Zur Lagerstrategie „Reihenfolgesortierung der Aufträge“ können weitere Sortierregeln entwickelt werden. Zur Lagerstrategie „Lagerreorganisation“ können weitere Algorithmen entwickelt werden, mit dem Ziel einer weiteren Optimierung der Umlagerungszeit.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] VDI-2692, Shuttle-Systeme für kleine Ladeeinheiten, Blatt 1, Berlin: Beuth-Verlag, 2015.
- [2] R. Irrgang, Skalierbar und vielseitig: Shuttles erobern alle Branchen, <http://www.materialfluss.de/forder-und-hebetechnik/regalbediengerate/skalierbar-und-vielseitig-shuttles-erobern-alle-branchen>, Artikel vom 17.06.2016, Abruf der Website am 25.01.2018, 2016.
- [3] M. Diehn, Shuttlesysteme vs Regalbediengerate: Keine Frage des Geschmacks, <http://www.materialfluss.de/forder-und-hebetechnik/regalbediengerate/shuttlesysteme-vs-regalbediengerate-keine-frage-des-geschmacks>, Artikel vom 11.03.2015, Abruf am 25.01.2018, 2015.
- [4] Hebezeuge-Fördermittel, Regalbediengerät oder Shuttle?, [https://www.hebezeuge-foerdermittel.de/sites/default/files/Fachartikel/PDF/HF\\_2017\\_09\\_Regalbediengerat-oder-Shuttle\\_.pdf](https://www.hebezeuge-foerdermittel.de/sites/default/files/Fachartikel/PDF/HF_2017_09_Regalbediengerat-oder-Shuttle_.pdf), Artikel von 9/2017, abgerufen am 30.11.2018, 2017, S. 49.
- [5] VDI-4480, Durchsatz von automatischen Lagern, Blatt 1 - 4, Beuth-Verlag Berlin, 1998.
- [6] H. Ehrmann, Logistik, 6. Auflage, Kiel-Verlag, 2008.
- [7] A. Law, Simulation Modeling and Analysis, 5. Auflage, McGraw-Hill Education - Europe, 2014.
- [8] M. Rabe, Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken, Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [9] M. ten Hompel, T. Schmidt und J. Dregger, Materialflusssysteme, Förder- und Lagertechnik, Berlin: Springer-Verlag, 4. Auflage, 2018.
- [10] F. Schloz, T. Kriehn, K.-H. Wehking und M. Fittinghoff, Durchsatzoptimierung von Shuttle-Systemen durch situationsabhängige Lagerstrategien, Proceedings der Logistikmanagement-Konferenz der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2017.
- [11] T. Kriehn, F. Schloz, K.-H. Wehking und M. Fittinghoff, Storage management policies for throughput optimization of shuttle-based storage and retrieval systems, Proceedings

- of the XXII International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics, Planeta Print, Serbien, Belgrad, 2017, S. 177 - 184.
- [12] M. H. Han, L. F. McGinnis, J. S. Shieh und J. A. White, On sequencing retrievals in an automated storage/retrieval system, *IE Transactions*, 1987, S. 56 - 66.
- [13] N. Kosanic, G. Milojevic und N. Zrnica, A review on shuttle based storage and retrieval systems, *Proceedings of the XXII International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics*, Planeta Print, Serbien, Belgrad, 2017, S. 211 - 215.
- [14] D. Baum, *Grundlagen der Warteschlangentheorie*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [15] D. G. Kendall, Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of embedded Markov chains, *Annals of Mathematical Statistics*, Jg. 24, Nr. 3, 1953, S. 338 - 354.
- [16] P.-H. Kuo, A. Krishnamurthy und C. J. Malmborg, Design models for unit load storage and retrieval systems using autonomous vehicle technology and resource conserving storage and dwell point policies, *Applied Mathematical Modelling* 31, 2007, S. 2332 - 2346.
- [17] M. Fukunari und C. J. Malmborg, An efficient cycle time model for autonomous vehicle storage and retrieval systems, *International Journal of Production Research*, Jg. 46, Nr. 12., 2008, S. 3167 - 3184.
- [18] J. Smith, Optimal Design and Performance Modelling of M/G/1/K Queueing Systems, *Mathematical and computer modelling*, Jg. 39, Nr. 9, 2004, S. 1049 - 1081.
- [19] X. Cai, S. Heragu und Y. Liu, Modeling and evaluating the AVS/RS with tier-to-tier vehicles using a semi-open queueing network, *IIE Transactions*, Jg. 46, Nr. 9, 2014, S. 905 - 927.
- [20] M. Epp, Performance evaluation of shuttle-based storage and retrieval systems using discrete-time queueing networks, *Dissertation*, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2017.
- [21] T. Kriehn, Entwicklung eines analytischen Modells zur Ermittlung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen mit Fahrzeugliften, *Universität Stuttgart, Master-Thesis*, 2018.

- [22] M. Borovinsek, B. Y. Ekren, A. Burinskiene und T. Lerher, Multi-objective optimisation model of shuttle-based storage and retrieval system, *Transport*, 2017, Jg. 32, Nr. 2, 2017, S. 120 - 137.
- [23] M. Eder und G. Kartnig, Durchsatzoptimierung von Shuttle-Systemen mithilfe eines analytischen Berechnungsmodells, *Logistics Journal, Proceedings*, 2016.
- [24] B. Y. Ekren, A. Akpunar, Z. Sari und T. Lerher, A Queuing Network Approach for Performance Estimation of Shuttle Based Storage and Retrieval System Design, *Proceedings of the XXII International Conference on Material Handling, Construction and Logistics*, Planeta Print, Serbien, Belgrad, 2017, S. 185 - 188.
- [25] M. Epp, S. Wiedemann und K. Furmanns, A discrete-time queueing network approach to performance evaluation of autonomous vehicle storage and retrieval systems, *International Journal of Production Research*, Jg. 55, Nr. 4, 2017, S. 960 - 978.
- [26] T. Lerher, Travel time model for double-deep shuttle-based storage and retrieval system, *International Journal of Production Research*, Jg. 54, Nr. 9, 2016, S. 2519 - 2540.
- [27] T. Lerher, B. Ekren, G. Dukic und B. Rosi, Travel time model for shuttle-based storage and retrieval systems, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 78, Nr. 9, S. 1705 - 1725.
- [28] G. Marchet, M. Melacini, S. Perotti und E. Tappia, Analytical model to estimate performances of autonomous vehicle storage and retrieval systems for product totes, *International Journal of Production Research*, Jg. 50, Nr. 24, 2012, S. 7134 - 7148.
- [29] B. Zou, X. Xu, Y. Gong und R. Koster, Modeling parallel movement of lifts and vehicles in tier-captive vehicle-based warehousing systems, *European Journal of Operational Research*, Jg. 254, Nr. 1, 2016, S. 51 - 67.
- [30] F. Schloz, T. Kriehn, K.-H. Wehking und M. Fittinghoff Entwicklung situationsabhängiger Lagerstrategien für Hochregallager mit autonomen Fahrzeugen, *Logistics Journal Proceedings*, 2017.
- [31] B. Y. Ekren, S. Heragu, A. Krishnamurthy und C. J. Malmborg, An Approximate Solution for Semi-Open Queueing Network Model of an Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System, *Jg. 10, IEEE Transactions on Automation Science and*

Engineering, 2013, S. 205 - 215.

- [32] B. Y. Ekren, S. Heragu, A. Krishnamurthy und C. J. Malmberg, Matrix-geometric solution for semi-open queueing network model of autonomous vehicle storage and retrieval system, Jg. 68, Computers & Industrial Engineering, 2014, S. 78 - 86.
- [33] B. Y. Ekren und S. Heragu, Simulation-based regression analysis for the rack configuration of an autonomous vehicle storage and retrieval system, Jg. 48, International Journal of Production Research, 2010, S. 6257 - 6274.
- [34] M. Fukunari und C. J. Malmberg, A network queuing approach for evaluation of performance measures in autonomous vehicle storage and retrieval systems, European Journal of Operational Research, Jg. 193, Nr. 1., 2009, S. 152 - 167.
- [35] S. Heragu, X. Cai, A. Krishnamurthy und C. J. Malmberg, Analysis of Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System by Open Queueing Network, Proceedings of the 5th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering, 22. - 25.08.2009, Indien, 2009, S. 455 - 459.
- [36] C. J. Malmberg, Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems, International Journal of Production Research, Jg. 40 (8), 2002, S. 1807 - 1822.
- [37] C. J. Malmberg, Design optimization models for storage and retrieval systems using rail guided vehicles, Jg. 27, Applied Mathematical Modelling, 2003, S. 929 - 941.
- [38] D. Roy, A. Krishnamurthy, H. Sunderesh und C. J. Malmberg, Impact of Zones on Troughput and Cycle Times in Warehouses with Autonomous Vehicles, Bangalore: IEEE Conference on Automation Science and Engineering, 2009, S. 449 - 454.
- [39] D. Roy, A. Krishnamurthy, S. Heragu und C. J. Malmberg, Vehicle interference effects in warehousing systems with autonomous vehicles, 2010: Proceedings of the 6th IEEE Conference on Automation Science and Engineering, 21.-24.08.2010, Kanada, S. 674 - 679.
- [40] D. Roy, A. Krishnamurthy, S. Heragu und C. J. Malmberg, Performance analysis and design trade-offs in warehouses with autonomous vehicle technology, IIE Transactions, Jg. 44, Nr. 12, 2012, S. 1045 - 1060.
- [41] D. Roy, A. Krishnamurthy, S. Heragu und C. J. Malmberg, Blocking Effects in Warehouse Systems With Autonomous Vehicles, Transactions on Automation Science

- and Engineering, Jg. 11, Nr. 2, 2014, S. 439 - 451.
- [42] D. Roy, A. Krishnamurthy, S. Heragu und C. J. Malmborg, Queueing models to analyze dwell-point and cross-aisle location in autonomous vehicle-based systems, *European Journal of Operational Research*, Jg. 242, Nr. 1, 2015, S. 72 - 87.
- [43] E. Tappia, D. Roy, R. De Koster und M. Melacini, Modeling, Analysis, and Design Insights for Shuttle-based Compact Storage Systems, *Transportation Science*, Jg. 51, Nr. 1, 2016, S. 269 - 295.
- [44] S. Heragu, X. Cai, A. Krishnamurthy und C. J. Malmborg, Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems, *International Journal of Production Research*, Jg. 49, Nr. 22, 2011, S. 6833 - 6861.
- [45] D. Roy, A. Krishnamurthy, S. Heragu und C. J. Malmborg, A multi-tier linking approach to analyze performance of autonomous vehicle-based storage and retrieval systems, *Computer and Operations Research*, Jg. 83, 2017, S. 173 - 188.
- [46] H. Carlo, I. Vis, Sequencing dynamic storage systems with multiple lifts and shuttles, *International Journal of Production Economics*, Jg. 140, Nr. 2, 2012, S. 844 - 853.
- [47] M. Güller und T. Hegmanns, Simulation-Based Performance Analysis of a Miniload Multishuttle Order Picking System, *Procedia CIRP*, Jg. 17, 2014, S. 475 - 480.
- [48] Y. Ha und J. Chae, Free balancing for a shuttle-based storage and retrieval system, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Jg. 82, 2018, S. 12 - 31.
- [49] S. Kaczmarek, J. Goldenstein und M. ten Hompel, Performance Analysis of Autonomous Vehicle Storage and Retrieval Systems Depending on Storage Management Policies, *Proceedings of the 21st International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2014*, 2015, S. 1424 - 1428.
- [50] B. Y. Ekren, Z. Sari und T. Lerher, Warehouse design unter class-based storage policy of shuttle-based storage and retrieval system, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 48, Nr. 3, 2015, S. 1152 - 1154.
- [51] T. Kriehn, F. Schloz, K.-H. Wehking und M. Fittinghoff, Impact of Class-Based Storage, Sequencing of Retrieval Requests and Warehouse Reorganisation on Throughput of Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems, *FME Transactions*, Jg. 46, Nr. 3, Serbien, Belgrad, 2018, S. 320 - 329.

- [52] Kriehn, T., F. Schloz, K.-H. Wehking und M. Fittinghoff, Generierung von Simulationsmodellen zur Ermittlung des Systemverhaltens von Shuttle-Systemen, Fachtagung der ASIM/GI Fachgruppen STS und GMM, Heilbronn, 2018, S. 119 - 124.
- [53] T. Lerher, M. Borovinsek, M. Ficko und I. Palcik, Parametric Study of Throuppgut Performance in SBS/RS based on Simulation, International Journal of Simulation Modelling, Jg. 16, 2017, S. 96 - 107.
- [54] T. Lerher, Design of Eperiments for Identifying the Throuppgut Performance of Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems, Proceedings from the 10th International Scientific Conference Transbaltica 2017, Procedia Engineering 187, 2017, S. 324 - 387.
- [55] G. Marchet, M. Melacini, S. Perotti und E. Tappia, Development of a framework for the design of autonomous vehicle storage and retrieval systems, International Journal of Production and Research, Jg. 51, Nr. 14, 2013, S. 4365 - 4387.
- [56] Z. Ning, L. Lei, Z. Saipeng und G. Lodewijks, An efficient simulation model for rack design in multi-elevator shuttle-based storage and retrieval system, Simulation Modelling Practice and Theory, Jg. 67, 2016, S. 100 - 116.
- [57] S. Zhang, N. Zhao und Y. Zhao, Universal Simulation Model of Autonomous Vehicle Storage & Retrieval System, Proceedings of the 21st International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2014, 2015, S. 325 - 330.
- [58] J. A. Pazour und H. J. Carlo, Warehouse reshuffling: Insights and optimization, Jg. 73, Transportation Research, 2015, S. 207 - 226.
- [59] H. J. Carlo und G. E. Giraldo, Toward perpetually organized unit-load warehouses, Computers & Industrial Engineering 63, Nr. 4, 2012, S. 1003 - 1012.
- [60] L. Chen, A. Langevin und D. Riopel, A tabu search algorithm for the relocation problem in a warehousing system., International Journal of Production and Economics Jg. 129, Nr. 1, 2011, S. 147 – 156.
- [61] B. Y. Ekren, S. Heragu, A. Krishnamurthy und C. J. Malmborg, Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS, Jg. 58, Computers & Industrial Engineering, 2010, S. 175 - 185.
- [62] B. Y. Ekren und S. Heragu, Simulation based performance analysis of an autonomous vehicle storage and retrieval system, Jg. 19, Simulation Modelling Practice and Theory,

- 2011, S. 1640 - 1650.
- [63] B. Y. Ekren und S. Heragu, Performance comparison of two material handling systems: AVS/RS and CBAS/RS, *International Journal of Production Research*, Jg. 50, Nr. 15, 2012, S. 4061 - 4074.
- [64] Y. Fang und M. Tang, The AVS/RS Scheduling Optimization Based on Improved AFSA, Jg. 7, *International Journal of Control and Automation*, 2014, S. 53 - 64.
- [65] M. Fukunari, K. P. Bennett und C. J. Malmborg, Decision-Tree Learning in Dwell Point Policies in Autonomous Vehicle Storage and Retrieval Systems (AVSRS), *Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Applications*, USA, 2004, S. 81 - 84.
- [66] A. Kumar, D. Roy und M. K. Tiwan, Optimal partitioning of vertical zones in vehicle-based warehouse systems, Jg. 52, *International Journal of Production Research*, 2014, S. 1285 - 1305.
- [67] A. Langanke, T. Kriehn, F. Schloz, K.-H. Wehking, S. Kuhlins und M. Fittinghoff, Praxisbeispiel: Simulationsmodell eines Shuttle-Systems zur Ermittlung des Systemverhaltens, *Proceedings des 24. Symposium Simulationstechnik*, Hamburg, 2018, S. 171 - 174.
- [68] T. Lienert und W. Günthner, Development and simulation-based evaluation of an algorithm for the retrieval-in-sequence for shuttle systems, *Proceedings of the European Modeling and Simulation Symposium*, 2016, S. 15 - 24.
- [69] T. Lienert und J. Fottner, No more Deadlocks - Applying the Time Window Routing Method to Shuttle Systems, *Proceedings of the 31st European Conference on Modelling and Simulation*, Ungarn, Budapest, 2017, S. 169 - 175.
- [70] T. Lienert und J. Fottner, Routing-based Sequencing Applied to Shuttle Systems, *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, Hawaii, USA, 2018, S. 2949 - 2954.
- [71] T. Gudehus, *Grundlagen der Kommissioniertechnik – Dynamik der Warenvertei- und Lagersysteme*, W. Girardet, Essen, 1973.
- [72] T. Kriehn, F. Schloz, E. Vangjeli, R. Schulz und M. Fittinghoff, Entwicklung situationsabhängiger Lagerstrategien unter Berücksichtigung des Durchsatzes und der

- Energieeffizienz, Forschungsbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 19508N, Hochschule Heilbronn, Universität Stuttgart, 2019.
- [73] VDI-3633, Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Beuth-Verlag, Berlin, 2014.
- [74] J. Banks, J. S. Carson und B. L. Nelson, Discrete-Event System Simulation, 5. Auflage, Pearson, 2013.
- [75] R. Kruse, C. Borgelt, F. Klawonn, C. Moewes, G. Ruß und M. Steinbrecher, Computational Intelligence, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [76] I. Meinhardt und T. Schmidt, Wie gut ist die VDI-Richtlinie 2692 „Shuttle-Systeme für kleine Ladeeinheiten“?, Tagungsband zum Forum Technische Logistik und Arbeitssysteme, Dresden, 2016.
- [77] L. Papula, Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Band 3, 7. Auflage, Springer Verlag, Wiesbaden 2016.
- [78] K. Siebertz, D. van Bebber und T. Hochkriegen, Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments, Springer-Vieweg, Berlin, 2017.
- [79] H. Bandemer und A. Bellmann, Statistische Versuchsplanung, Teubner Verlag, Leipzig, 1994.
- [80] FEM-9.860, Cycle time calculation for automated vehicle storage and retrieval systems, VDMA Verlag, Stuttgart, 2017.
- [81] T. Kriehn, F. Schloz, R. Schulz und M. Fittinghoff, Algorithm and analytical model to optimize class-based storage of shuttle-based storage and retrieval systems, XXIII International conference on „material handling, construction and logistics“, Wien, 2019, S. 209 - 215.

## A Beispiele

### A.1 Beispiel zur Modellierung der Wahrscheinlichkeiten der Lagerplatzansteuerung

Die Wahrscheinlichkeit der Ebenen erfolgt aus folgender Festlegung einer Zonierung für ein einfachtiefes Lager (dann entspricht ein Kanal einem Lagerplatz): 70 % Ansteuerung der Zone A mit 600 Lagerplätzen, 20 % Ansteuerung der Zone B mit 800 Lagerplätzen und 10 % Ansteuerung der Zone C mit 1000 Lagerplätzen. Jeder Lagerplatz wird einer Zone zugeteilt. Dieser Lagerplatz hat dann eine Wahrscheinlichkeit der Ansteuerung, die sich aus der Wahrscheinlichkeit der Zonenansteuerung dieser Zone, dividiert durch die Anzahl der Lagerplätze dieser Zone, ergibt. Ein Lagerplatz der Zone A wird mit einer Wahrscheinlichkeit von  $\frac{0,7}{600} = 0,0011\bar{6}$  angesteuert, ein Lagerplatz der Zone B mit  $\frac{0,2}{800} = 0,00025$ , ein Lagerplatz der Zone C mit  $\frac{0,1}{1000} = 0,0001$ . Wenn die erste Ebene 200 Lagerplätze enthält und davon 50 Lagerplätze der Zone A zugeordnet sind, 60 Lagerplätze der Zone B und 90 Lagerplätze der Zone C, so ergibt die Berechnung der Wahrscheinlichkeit der Ebenenansteuerung der Ebene 1:  $w_{1,y} = 50 * \frac{0,7}{600} + 60 * \frac{0,2}{800} + 90 * \frac{0,1}{1000} = 0,0823$ .

### A.2 Beispiele zur Berechnung der Umlagerwahrscheinlichkeit in einem doppeltiefen Gang

Das Shuttle-System hat einen Kanal mit 50 Lagerpositionen pro Gang, d. h. 100 Lagerkanäle pro Gang (links und rechts zu jeder Position befindet sich ein Kanal). Der Lagerfüllgrad beträgt 50 %. 25 % der Lagerkanäle sind doppelt belegt (zu 50 % wird ein LP im Kanal belegt, zu 50 % anschließend ein weiterer LP im selben Kanal =  $0,5 * 0,5 = 0,25 = 25$  %). 50 % sind einfach belegt (zu 50 % wird der erste LP im Kanal belegt und zu 50 % der zweite LP im Kanal nicht belegt, sowie zu 50 % wird der erste LP im Kanal belegt und zu 50 % wird der zweite LP im Kanal nicht belegt =  $0,5 * 0,5 + 0,5 * 0,5 = 0,5 = 50$  %). Dann sind 25 % der Ladeeinheiten in einem verdeckten Lagerplatz eingelagert, d. h. die Umlagerwahrscheinlichkeit beträgt 25 %. Weitere 25 % der Ladeeinheiten befinden sich in einem doppelt belegten Lagerkanal, aber im vorderen Lagerplatz, 50 % der Ladeeinheiten befinden sich in einem einfach belegten Lagerkanal.

Bei einem dreifachtiefen Shuttle-System mit einem Lagerfüllgrad von 70 % und einer prozentualen Dreifach-Belegung von 34,3 %, einer prozentualen Zweifach-Belegung von 44,1 % ergibt folgende Berechnung  $(0,343 * 2 + 0,441 * 1) / (0,7 * 3) = 0,5367$ . Von den 34,3 % sind 2 Ladeeinheiten verdeckt, bei den 44,1 % ist eine Ladeeinheit verdeckt. Die

Summe ergibt den Anteil der verdeckten Ladeeinheiten. Im Nenner wird der Anteil aller Ladeeinheiten berechnet. Wenn die Berechnung mit tatsächlichen Lagerplätzen durchgeführt wird, ist es ersichtlich: 50 Lagerpositionen pro Gang, d. h. insgesamt 100 Lagerkanäle = 300 Lagerplätze. Die Anzahl der Ladeeinheiten, die in diesem Gang verdeckt sind, wird wie folgt berechnet:  $0,343 * 100 * 2 + 0,441 * 100 * 1 = 112,7$ . Die Anzahl der Ladeeinheiten, die insgesamt in diesem Gang eingelagert sind, wird wie folgt berechnet:  $0,7 * 3 * 100 = 210$ .

Die Umlagerwahrscheinlichkeit wird wie folgt berechnet:  $\frac{\text{Verdeckte Ladeeinheiten}}{\text{Alle Ladeeinheiten}} = \frac{112,7}{210} = 0,5367$ .

## B Wartezeitmodell

Die Grundüberlegung zur Wartezeit geht bei der Annahme ständig vorhandener Aufträge für die Fördermittel von der Ermittlung des Engpasses aus. Durch die Übergabeplätze sind Heber und Shuttle-Fahrzeuge weitgehend voneinander entkoppelt.

### B.1 Einzelspiel Heber und Einzelspiel Shuttle-Fahrzeug

#### Einlagerung - Einfachtief

##### *Durchsatz*

Der insgesamt, d. h. über alle Ebenen, erzielte Durchsatz eines Behälterhebers ist  $D_{ES,E,y}$ , ohne Berücksichtigung einer Wartezeit. Der insgesamt erreichbare Durchsatz der Shuttle-Fahrzeuge über alle Ebenen ist  $D_{ES,x}$ .

Der Durchsatz, der durch den Heber in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{ES,E,y(k)}$ . Der Durchsatz, der durch das Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{ES,x(k)}$ .

Der erreichbare mittlere Durchsatz für den Heber  $D_{ES,E,w,y}$  und für das Shuttle-Fahrzeug  $D_{ES,w,x(k)}$  in der Ebene  $k$  wird wie folgt ermittelt:

$$D_{ES,E,w,y(k)} = \begin{cases} \min(D_{ES,E,y(k)}, D_{ES,x(k)}), & \text{ein aktiver Behälterheber} \\ \frac{1}{2} \min(2D_{ES,E,y(k)}, D_{ES,x(k)}), & \text{zwei aktive Behälterheber} \end{cases} \quad \text{B.1}$$

$$D_{ES,w,x(k)} = \begin{cases} D_{ES,E,w,y(k)}, & \text{ein aktiver Behälterheber} \\ 2D_{ES,E,w,y(k)}, & \text{zwei aktive Behälterheber} \end{cases} \quad \text{B.2}$$

Das Wort „aktiv“ unterscheidet in diesem Zusammenhang zwischen tatsächlich vorhandenen Behälterhebern in einem Gang, und den für den betrachteten Fall aktiv genutzten Behälterhebern. Beispielsweise kann ein Gang zwar zwei Behälterheber enthalten, aber ein Heber ist für Einlagerungen, der andere für Auslagerungen zuständig. Dann wird bei der Bearbeitung von Einlagerungen oder Auslagerungen auch nur der entsprechende Heber aktiv. Wenn für diesen Fall z. B. nur Einlageraufträge betrachtet werden, dann kann auch nur der Durchsatz eines Hebers berücksichtigt werden.

Der Heber und ebenso alle Shuttle-Fahrzeuge im Gang erreichen insgesamt, über alle Ebenen  $k$ , folgenden mittleren Durchsatz:

$$D_{ES,E,w,y} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{ES,E,w,y}(k) \quad \text{B.3}$$

$$D_{ES,w,x} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{ES,w,x}(k) \quad \text{B.4}$$

### **Spielzeit**

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für den Heber in der Ebene  $k$ :

$$t_{ES,E,w,y}(k) = \frac{3600}{D_{ES,E,w,y}(k)} \quad \text{B.5}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für den Heber insgesamt:

$$t_{ES,E,w,y} = \frac{3600}{D_{ES,E,w,y}} \quad \text{B.6}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{ES,w,x}(k) = \frac{3600}{D_{ES,w,x}(k)} \quad \text{B.7}$$

Die mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang, mit Berücksichtigung der Wartezeit, ergibt:

$$t_{ES,w,x} = n_y \frac{3600}{D_{ES,w,x}} \quad \text{B.8}$$

### **Wartezeit**

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit des Hebers in der Ebene  $k$  gilt:

$$t_{w,ES,E,y}(k) = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,E,w,y}(k)} - \frac{1}{D_{ES,E,y}(k)} \right) \quad \text{B.9}$$

Die für den Heber insgesamt auftretende mittlere Wartezeit ist demnach:

$$t_{w,ES,E,y} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,E,w,y}} - \frac{1}{D_{ES,E,y}} \right) \quad \text{B.10}$$

Die mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{w,ES,x(k)} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,w,x(k)}} - \frac{1}{D_{ES,x(k)}} \right) \quad \text{B.11}$$

Die mittlere auftretende Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ist damit:

$$t_{w,ES,x} = 3600 \left( \frac{n_y}{D_{ES,w,x}} - \frac{n_y}{D_{ES,x}} \right) \quad \text{B.12}$$

### **Auslastungsgrad**

Der mittlere Auslastungsgrad eines Hebers in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{ES,E,y(k)} = \frac{D_{ES,E,w,y(k)}}{D_{ES,E,y(k)}} \quad \text{B.13}$$

Der mittlere Auslastungsgrad des Hebers insgesamt ist:

$$\eta_{ES,E,y} = \frac{D_{ES,E,w,y}}{D_{ES,E,y}} \quad \text{B.14}$$

Der mittlere Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{ES,x(k)} = \frac{D_{ES,w,x(k)}}{D_{ES,x(k)}} \quad \text{B.15}$$

Der mittlere Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ist:

$$\eta_{ES,x} = \frac{D_{ES,w,x}}{D_{ES,x}} \quad \text{B.16}$$

### **Einlagerung – Doppeltief**

#### **Durchsatz**

Der insgesamt, d. h. über alle Ebenen, erzielte Durchsatz eines Behälterhebers ist  $D_{ES,E,y}$ , ohne Berücksichtigung einer Wartezeit. Der insgesamt erreichbare Durchsatz der Shuttle-Fahrzeuge über alle Ebenen ist  $D_{ES,DTE,x}$ .

Der Durchsatz, der durch den Heber in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{ES,E,y(k)}$ . Der Durchsatz, der durch das Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{ES,DTE,x(k)}$ .

Der erreichbare mittlere Durchsatz für den Heber  $D_{ES,DTE,w,y(k)}$  und für das Shuttle-Fahrzeug  $D_{ES,DTE,w,x(k)}$  in der Ebene  $k$  wird wie folgt ermittelt:

$$D_{ES,DTE,w,y(k)} = \begin{cases} \min(D_{ES,E,y(k)}, D_{ES,DTE,x(k)}), & \text{ein aktiver Behälterheber} \\ \frac{1}{2} \min(2D_{ES,E,y(k)}, D_{ES,DTE,x(k)}), & \text{zwei aktive Behälterheber} \end{cases} \quad \text{B.17}$$

$$D_{ES,DTE,w,x(k)} = \begin{cases} D_{ES,DTE,w,y(k)}, & \text{ein aktiver Behälterheber} \\ 2D_{ES,DTE,w,y(k)}, & \text{zwei aktive Behälterheber} \end{cases} \quad \text{B.18}$$

Der Heber und die Shuttle-Fahrzeuge erreichen insgesamt, über alle Ebenen  $k$ , folgenden mittleren Durchsatz:

$$D_{ES,DTE,w,y} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{ES,DTE,w,y(k)} \quad \text{B.19}$$

$$D_{ES,DTE,w,x} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{ES,DTE,w,x(k)} \quad \text{B.20}$$

### **Spielzeit**

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für den Heber in der Ebene  $k$ :

$$t_{ES,DTE,w,y(k)} = \frac{3600}{D_{ES,DTE,w,y(k)}} \quad \text{B.21}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für den Heber insgesamt:

$$t_{ES,DTE,w,y} = \frac{3600}{D_{ES,DTE,w,y}} \quad \text{B.22}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{ES,DTE,w,x(k)} = \frac{3600}{D_{ES,DTE,w,x(k)}} \quad \text{B.23}$$

Die mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang beträgt:

$$t_{ES,DTE,w,x} = n_y \frac{3600}{D_{ES,DTE,w,x}} \quad \text{B.24}$$

### **Wartezeit**

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit des Hebers in der Ebene  $k$  gilt:

$$t_{w,ES,DTE,y(k)} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,DTE,w,y(k)}} - \frac{1}{D_{ES,E,y(k)}} \right) \quad \text{B.25}$$

Die mittlere Wartezeit für den Heber insgesamt ergibt:

$$t_{w,ES,DTE,y} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,DTE,w,y}} - \frac{1}{D_{ES,E,y}} \right) \quad \text{B.26}$$

Die mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{w,ES,DTE,x(k)} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,DTE,w,x(k)}} - \frac{1}{D_{ES,DTE,x(k)}} \right) \quad \text{B.27}$$

Die mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ergibt:

$$t_{w,ES,DTE,x} = 3600 \left( \frac{n_y}{D_{ES,DTE,w,x}} - \frac{n_y}{D_{ES,DTE,x}} \right) \quad \text{B.28}$$

### **Auslastungsgrad**

Der mittlere Auslastungsgrad eines Hebers in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{ES,DTE,y(k)} = \frac{D_{ES,DTE,w,y(k)}}{D_{ES,E,y(k)}} \quad \text{B.29}$$

Der mittlere Auslastungsgrad des Hebers insgesamt ist:

$$\eta_{ES,DTE,y} = \frac{D_{ES,DTE,w,y}}{D_{ES,E,y}} \quad \text{B.30}$$

Der mittlere Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{ES,DTE,x(k)} = \frac{D_{ES,DTE,w,x(k)}}{D_{ES,DTE,x(k)}} \quad \text{B.31}$$

Der mittlere Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ist:

$$\eta_{ES,DTE,x} = \frac{D_{ES,DTE,w,x}}{D_{ES,DTE,x}} \quad \text{B.32}$$

### **Auslagerung – Einfachtief**

Der Bewegungsablauf der Fördermittel entspricht der einfachtiefen Einlagerung, mit anderer Reihenfolge der einzelnen Prozesse. Es gelten die Formeln der einfachtiefen Einlagerung, mit Ausnahme des Durchsatzes des Hebers, falls der Einlagerungspunkt sich an einer anderen Position als der Auslagerungspunkt befindet. Es wird dann  $D_{ES,E,y}$  durch  $D_{ES,A,y}$  ersetzt.

Das führt zu  $D_{ES,A,y(k)}$  und allen weiteren Formeln. Genauer: In jeder Formel, in der bei der einfachtiefen Einlagerung „ $ES, E$ “ vorhanden ist, wird es durch „ $ES, A$ “ ersetzt. Beispiel:  $D_{ES,E,w,y(k)}$  wird zu  $D_{ES,A,w,y(k)}$ .

### Auslagerung - Doppeltief

#### Durchsatz

Der insgesamt, d. h. über alle Ebenen, erzielte Durchsatz eines Behälterhebers ist  $D_{ES,A,y}$ , ohne Berücksichtigung einer Wartezeit. Der insgesamt erreichbare Durchsatz der Shuttle-Fahrzeuge über alle Ebenen ist  $D_{ES,DTA,x}$ . Der Durchsatz, der durch den Heber in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{ES,A,y(k)}$ . Der Durchsatz, der durch das Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{ES,DTA,x(k)}$ .

Der erreichbare mittlere Durchsatz für den Heber  $D_{ES,DTA,w,y(k)}$  und für das Shuttle-Fahrzeug  $D_{ES,DTA,w,x(k)}$  in der Ebene  $k$  wird wie folgt ermittelt:

$$D_{ES,DTA,w,y(k)} = \begin{cases} \min(D_{ES,A,y(k)}, D_{ES,DTA,x(k)}), & \text{ein aktiver Behälterheber} \\ \frac{1}{2} \min(2D_{ES,A,y(k)}, D_{ES,DTA,x(k)}), & \text{zwei aktive Behälterheber} \end{cases} \quad \text{B.33}$$

$$D_{ES,DTA,w,x(k)} = \begin{cases} D_{ES,DTA,w,y(k)}, & \text{ein aktiver Behälterheber} \\ 2D_{ES,DTA,w,y(k)}, & \text{zwei aktive Behälterheber} \end{cases} \quad \text{B.34}$$

Der Heber und die Shuttle-Fahrzeuge erreichen insgesamt, über alle Ebenen  $k$ , folgenden mittleren Durchsatz:

$$D_{ES,DTA,w,y} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{ES,DTA,w,y(k)} \quad \text{B.35}$$

$$D_{ES,DTA,w,x} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{ES,DTA,w,x(k)} \quad \text{B.36}$$

#### Spielzeit

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für den Heber in der Ebene  $k$ :

$$t_{ES,DTA,w,y(k)} = \frac{3600}{D_{ES,DTA,w,y(k)}} \quad \text{B.37}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für den Heber insgesamt:

$$t_{ES,DTA,w,y} = \frac{3600}{D_{ES,DTA,w,y}} \quad \text{B.38}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{ES,DTA,w,x(k)} = \frac{3600}{D_{ES,DTA,w,x(k)}} \quad \text{B.39}$$

Die mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang beträgt:

$$t_{ES,DTA,w,x} = n_y \frac{3600}{D_{ES,DTA,w,x}} \quad \text{B.40}$$

### **Wartezeit**

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit des Hebers in der Ebene  $k$  gilt:

$$t_{w,ES,DTA,y(k)} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,DTA,w,y(k)}} - \frac{1}{D_{ES,A,y(k)}} \right) \quad \text{B.41}$$

Die mittlere Wartezeit für den Heber insgesamt ergibt:

$$t_{w,ES,DTA,y} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,DTA,w,y(k)}} - \frac{1}{D_{ES,A,y}} \right) \quad \text{B.42}$$

Die mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{w,ES,DTA,x(k)} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,DTA,w,x(k)}} - \frac{1}{D_{ES,DTA,x(k)}} \right) \quad \text{B.43}$$

Die mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ergibt:

$$t_{w,ES,DTA,x} = 3600 \left( \frac{n_y}{D_{ES,DTA,w,x}} - \frac{n_y}{D_{ES,DTA,x}} \right) \quad \text{B.44}$$

### **Auslastungsgrad**

Der mittlere Auslastungsgrad eines Hebers in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{ES,DTA,y(k)} = \frac{D_{ES,DTA,w,y(k)}}{D_{ES,A,y(k)}} \quad \text{B.45}$$

Der mittlere Auslastungsgrad des Hebers insgesamt ist:

$$\eta_{ES,DTA,y} = \frac{D_{ES,DTA,w,y}}{D_{ES,A,y}} \quad \text{B.46}$$

Der mittlere Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{ES,DTA,x(k)} = \frac{D_{ES,DTA,w,x(k)}}{D_{ES,DTA,x(k)}} \quad \text{B.47}$$

Der mittlere Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ist:

$$\eta_{ES,DTA,x} = \frac{D_{ES,DTA,w,x}}{D_{ES,DTA,x}} \quad \text{B.48}$$

## B.2 Einzelspiel Heber und Doppelspiel Shuttle-Fahrzeug

Dieser Fall tritt ein, wenn die Heber auf Einzelspiele beschränkt sind, die Shuttles aber bei ankommenden Ladeeinheiten zur Einlagerung auf den Übergabepätzen und gleichzeitig vorliegenden Auslageraufträgen, die erforderlichen Fahrten zweckmäßig zu Doppelspielen kombinieren.

### Einfachtief

#### Durchsatz

Der insgesamt, d. h. über alle Ebenen, erzielte Durchsatz der Behälterheber ist  $D_{ES,E,y} + D_{ES,A,y}$ , ohne Berücksichtigung einer Wartezeit. Der insgesamt erreichbare Durchsatz der Shuttle-Fahrzeuge über alle Ebenen ist  $D_{DS,x}$ .

Der Durchsatz, der durch die Heber in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{ES,E,y(k)} + D_{ES,A,y(k)}$ . Der Durchsatz, der durch das Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{DS,x(k)}$ .

Der erreichbare mittlere Durchsatz für den einlagernden Heber in der Ebene  $k$  ist:

$$D_{ES,E,DSx,w,y(k)} = \min(D_{ES,E,y(k)}, \frac{1}{2}D_{DS,x(k)}) \quad \text{B.49}$$

Für den auslagernden Heber gilt:

$$D_{ES,A,DSx,w,y(k)} = \min(D_{ES,A,y(k)}, \frac{1}{2}D_{DS,x(k)}) \quad \text{B.50}$$

Für das Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  gilt:

$$D_{DS,w,x}(k) = D_{ES,E,DSx,w,y}(k) + D_{ES,A,DSx,w,y}(k) \quad \text{B.51}$$

Die Heber und die Shuttle-Fahrzeuge erreichen insgesamt, über alle Ebenen  $k$ , folgenden mittleren Durchsatz:

$$D_{ES,E,DSx,w,y} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{ES,E,DSx,w,y}(k) \quad \text{B.52}$$

$$D_{ES,A,DSx,w,y} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{ES,A,DSx,w,y}(k) \quad \text{B.53}$$

$$D_{DS,w,x} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{DS,w,x}(k) \quad \text{B.54}$$

### ***Spielzeit***

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für die Heber in der Ebene  $k$ :

$$t_{ES,E,DSx,w,y}(k) = \frac{3600}{D_{ES,E,DSx,w,y}(k)} \quad \text{B.55}$$

$$t_{ES,A,DSx,w,y}(k) = \frac{3600}{D_{ES,A,DSx,w,y}(k)} \quad \text{B.56}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für die Heber insgesamt:

$$t_{ES,E,DSx,w,y} = \frac{3600}{D_{ES,E,DSx,w,y}} \quad \text{B.57}$$

$$t_{ES,A,DSx,w,y} = \frac{3600}{D_{ES,A,DSx,w,y}} \quad \text{B.58}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{DS,w,x}(k) = \frac{2 * 3600}{D_{DS,w,x}(k)} \quad \text{B.59}$$

Die mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang beträgt:

$$t_{DS,w,x} = n_y \frac{2 * 3600}{D_{DS,w,x}} \quad \text{B.60}$$

### **Wartezeit**

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit der Heber in der Ebene  $k$  gilt:

$$t_{w,ES,E,DSx,y(k)} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,E,DSx,w,y(k)}} - \frac{1}{D_{ES,E,y(k)}} \right) \quad \text{B.61}$$

$$t_{w,ES,A,DSx,y(k)} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,A,DSx,w,y(k)}} - \frac{1}{D_{ES,A,y(k)}} \right) \quad \text{B.62}$$

Die mittlere Wartezeit für die Heber insgesamt ergibt:

$$t_{w,ES,E,DSx,y} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,E,DSx,w,y}} - \frac{1}{D_{ES,E,y}} \right) \quad \text{B.63}$$

$$t_{w,ES,A,DSx,y} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,A,DSx,w,y}} - \frac{1}{D_{ES,A,y}} \right) \quad \text{B.64}$$

Die mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{w,DS,x(k)} = 2 * 3600 \left( \frac{1}{D_{DS,w,x(k)}} - \frac{1}{D_{DS,x(k)}} \right) \quad \text{B.65}$$

Die mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ergibt:

$$t_{w,DS,x} = 2 * 3600 \left( \frac{n_y}{D_{DS,w,x}} - \frac{n_y}{D_{DS,x}} \right) \quad \text{B.66}$$

### **Auslastungsgrad**

Der mittlere Auslastungsgrad der Heber in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{ES,E,DSx,y(k)} = \frac{D_{ES,E,DSx,w,y(k)}}{D_{ES,E,y(k)}} \quad \text{B.67}$$

$$\eta_{ES,A,DSx,y(k)} = \frac{D_{ES,A,DSx,w,y(k)}}{D_{ES,A,y(k)}} \quad \text{B.68}$$

Der mittlere Auslastungsgrad der Heber insgesamt ist:

$$\eta_{ES,E,DSx,y} = \frac{D_{ES,E,DSx,w,y}}{D_{ES,E,y}} \quad \text{B.69}$$

$$\eta_{ES,A,DSx,y} = \frac{D_{ES,A,DSx,w,y}}{D_{ES,A,y}} \quad \text{B.70}$$

Der mittlere Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{DS,x(k)} = \frac{D_{DS,w,x(k)}}{D_{DS,x(k)}} \quad \text{B.71}$$

Der mittlere Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ist:

$$\eta_{DS,x} = \frac{D_{DS,w,x}}{D_{DS,x}} \quad \text{B.72}$$

### **Doppeltief**

#### ***Durchsatz***

Der insgesamt erzielte Durchsatz der Behälterheber ist  $D_{ES,E,y} + D_{ES,A,y}$ , ohne Berücksichtigung einer Wartezeit. Der insgesamt erreichbare Durchsatz der Shuttle-Fahrzeuge ist  $D_{DS,DT,x}$ .

Der Durchsatz, der durch die Heber in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{ES,E,y(k)} + D_{ES,A,y(k)}$ . Der Durchsatz, der durch das Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{DS,DT,x(k)}$ .

Der erreichbare mittlere Durchsatz für die Heber  $D_{ES,DTE,DSx,w,y(k)}$  und für das Shuttle-Fahrzeug  $D_{DS,DT,w,x(k)}$  in der Ebene  $k$  wird wie folgt ermittelt:

$$D_{ES,DTE,DSx,w,y(k)} = \min(D_{ES,E,y(k)}, \frac{1}{2}D_{DS,DT,x(k)}) \quad \text{B.73}$$

$$D_{ES,DTA,DSx,w,y(k)} = \min(D_{ES,A,y(k)}, \frac{1}{2}D_{DS,DT,x(k)}) \quad \text{B.74}$$

$$D_{DS,DT,w,x(k)} = D_{ES,DTE,DSx,w,y(k)} + D_{ES,DTA,DSx,w,y(k)} \quad \text{B.75}$$

Die Heber und die Shuttle-Fahrzeuge erreichen insgesamt, über alle Ebenen  $k$ , folgenden mittleren Durchsatz:

$$D_{ES,DTE,DSx,w,y} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{ES,DTE,DSx,w,y(k)} \quad \text{B.76}$$

$$D_{ES,DTA,DSx,w,y} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{ES,DTA,DSx,w,y}(k) \quad \text{B.77}$$

$$D_{DS,DT,w,x} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{DS,DT,w,x}(k) \quad \text{B.78}$$

### **Spielzeit**

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für den Heber in der Ebene  $k$ :

$$t_{ES,DTE,DSx,w,y}(k) = \frac{3600}{D_{ES,DTE,DSx,w,y}(k)} \quad \text{B.79}$$

$$t_{ES,DTA,DSx,w,y}(k) = \frac{3600}{D_{ES,DTA,DSx,w,y}(k)} \quad \text{B.80}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für den Heber insgesamt:

$$t_{ES,DTE,DSx,w,y} = \frac{3600}{D_{ES,DTE,DSx,w,y}} \quad \text{B.81}$$

$$t_{ES,DTA,DSx,w,y} = \frac{3600}{D_{ES,DTA,DSx,w,y}} \quad \text{9.1}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{DS,DT,w,x}(k) = \frac{2 * 3600}{D_{DS,DT,w,x}(k)} \quad \text{B.82}$$

Die mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang beträgt:

$$t_{DS,DT,w,x} = n_y \frac{2 * 3600}{D_{DS,DT,w,x}} \quad \text{B.83}$$

### **Wartezeit**

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit der Heber in der Ebene  $k$  gilt:

$$t_{w,ES,DTE,DSx,y}(k) = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,DTE,DSx,w,y}(k)} - \frac{1}{D_{ES,y}(k)} \right) \quad \text{B.84}$$

$$t_{w,ES,DTA,DSx,y(k)} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,DTA,DSx,w,y(k)}} - \frac{1}{D_{ES,A,y(k)}} \right) \quad \text{B.85}$$

Die mittlere Wartezeit für die Heber insgesamt ergibt:

$$t_{w,ES,DTE,DSx,y} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,DTE,DSx,w,y}} - \frac{1}{D_{ES,E,y}} \right) \quad \text{B.86}$$

$$t_{w,ES,DTA,DSx,y} = 3600 \left( \frac{1}{D_{ES,DTA,DSx,w,y}} - \frac{1}{D_{ES,A,y}} \right) \quad \text{B.87}$$

Die mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{w,DS,DT,x(k)} = 2 * 3600 \left( \frac{1}{D_{DS,DT,w,x(k)}} - \frac{1}{D_{DS,DT,x(k)}} \right) \quad \text{B.88}$$

Die mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ergibt:

$$t_{w,DS,DT,x} = 2 * 3600 \left( \frac{n_y}{D_{DS,DT,w,x}} - \frac{n_y}{D_{DS,DT,x}} \right) \quad \text{B.89}$$

### **Auslastungsgrad**

Der mittlere Auslastungsgrad des Hebers in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{ES,DTE,DSx,y(k)} = \frac{D_{ES,DTE,DSx,w,y(k)}}{D_{ES,E,y(k)}} \quad \text{B.90}$$

$$\eta_{ES,DTA,DSx,y(k)} = \frac{D_{ES,DTA,DSx,w,y(k)}}{D_{ES,A,y(k)}} \quad \text{B.91}$$

Der mittlere Auslastungsgrad des Hebers insgesamt ist:

$$\eta_{ES,DTE,DSx,y} = \frac{D_{ES,DTE,DSx,w,y}}{D_{ES,E,y}} \quad \text{B.92}$$

$$\eta_{ES,DTA,DSx,y} = \frac{D_{ES,DTA,DSx,w,y}}{D_{ES,A,y}} \quad \text{B.93}$$

Der mittlere Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{DS,DT,x(k)} = \frac{D_{DS,DT,w,x(k)}}{D_{DS,DT,x(k)}} \quad \text{B.94}$$

Der mittlere Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ist:

$$\eta_{DS,DT,x} = \frac{D_{DS,DT,w,x}}{D_{DS,DT,x}} \quad \text{B.95}$$

### B.3 Doppelspiel Heber und Doppelspiel Shuttle-Fahrzeug

Die Heber führen Doppelspiele aus, die Shuttle-Fahrzeuge ebenfalls. Für das analytische Modell wird die Annahme getroffen, dass der Heber die Übergabeplätze so belegt, dass dem Shuttle-Fahrzeug stets die Bildung von Doppelspielen ermöglicht wird. Das entspricht einer festen Zuordnung der Übergabeplätze. Dabei stehen dem Shuttle-Fahrzeug immer ein Übergabeplatz zur Einlagerung und ein Übergabeplatz zur Auslagerung zur Verfügung. Doppelspiele sind daher jederzeit möglich.

#### Einfachtief

##### *Durchsatz*

Der insgesamt, d. h. über alle Ebenen, erzielte Durchsatz eines Behälterhebers ist  $D_{DS,y}$ , ohne Berücksichtigung einer Wartezeit. Der insgesamt erreichbare Durchsatz der Shuttle-Fahrzeuge über alle Ebenen ist  $D_{DS,x}$ .

Der Durchsatz, der durch einen Heber in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{DS,y(k)}$ . Der Durchsatz, der durch das Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{DS,x(k)}$ .

Der erreichbare mittlere Durchsatz für den Heber  $D_{DS,w,y(k)}$  und für das Shuttle-Fahrzeug  $D_{DS,DSy,w,x(k)}$  in der Ebene  $k$  wird wie folgt ermittelt:

$$D_{DS,w,y(k)} = \begin{cases} \min(D_{DS,y(k)}, D_{DS,x(k)}), & \text{ein aktiver Behälterheber} \\ \frac{1}{2} \min(2D_{DS,y(k)}, D_{DS,x(k)}), & \text{zwei aktive Behälterheber} \end{cases} \quad \text{B.96}$$

$$D_{DS,DSy,w,x(k)} = \begin{cases} D_{DS,w,y(k)}, & \text{ein aktiver Behälterheber} \\ 2D_{DS,w,y(k)}, & \text{zwei aktive Behälterheber} \end{cases} \quad \text{B.97}$$

Der Heber und die Shuttle-Fahrzeuge erreichen insgesamt, über alle Ebenen  $k$ , folgenden mittleren Durchsatz:

$$D_{DS,w,y} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{DS,w,y(k)} \quad \text{B.98}$$

$$D_{DS,DSy,w,x} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{DS,DSy,w,x(k)} \quad \text{B.99}$$

**Spielzeit**

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für den Heber in der Ebene  $k$ :

$$t_{DS,w,y(k)} = \frac{2 * 3600}{D_{DS,w,y(k)}} \quad \text{B.100}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für den Heber insgesamt:

$$t_{DS,w,y} = \frac{2 * 3600}{D_{DS,w,y}} \quad \text{B.101}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{DS,DSy,w,x(k)} = \frac{2 * 3600}{D_{DS,DSy,w,x(k)}} \quad \text{B.102}$$

Die mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang beträgt:

$$t_{DS,DSy,w,x} = n_y \frac{2 * 3600}{D_{DS,DSy,w,x}} \quad \text{B.103}$$

**Wartezeit**

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit des Hebers in der Ebene  $k$  gilt:

$$t_{w,DS,y(k)} = 2 * 3600 \left( \frac{1}{D_{DS,w,y(k)}} - \frac{1}{D_{DS,y(k)}} \right) \quad \text{B.104}$$

Die mittlere Wartezeit für den Heber insgesamt ergibt:

$$t_{w,DS,y} = 2 * 3600 \left( \frac{1}{D_{DS,w,y}} - \frac{1}{D_{DS,y}} \right) \quad \text{B.105}$$

Die mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{w,DS,DSy,x(k)} = 2 * 3600 \left( \frac{1}{D_{DS,DSy,w,x(k)}} - \frac{1}{D_{DS,x(k)}} \right) \quad \text{B.106}$$

Die mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ergibt:

$$t_{w,DS,DSy,x} = 2 * 3600 \left( \frac{n_y}{D_{DS,DSy,w,x}} - \frac{n_y}{D_{DS,x}} \right) \quad \text{B.107}$$

### **Auslastungsgrad**

Der mittlere Auslastungsgrad eines Hebers in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{DS,y(k)} = \frac{D_{DS,w,y(k)}}{D_{DS,y(k)}} \quad \text{B.108}$$

Der mittlere Auslastungsgrad des Hebers insgesamt ist:

$$\eta_{DS,y} = \frac{D_{DS,w,y}}{D_{DS,y}} \quad \text{B.109}$$

Der mittlere Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{DS,DSy,x(k)} = \frac{D_{DS,DSy,w,x(k)}}{D_{DS,x(k)}} \quad \text{B.110}$$

Der mittlere Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ist:

$$\eta_{DS,DSy,x} = \frac{D_{DS,DSy,w,x}}{D_{DS,x}} \quad \text{B.111}$$

### **Doppeltief**

#### **Durchsatz**

Der insgesamt, d. h. über alle Ebenen, erzielte Durchsatz eines Behälterhebers ist  $D_{DS,y}$ , ohne Berücksichtigung einer Wartezeit. Der insgesamt erreichbare Durchsatz der Shuttle-Fahrzeuge über alle Ebenen ist  $D_{DS,DT,x}$ .

Der Durchsatz, der durch einen Heber in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{DS,y(k)}$ . Der Durchsatz, der durch das Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  ohne Berücksichtigung einer Wartezeit realisiert werden könnte, ist  $D_{DS,DT,x(k)}$ .

Der erreichbare mittlere Durchsatz für den Heber und für das Shuttle-Fahrzeug in der Ebene  $k$  wird wie folgt ermittelt:

$$D_{DS,DT,w,y(k)} = \begin{cases} \min(D_{DS,DT,y(k)}, D_{DS,DT,x(k)}), & \text{ein aktiver Behälterheber} \\ \frac{1}{2} \min(2D_{DS,DT,y(k)}, D_{DS,DT,x(k)}), & \text{zwei aktive Behälterheber} \end{cases} \quad \text{B.112}$$

$$D_{DS,DT,DSy,w,x(k)} = \begin{cases} D_{DS,DT,w,y(k)}, & \text{ein aktiver Behälterheber} \\ 2D_{DS,DT,w,y(k)}, & \text{zwei aktive Behälterheber} \end{cases} \quad \text{B.113}$$

Der Heber und die Shuttle-Fahrzeuge erreichen insgesamt, über alle Ebenen  $k$ , folgenden mittleren Durchsatz:

$$D_{DS,DT,w,y} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{DS,DT,w,y(k)} \quad \text{B.114}$$

$$D_{DS,DT,DSy,w,x} = \sum_{k=1}^{n_y} D_{DS,DT,DSy,w,x(k)} \quad \text{B.115}$$

### **Spielzeit**

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für den Heber in der Ebene  $k$ :

$$t_{DS,DT,w,y(k)} = \frac{2 * 3600}{D_{DS,DT,w,y(k)}} \quad \text{B.116}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit ergibt für den Heber insgesamt:

$$t_{DS,DT,w,y} = \frac{2 * 3600}{D_{DS,DT,w,y}} \quad \text{B.117}$$

Die mittlere Spielzeit mit Berücksichtigung der Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{DS,DT,DSy,w,x(k)} = \frac{2 * 3600}{D_{DS,DT,DSy,w,x(k)}} \quad \text{B.118}$$

Die mittlere Spielzeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang beträgt:

$$t_{DS,DT,DSy,w,x} = n_y \frac{2 * 3600}{D_{DS,DT,DSy,w,x}} \quad \text{B.119}$$

### **Wartezeit**

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit des Hebers in der Ebene  $k$  gilt:

$$t_{w,DS,DT,y(k)} = 2 * 3600 \left( \frac{1}{D_{DS,DT,w,y(k)}} - \frac{1}{D_{DS,DT,y(k)}} \right) \quad \text{B.120}$$

Die mittlere Wartezeit für den Heber insgesamt ergibt:

$$t_{w,DS,DT,y} = 2 * 3600 \left( \frac{1}{D_{DS,DT,w,y}} - \frac{1}{D_{DS,y}} \right) \quad \text{B.121}$$

Die mittlere Wartezeit des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ergibt:

$$t_{w,DS,DT,DSy,x(k)} = 2 * 3600 \left( \frac{1}{D_{DS,DT,DSy,w,x(k)}} - \frac{1}{D_{DS,DT,x(k)}} \right) \quad \text{B.122}$$

Die mittlere Wartezeit eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ergibt:

$$t_{w,DS,DT,DSy,x} = 2 * 3600 \left( \frac{n_y}{D_{DS,DT,DSy,w,x}} - \frac{n_y}{D_{DS,DT,x}} \right) \quad \text{B.123}$$

### ***Auslastungsgrad***

Der mittlere Auslastungsgrad eines Hebers in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{DS,DT,y(k)} = \frac{D_{DS,DT,w,y(k)}}{D_{DS,y(k)}} \quad \text{B.124}$$

Der mittlere Auslastungsgrad des Hebers insgesamt ist:

$$\eta_{DS,DT,y} = \frac{D_{DS,DT,w,y}}{D_{DS,y}} \quad \text{B.125}$$

Der mittlere Auslastungsgrad des Shuttle-Fahrzeugs in der Ebene  $k$  ist:

$$\eta_{DS,DT,DSy,x(k)} = \frac{D_{DS,DT,w,x(k)}}{D_{DS,DT,x(k)}} \quad \text{B.126}$$

Der mittlere Auslastungsgrad eines Shuttle-Fahrzeugs im Gang ist:

$$\eta_{DS,DT,DSy,x} = \frac{D_{DS,DT,w,x}}{D_{DS,DT,x}} \quad \text{B.127}$$

## C Algorithmen

### C.1 Algorithmus zur Implementierung im Simulationsmodell

Der für das Simulationsmodell entwickelte Algorithmus arbeitet wie folgt<sup>39</sup>. Die Darstellung bezieht sich nur auf die Belegung der Lagerplätze. Die Lagerplätze werden spaltenweise mit Ladeeinheiten belegt, von der ersten Spalte am Ganganfang bis zur letzten Spalte am Gangende.

Algorithmus Initialeinlagerung:

1. Setze zaehler auf 1.
2. Während zaehler  $\leq$  Anzahl Lagerplätze
  - a. Ordne Lagerplatz zaehler eine Zone entsprechend der Parametrierung zu.
  - b. Erhöhe zaehler um 1.
3. Erzeuge die parametrierte Anzahl an Ladeeinheiten.
4. Setze zaehler auf 1.
5. Während zaehler  $\leq$  Anzahl Ladeeinheiten
  - a. Bestimme zufällig mit den parametrierten Wahrscheinlichkeiten den Artikelnummerbereich (Schnell- oder Langsamdreher, bei Langsamdrehern können verschiedene Zonen enthalten sein).
  - b. Erzeuge gleichverteilt eine Zufallszahl aus Artikelnummerbereich.
  - c. Ordne Ladeeinheit die Zufallszahl als Artikelnummer zu.
6. Setze zaehler auf 1.
7. Während zaehler  $\leq$  Anzahl Schnelldreher-Ladeeinheiten.
  - a. Befülle Lagerplatz zaehler mit Schnelldreher-Ladeeinheit.
  - b. Erhöhe zaehler um 1.
8. Während zaehler - Anzahl Schnelldreher-Ladeeinheiten  $\leq$  Anzahl Langsamdreher-Ladeeinheiten
  - a. Befülle Lagerplatz zaehler mit Langsamdreher-Ladeeinheiten.
  - b. Erhöhe zaehler um 1.

Algorithmus Einlagerung im laufenden Betrieb:

---

<sup>39</sup> Der Algorithmus ist auch im Schlussbericht des Forschungsprojekts „SmartShuttle“ [71] veröffentlicht.

1. Ordne die einzulagernde Ladeeinheit aufgrund ihrer Artikelnummer einer Zone zu.
2. Ordne der Ladeeinheit einen Lagerplatz entsprechend der Zone zu.

Welcher Lagerplatz innerhalb der Zone ausgewählt wird, liegt an weiteren Lagerstrategien, wie z. B. „Chaotische Einlagerung innerhalb der Zone“ oder „Einlagerung nahe E/A innerhalb der Zone“, oder Restriktionen wie z. B. „Kein Lagerplatz mehr in dieser Ebene innerhalb dieser Zone frei“.

## C.2 A-Priori-Algorithmus

Im Folgenden wird der Algorithmus beschrieben.

A-Priori-Algorithmus:

1. Setze position auf 1.
2. Setze ebene auf 1.
3. Setze liste auf 0 für alle Felder (Anzahl Felder = Anzahl Ebenen).
4. Während position  $\leq$  Anzahl Felder in liste
  - a. Setze position\_ebene auf ebene \* (Abstand zwischen zwei Ebenen - 1).
  - b. Setze position\_E/A auf (Position E-Punkt + Position A-Punkt)/2
  - c. Wenn ebene  $\leq$  Anzahl Ebenen
    - i. Setze ebene\_vergleich auf Wert in liste in Feld position.
    - ii. Wenn ebene\_vergleich  $>$  0
      1. Setze position\_ebene\_vergleich auf ebene\_vergleich\*(Abstand zwischen zwei Ebenen - 1).
    - iii. Wenn Betrag von (position\_ebene - position\_E/A)  $\leq$  Betrag von (position\_ebene\_vergleich - position\_E/A) oder ebene\_vergleich = 0
      1. Setze Wert in liste in Feld position auf ebene.
    - iv. Erhöhe ebene um 1.
  - d. Sonst:
    - i. Erhöhe position um 1.
    - ii. Setze ebene auf 1.
5. Setze faktor\_ebene auf 1.

6. Setze faktor\_position\_gang auf 1.
7. Während 1 = 1
  - a. Setze position auf 1.
  - b. Setze position\_gang auf 1.
  - c. Setze abbruch auf 0.
  - d. Setze durchsatz\_max auf 0.
  - e. Setze ebene auf Wert in liste in Feld position.
  - f. Setze zone auf 1.
  - g. Während zone < Anzahl Zonen und abbruch = 0.
    - i. Wenn faktor\_ebene\*faktor\_position\_gang > Anzahl Lagerplätze zone und faktor\_position\_gang >= position\_gang und faktor\_ebene >= ebene
      1. Setze Zonenzuordnung für zone: position\_gang und ebene. Speichere Zuordnung in zonenbildung.
      2. Wenn Anzahl Positionen zone < Anzahl zugeordnete Positionen zone
        - a. Wenn position\_gang < Anzahl Positionen im Gang
          - i. Erhöhe position\_gang um 1.
          - ii. Erhöhe Anzahl zugeordnete Positionen zone um 1.
        - b. Sonst:
          - i. Erhöhe position um 1.
          - ii. Setze position\_gang auf 1.
          - iii. Setze ebene auf Wert in liste in Feld position.
          - iv. Setze zone auf 1.
      3. Sonst:
        - a. Erhöhe zone um 1.
    - ii. Sonst:
      1. Setze abbruch auf 1.
  - h. Wenn abbruch = 0
    - i. Sende zonenbildung an analytisches Modell (optional Simulationsmodell)
    - ii. Warte auf Triggerereigis (Informationsempfang zu Durchsatz des Gangs des Shuttle-Systems).
    - iii. Setze durchsatz auf empfangenden Wert des Modells.
    - iv. Wenn durchsatz > durchsatz\_max

1. Setze `durchsatz_max` auf `durchsatz`.
  2. Setze `beste_zonenbildung` auf `zonenbildung`.
  3. Setze `bester_faktor_ebene` auf `faktor_ebene`.
  4. Setze `bester_faktor_position_gang` auf `position_gang`.
- i. Setze `zone` auf 1.
  - j. Erhöhe `faktor_position_gang` um 1.
  - k. Wenn `faktor_position_gang` > Anzahl Positionen im Gang
    - i. Setze `faktor_position_gang` auf 1.
    - ii. Erhöhe `faktor_ebene` um 1.
    - iii. Wenn `faktor_ebene` > Anzahl Ebenen
      1. Erhöhe `zone` um 1.
      2. Wenn `zone` > Anzahl Zonen
        - a. Gib `beste_zonenbildung` aus.
        - b. Gib zugehörige Ausgangsgrößen des analytischen Modells aus (`Durchsatz`, `Spielzeit`).
        - c. Beende Algorithmus.

Der Algorithmus beginnt mit einer Reihenzonierung und schließt dabei die vom E/A-Punkt am weitesten entfernten Ebenen aus.

Der beschriebene Algorithmus ändert iterativ die Zuordnung der Positionen zu Zonen. Nach jeder Iteration wird der Durchsatz ermittelt. Nach Durchlauf aller Iterationen wird das optimale Ergebnis zur Zonenbildung ausgegeben und Ausgangsgrößen zum Systemverhalten (`Durchsatz`, optional weitere wie `Spielzeit` und `Wartezeit`). Mit diesem Algorithmus können viele Zonen (Obergrenze der Anzahl Zonen ist die Anzahl der Lagerplätze) definiert werden. Der Algorithmus führt bei Anwendung von analytischen Modellen relativ schnell zum optimalen Ergebnis. Bei Anwendung von Simulationsmodellen kann es zu langen Rechenzeiten kommen.

### C.3 Evolutionärer Algorithmus

Im Folgenden wird der Algorithmus zum einfacheren Verständnis gekürzt und abstrahiert dargestellt.

Evolutionärer Algorithmus:

1. Während `zaehler_population` < `Populationsgröße`
  - a. Erzeuge Lösungskandidat.
  - b. Erhöhe `zaehler_population` um 1.
2. Während `zaehler_generation` < `Generationsgröße`

- a. Übergib Lösungskandidaten an das analytische Modell
- b. Empfange Fitnesswerte der Lösungskandidaten (Durchsatz)
- c. Speichere den Lösungskandidaten mit der besten Fitness.
- d. Während `zaehler_turnier < Populationsgröße/2`
  - i. Bestimme zufällig zwei Lösungskandidaten
  - ii. Wähle den Lösungskandidaten mit der besseren Fitness.
  - iii. Ordne den Lösungskandidaten der neuen Population zu.
  - iv. Erhöhe `zaehler_turnier` um 1.
- e. Während `zaehler_reproduktion < Populationsgröße/2`
  - i. Bestimme zufällig zwei noch nicht ausgewählte Lösungskandidaten aus der neuen Population.
  - ii. Bestimme zufällig eine Schnittpunkt-Position (Einpunkt-Crossover).
  - iii. Entnimm die Gene des ersten Lösungskandidaten, vor dem Schnittpunkt.
  - iv. Entnimm die Gene des zweiten Lösungskandidaten, nach dem Schnittpunkt.
  - v. Ordne die entnommenen Gene der Lösungskandidaten in einem neuen Chromosom an denselben Positionen wie in dem bisherigen Chromosom an.
  - vi. Füge den neu entstandenen Lösungskandidat der neuen Population hinzu.
  - vii. Entnimm die Gene des ersten Lösungskandidaten, nach dem Schnittpunkt.
  - viii. Entnimm die Gene des zweiten Lösungskandidaten, vor dem Schnittpunkt.
  - ix. Ordne die entnommenen Gene der Lösungskandidaten in einem neuen Chromosom an denselben Positionen wie in dem bisherigen Chromosom an.
  - x. Füge den neu entstandenen Lösungskandidat der neuen Population hinzu.
  - xi. Erhöhe `zaehler_reproduktion` um 1.
- f. Während `zaehler_mutation < Mutationsgröße`
  - i. Während `zaehler_gen < Lagerplätze pro Gang * Variationsanteil`
    1. Bestimme zufällig ein Gen.

2. Generiere eine Zufallszahl im Bereich (1 - Anzahl Positionen pro Ebene)
3. Speichere die Zufallszahl im Gen.
4. Erhöhe zaehler\_mutation um 1.
- g. Führe Ausgleichsoperation mit allen Lösungskandidaten durch.
- h. Bestimme zufällig einen Lösungskandidaten der neuen Population.
- i. Ersetze den Lösungskandidaten durch den Lösungskandidaten, der bei der vorherigen Population die beste Fitness hatte.
- j. Erhöhe zaehler\_generation um 1.
3. Ausgabe des besten Lösungskandidaten mit zugehöriger Information (Phänotyp, Genotyp, Fitness).

#### C.4 Algorithmen zur Reihenfolgesortierung der Aufträge

Im Folgenden werden die im Simulationsmodell implementierten Algorithmen zur Reihenfolgesortierung der Aufträge beschrieben.

Algorithmus Lagerstrategie Reihenfolgesortierung der Aufträge, Heber, GG-Modell:

1. Setze v\_abstand auf 0.
2. Setze v\_position\_heber auf die aktuelle Position (Ebene) des Hebers.
3. Während Anzahl wartender Aufträge > 0
  - a. Nimm einen zufälligen Auftrag aus der Auftragsliste und schiebe diesen in temporäre\_liste\_eins.
  - b. Lies die Position des Auftrags in temporäre\_liste\_eins.
  - c. Setze v\_position auf die Position (Ebene, in der der Auftrag wartet) des Auftrags in temporäre\_liste\_eins.
  - d. Setze v\_abstand\_vergleich auf  $|v\_position\_heber - v\_position|$ .
  - e. Wenn v\_abstand\_vergleich < v\_abstand oder v\_abstand = 0
    - i. Setze v\_abstand auf v\_abstand\_vergleich
    - ii. Schiebe alle Aufträge von temporäre\_liste\_zwei in temporäre\_liste\_drei
    - iii. Schiebe den Auftrag von temporäre\_liste\_eins in temporäre\_liste\_zwei
  - f. Sonst:

- i. Schiebe Auftrag von `temporäre_liste_eins` in `temporäre_liste_drei`.
4. Nimm Auftrag von `temporäre_liste_zwei` zur Bearbeitung an.
5. Schiebe alle Aufträge aus `temporäre_liste_drei` in `Auftragsliste`.

Algorithmus Lagerstrategie Reihenfolgesortierung der Aufträge, Heber, GEG-Modell:

1. Setze `v_zaeher_ebene` auf 1 (linker Heber) oder 2 (rechter Heber) (Erforderlich, da die Übergabepätze zur Auslagerung abwechselnd angeordnet sind).
2. Setze `v_abstand_merker` auf 0.
3. Setze `v_zaeher_ebene_merker` auf 0.
4. Setze `v_abstand` auf 0.
5. Setze `v_position_heber` auf die aktuelle Position (Ebene) des Hebers.
6. Während `zaehler_ebene <= Anzahl Ebenen`
  - a. Wenn Ladeeinheit auf Übergabepatz zur Auslagerung in Ebene `v_zaeher_ebene = Wahr`
    - i. Setze `v_abstand` auf  $|v\_position\_heber - v\_position|$ .
    - ii. Wenn `v_abstand_merker > v_abstand` or `v_abstand = 0`
      1. Setze `v_abstand_merker` auf `v_abstand`.
      2. Setze `v_zaeher_ebene_merker` auf `v_zaeher_ebene`
  - b. Erhöhe `v_zaeher_ebene` um 2
7. Setze `v_ebene` auf `v_zaeher_ebene_merker`
8. Nimm Auftrag, dessen Position (Ebene) mit `v_ebene` übereinstimmt, aus `Auftragsliste` zur Bearbeitung an.

### C.5 Algorithmus Lagerreorganisation

Die Algorithmen werden für Heber und Shuttle-Fahrzeuge zur besseren Lesbarkeit und Übersichtlichkeit im Folgenden in stark gekürzt dargestellt<sup>40</sup>. Eine Ausnahme bildet die Beschreibung des Shuttle-Fahrzeugs in einem ganggebundenen Shuttle-System. Hier wird weniger gekürzt und geringer abstrahiert, um die sich ergebende Komplexität aufzuzeigen.

Im Folgenden wird der Algorithmus für ein GEG-System beschrieben.

---

<sup>40</sup> Der Algorithmus für die Lagerreorganisation gang- und ebenengebundener Shuttle-Systeme wurde in [51] mit ausführlicher Beschreibung veröffentlicht und wird hier vereinfacht dargestellt.

Algorithmus Lagerreorganisation, Heber, GEG-System:

1. Während 1 = 1
  - a. Warte auf Triggerereignis (erreichbare Ladeeinheit auf Übergabepplatz vorhanden).
  - b. Prüfe Ladeeinheit(en) und bestimme Umlagerebene nach Kriterien (freier Lagerplatz in Ebene vorhanden, Zonenzuordnung, Übergabepplatz frei zur Aufnahme).
  - c. Lagere die ausgewählte Ladeeinheit in die ausgewählte Ebene um.

Algorithmus Lagerreorganisation, Shuttle-Fahrzeug, GEG-System:

1. Während 1 = 1
  - a. Warte auf Triggerereignis (erreichbare Ladeeinheit auf Übergabepplatz vorhanden, umzulagernde Ladeeinheit in der Ebene vorhanden).
  - b. Wenn Ladeeinheit zu Übergabepplatz ausgelagert werden kann
    - i. Lagere Ladeeinheit zu Übergabepplatz aus.
  - c. Sonst:
    - i. Wenn Ladeeinheit von einem Übergabepplatz eingelagert werden kann
      1. Nimm Ladeeinheit von Übergabepplatz auf und lagere sie ein (Kriterium kürzeste Fahrtzeit).
    - ii. Sonst:
      1. Wenn Ladeeinheit innerhalb der Ebene umgelagert werden kann
        - a. Lagere Ladeeinheit innerhalb der Ebene um (Auswahl der Ladeeinheit und des Umlagerplatzes nach dem Kriterium kürzeste Fahrtzeit).

Im Folgenden wird der Algorithmus für ein GG-System beschrieben<sup>41</sup>.

Algorithmus Lagerreorganisation, Heber, GG-System:

1. Während 1 = 1

---

<sup>41</sup> Der Algorithmus zum GG-System ist auch im Schlussbericht des Forschungsprojekts „SmartShuttle“ [71] veröffentlicht worden.

- a. Warte auf Triggerereignis (wartendes Shuttle-Fahrzeug in Ebene).
- b. Lese Information zur Zielebene ein.
- c. Fahre zur Ebene des wartenden Shuttle-Fahrzeugs.
- d. Nimm Shuttle-Fahrzeug auf.
- e. Fahre zur Zielebene.
- f. Gib Shuttle-Fahrzeug ab.

Algorithmus Lagerreorganisation, Shuttle-Fahrzeug, GG-System:

1. Während 1 = 1
  - a. Warte auf Triggerereignis.
  - b. Durchsuche die nicht verdeckten Ladeeinheiten in der Ebenen nach umzulagernden Langsamdreher-Ladeeinheiten.
  - c. Wenn umzulagernde Langsamdreher-Ladeeinheiten = 0
    - i. Durchsuche die verdeckten Langsamdreher-Ladeeinheiten in der Ebene nach umzulagernden Langsamdreher-Ladeeinheiten.
  - d. Wenn nicht verdeckte umzulagernde Langsamdreher-Ladeeinheiten > 0 und freie Lagerplätze in Schnelldreher-Zone > 0 und keine Schnelldreher-Ladeeinheit in der Schnelldreher-Zone durch die Umlagerung verdeckt wird
    - i. Bestimme umzulagernde Langsamdreher-Ladeeinheit nahe Beginn Langsamdreher-Zone.
    - ii. Bestimme Ziellagerplatz nahe Ganganfang.
    - iii. Fahre zu umzulagernder Langsamdreher-Ladeeinheit.
    - iv. Nimm umzulagernde Langsamdreher-Ladeeinheit auf.
    - v. Fahre zum Ziellagerplatz.
    - vi. Gib Langsamdreher-Ladeeinheit ab.
  - e. Wenn nicht verdeckte umzulagernde Langsamdreher-Ladeeinheiten > 0 und (eine Schnelldreher-Ladeeinheit in der Schnelldreher-Zone verdeckt würde oder freie Lagerplätze in Schnelldreher-Zone = 0)
    - i. Bestimme umzulagernde Schnelldreher-Ladeeinheit nahe Ganganfang, mit Priorität auf Kanäle, die nur eine Ladeeinheit enthalten.
    - ii. Bestimme Ziellagerplatz in Langsamdreher-Zone mit Priorität auf Nicht-Verdeckung einer umzulagernden Langsamdreher-Ladeeinheit.

- iii. Fahre zu umzulagernder Schnelldreher-Ladeeinheit.
  - iv. Nimm umzulagernde Schnelldreher-Ladeeinheit auf.
  - v. Fahre zum Ziellagerplatz.
  - vi. Gib Schnelldreher-Ladeeinheit ab.
- f. Wenn verdeckte umzulagernde Langsamdreher-Ladeeinheiten  $> 0$
- i. Bestimme umzulagernde vordere (Ladeeinheit wird zur Befreiung der hinteren Ladeeinheit umgelagert) Ladeeinheit nahe Anfang der Langsamdreher-Zone.
  - ii. Bestimme Ziellagerplatz in Langsamdreher-Zone mit Priorität auf Nicht-Verdeckung einer umzulagernden Langsamdreher-Ladeeinheit.
  - iii. Fahre zu umzulagernder Langsamdreher-Ladeeinheit.
  - iv. Nimm umzulagernde Langsamdreher-Ladeeinheit auf.
  - v. Fahre zum Ziellagerplatz.
  - vi. Gib Schnelldreher-Ladeeinheit ab.
- g. Wenn nicht verdeckte umzulagernde Langsamdreher-Ladeeinheiten  $> 0$  und Schnelldreher-Zone in Ebene nicht vorhanden
- i. Bestimme umzulagernde Langsamdreher-Ladeeinheit nahe Beginn Langsamdreher-Zone.
  - ii. Bestimme Ziellagerplatz in der Schnelldreher-Zone einer anderen Ebene, nahe Beginn Schnelldreher-Zone.
  - iii. Fahre zu umzulagernder Langsamdreher-Ladeeinheit.
  - iv. Nimm umzulagernde Langsamdreher-Ladeeinheit auf.
  - v. Fahre zum Ganganfang.
  - vi. Warte auf Triggerereignis (Heber ist zur Aufnahme des Shuttle-Fahrzeugs bereit).
  - vii. Fahre auf die Aufnahmevorrichtung des Hebers.
- viii. Warte auf Triggerereignis (Heber hat Shuttle-Fahrzeug zu Zielebene gefördert und ist bereit zur Abgabe).
- ix. Fahre in Zielebene.
  - x. Fahre zum Ziellagerplatz.
  - xi. Gib Schnelldreher-Ladeeinheit ab.
- h. Wenn verdeckte und nicht verdeckte Anzahl umzulagernder Langsamdreher-Ladeeinheiten  $= 0$

- i. Durchsuche andere Ebenen mit Schnelldreher-Zone nach umzulagernden Ladeeinheiten.
- ii. Wenn andere Ebene mit Schnelldreher-Zone und Anzahl umzulagernde Ladeeinheiten in anderer Ebene  $> 0$ 
  1. Bestimme Zielebene nach dem Kriterium kürzeste Wegstrecke.
  2. Fahre zum Ganganfang.
  3. Warte auf Triggerereignis (Heber ist zur Aufnahme des Shuttle-Fahrzeugs bereit).
  4. Fahre auf die Aufnahmevorrichtung des Hebers.
  5. Warte auf Triggerereignis (Heber hat Shuttle-Fahrzeug zu Zielebene gefördert und ist bereit zur Abgabe).
  6. Fahre in Zielebene.
- iii. Wenn andere Ebene ohne Schnelldreher-Zone und Anzahl umzulagernde Ladeeinheiten in anderer Ebene  $> 0$ 
  1. Wenn Anzahl freier Lagerplätze in aktueller Ebene  $\leq 4$ 
    - a. Bestimme umzulagernde Schnelldreher-Ladeeinheit nahe Beginn Schnelldreher-Zone.
    - b. Bestimme Ziellagerplatz einer anderen Ebene ohne Schnelldreher-Zone, mit Priorität auf Nicht-Verdeckung einer umzulagernden Langsamdreher-Ladeeinheit, nahe Ganganfang.
    - c. Fahre zu umzulagernder Langsamdreher-Ladeeinheit.
    - d. Nimm umzulagernde Langsamdreher-Ladeeinheit auf.
    - e. Fahre zum Ganganfang.
    - f. Warte auf Triggerereignis (Heber ist zur Aufnahme des Shuttle-Fahrzeugs bereit).
    - g. Fahre auf die Aufnahmevorrichtung des Hebers.

- h. Warte auf Triggerereignis (Heber hat Shuttle-Fahrzeug zu Zielebene gefördert und ist bereit zur Abgabe).
  - i. Fahre in Zielebene.
  - j. Fahre zum Ziellagerplatz.
  - k. Gib Schnelldreher-Ladeeinheit ab.
2. Sonst:
- a. Bestimme Zielebene nach dem Kriterium kürzeste Wegstrecke.
  - b. Fahre zum Ganganfang.
  - c. Warte auf Triggerereignis (Heber ist zur Aufnahme des Shuttle-Fahrzeugs bereit).
  - d. Fahre auf die Aufnahmevorrichtung des Hebers.
  - e. Warte auf Triggerereignis (Heber hat Shuttle-Fahrzeug zu Zielebene gefördert und ist bereit zur Abgabe).
  - f. Fahre in Zielebene.

## D Validierung und Versuchsplan

### D.1 Validierung des Simulationsmodells mit Ergebnissen der Literatur

Im Folgenden werden die simulierten Ergebnisse des Simulationsmodells unter Annahme des Grenzdurchsatzes (es sind immer Aufträge zur Bearbeitung vorhanden) mit den Ergebnissen des analytischen Modells der VDI-2692 verglichen. Es wurden verschiedene Parameter nach VDI-2692 berechnet und simuliert. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Heber bei jeder Parameterkombination der Engpass ist, da die Ergebnisse zum Durchsatz des Hebers nur dann mit der VDI-2692 verglichen werden (die VDI-2692 vernachlässigt die Entstehung von Wartezeiten). Tabelle 37 zeigt die für die Validierung verwendeten Parameterwerte.

**Tabelle 37: Parameterwerte, Validierung nach VDI-2692**

<b>Regal</b>	<b>Parameterwert</b>
Zahl der Ebenen	12
Abstand der Ebenen [m]	0,4
Abstand zwischen Ebene 1 und E/A-Punkt [m]	-1
Zahl der Fächer pro Ebene	100
Abstand der Fächer [m]	0,5
<b>Heber</b>	
Geschwindigkeit [m/s]	2
Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	2,5
Zeit Lastaufnahme Behälterheber[s]	2
Positionier- und Schaltzeiten [s]	0,5
<b>Shuttle-Fahrzeug</b>	
Geschwindigkeit [m/s]	2
Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	2
Zeit Lastaufnahme [s]	4
Positionier- und Schaltzeiten [s]	0,5
<b>Lagerfüllgrad [%]</b>	50

Tabelle 38 zeigt die Ergebnisse der Validierung. Das Fehlermaß ist jeweils gering.

**Tabelle 38: Ergebnisse der Validierung**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Durchsatz Einzelspiele Heber [LE/h]</b>		<b>Fehlermaß</b>
	<b>VDI-2692 [1]</b>	<b>Simulation</b>	
Variante 1	453,64	451,74	0.42 %
Variante 2 (zu beachten: nur ein Lagerbereich wird genutzt, beschrieben in [11])	248,28	248,40	-0.05 %
Variante 3 (zu beachten: nur ein Lagerbereich wird genutzt, beschrieben in [51])	212,18	212,13	0.02 %
Variante 4 (zu beachten: nur ein Lagerbereich wird genutzt, beschrieben in [51])	509,80	500,70	1.79 %
	<b>Durchsatz Doppelspiele Heber [LE/h]</b>		<b>Fehlermaß</b>
Variante 5	518,72	517,51	0.23 %

### D.2 Vollständiger Versuchsplan

Tabelle 39 zeigt den vollständigen Versuchsplan.

**Tabelle 39: Vollständiger Versuchsplan**

Nr.	D	F			SZ		F	W		F	A		F
		MO	SI		MO	SI		MO	SI		MO	SI	
1	Li-WZ	180.58	180.04	0.30%	19.94	20.00	0.30%	0.00	0.06	0.10%	1.00	1.00	0.28%
	Sfa-WZ	30.10	30.01	0.30%	119.61	119.97	0.30%	30.10	30.01	0.30%	119.61	119.97	0.30%
	Li-W	179.92	180.04	0.07%	20.01	20.00	0.07%	179.92	180.04	0.07%	20.01	20.00	0.07%
	Sfa-W	29.99	30.01	0.07%	120.05	119.97	0.07%	29.99	30.01	0.07%	120.05	119.97	0.07%
2	Li-WZ	190.07	189.94	0.07%	37.88	37.91	0.07%	0.00	0.03	0.10%	1.00	1.00	0.07%
	Sfa-WZ	31.68	31.66	0.07%	227.28	227.44	0.07%	173.70	173.89	0.11%	0.24	0.24	0.12%
	Li-W	189.80	189.94	0.08%	37.94	37.91	0.08%	0.05	-0.03	0.03%	1.00	1.00	0.22%
	Sfa-W	31.63	31.66	0.08%	227.61	227.44	0.08%	174.03	173.89	0.08%	0.24	0.24	0.02%
3	Li-WZ	180.58	180.54	0.02%	19.94	19.94	0.02%	0.00	0.00	0.25%	1.00	1.00	0.02%
	Sfa-WZ	30.10	30.09	0.02%	239.23	239.28	0.02%	185.65	185.71	0.03%	0.22	0.22	0.04%
	Li-W	179.00	180.54	0.85%	20.11	19.94	0.86%	0.17	0.00	9.56%	0.99	1.00	0.85%
	Sfa-W	29.83	30.09	0.85%	241.34	239.28	0.86%	187.76	185.71	1.10%	0.22	0.22	0.83%
4	Li-WZ	180.58	179.00	0.88%	19.94	20.11	0.87%	0.00	0.15	1.00%	1.00	0.99	0.76%
	Sfa-WZ	30.10	29.83	0.88%	119.61	120.67	0.87%	79.68	80.21	0.66%	0.33	0.34	0.44%
	Li-W	179.58	179.00	0.32%	20.05	20.11	0.32%	0.11	0.15	0.27%	0.99	0.99	0.20%
	Sfa-W	29.93	29.83	0.32%	120.28	120.67	0.32%	80.35	80.21	0.18%	0.33	0.34	0.99%
5	Li-WZ	190.07	189.45	0.33%	37.88	38.00	0.33%	0.00	0.01	0.01%	1.00	1.00	0.02%
	Sfa-WZ	31.68	31.58	0.33%	227.28	228.03	0.33%	168.82	166.65	1.31%	0.26	0.27	4.45%
	Li-W	189.72	189.45	0.14%	37.95	38.00	0.14%	0.00	0.01	0.01%	1.00	1.00	0.02%
	Sfa-W	31.62	31.58	0.14%	227.70	228.03	0.14%	169.24	166.65	1.56%	0.26	0.27	4.62%
6	Li-WZ	180.58	180.50	0.04%	19.94	19.94	0.04%	0.00	0.00	0.02%	1.00	1.00	0.04%
	Sfa-WZ	30.10	30.08	0.04%	239.23	239.34	0.04%	180.77	178.95	1.02%	0.24	0.25	3.15%
	Li-W	178.58	180.50	1.06%	40.32	39.89	1.08%	20.38	19.95	2.15%	0.49	0.50	1.06%
	Sfa-W	29.76	30.08	1.06%	241.91	239.34	1.08%	183.45	178.95	2.52%	0.24	0.25	4.23%
7	Li-WZ	193.15	190.36	1.47%	37.28	37.82	1.44%	0.00	0.95	1.00%	1.00	0.97	2.58%
	Sfa-WZ	32.19	31.73	1.47%	223.66	226.94	1.44%	176.54	175.66	0.50%	0.21	0.23	6.77%
	Li-W	192.86	190.36	1.31%	37.33	37.82	1.29%	0.00	0.95	1.00%	1.00	0.97	2.58%
	Sfa-W	32.14	31.73	1.31%	224.00	226.94	1.29%	176.88	175.66	0.70%	0.21	0.23	6.91%
8	Li-WZ	184.67	184.72	0.03%	19.49	19.49	0.03%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-WZ	30.78	30.79	0.03%	233.93	233.87	0.03%	186.81	182.27	2.49%	0.20	0.22	8.71%
	Li-W	182.97	184.72	0.95%	19.68	19.49	0.95%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-W	30.50	30.79	0.95%	236.10	233.87	0.95%	188.98	182.27	3.68%	0.20	0.22	9.55%
9	Li-	184.67	181.79	1.58%	19.49	19.80	-	0.00	0.19	-	1.00	0.99	0.96%

Validierung und Versuchsplan

	WZ						1.56%			0.98%			
	Sfa-WZ	30.78	30.30	1.58%	116.97	118.82	1.56%	90.42	91.65	1.35%	0.23	0.23	0.73%
	Li-W	184.03	181.79	1.23%	19.56	19.80	1.22%	0.07	0.19	0.63%	1.00	0.99	0.61%
	Sfa-W	30.67	30.30	1.23%	117.37	118.82	1.22%	90.82	91.65	0.90%	0.23	0.23	1.08%
10	Li-WZ	193.15	192.89	0.13%	37.28	37.33	0.13%	0.00	0.07	0.10%	1.00	1.00	0.19%
	Sfa-WZ	32.19	32.15	0.13%	223.66	223.96	0.13%	181.42	180.55	0.48%	0.19	0.19	2.56%
	Li-W	192.86	192.89	0.02%	37.33	37.33	0.02%	0.00	0.01	0.10%	1.00	1.00	0.04%
	Sfa-W	32.14	32.15	0.02%	224.00	223.96	0.02%	181.76	180.55	0.67%	0.19	0.19	2.71%
11	Li-WZ	328.57	327.41	0.36%	10.96	11.00	0.35%	0.00	0.00	0.01%	1.00	0.94	6.15%
	Sfa-WZ	54.76	54.57	0.36%	65.74	65.97	0.35%	43.68	43.52	0.36%	0.34	0.34	1.39%
	Li-W	325.52	327.41	0.57%	11.06	11.00	0.58%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.04%
	Sfa-W	54.25	54.57	0.57%	66.35	65.97	0.58%	44.29	43.52	1.77%	0.33	0.34	2.30%
12	Li-WZ	481.34	478.89	0.51%	7.48	7.52	0.05%	0.00	0.01	0.01%	1.00	1.00	0.10%
	Sfa-WZ	80.22	79.82	0.51%	44.87	45.10	0.51%	28.53	29.97	4.80%	0.36	0.34	8.55%
	Li-W	477.53	478.89	0.28%	7.54	7.52	0.03%	0.00	0.01	0.01%	1.00	1.00	0.10%
	Sfa-W	79.59	79.82	0.28%	45.23	45.10	0.29%	28.89	29.97	3.61%	0.36	0.34	7.69%
13	Li-WZ	319.34	319.13	0.07%	11.27	11.28	0.07%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-WZ	53.22	53.19	0.07%	67.64	67.68	0.07%	44.53	44.64	0.26%	0.34	0.34	0.37%
	Li-W	317.41	319.13	0.54%	11.34	11.28	0.54%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-W	52.90	53.19	0.54%	68.05	67.68	0.54%	44.94	44.64	0.66%	0.34	0.34	0.24%
14	Li-WZ	344.89	341.56	0.98%	20.88	21.08	0.97%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.07%
	Sfa-WZ	57.48	56.93	0.98%	125.26	126.48	0.97%	89.89	91.12	1.35%	0.28	0.28	1.00%
	Li-W	344.06	341.56	0.73%	20.93	21.08	0.73%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.07%
	Sfa-W	57.34	56.93	0.73%	125.56	126.48	0.73%	90.19	91.12	1.02%	0.28	0.28	0.76%
15	Li-WZ	319.34	319.03	0.10%	11.27	11.28	0.10%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.04%
	Sfa-WZ	53.22	53.17	0.10%	135.28	135.41	0.10%	99.91	100.09	0.18%	0.26	0.26	0.24%
	Li-W	315.10	319.03	1.23%	11.42	11.28	1.25%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.04%
	Sfa-W	52.52	53.17	1.23%	137.10	135.41	1.25%	101.73	100.09	1.64%	0.26	0.26	1.09%
16	Li-WZ	319.34	319.39	0.02%	11.27	11.27	0.02%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-WZ	53.22	53.23	0.02%	67.64	67.63	0.02%	41.32	40.36	2.38%	0.39	0.40	3.50%
	Li-W	316.21	319.39	1.00%	11.38	11.27	1.01%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-W	52.70	53.23	1.00%	68.31	67.63	1.01%	41.99	40.36	4.04%	0.39	0.40	4.44%
17	Li-WZ	344.89	341.04	1.13%	20.88	21.11	1.12%	0.00	0.03	0.10%	1.00	1.00	0.13%
	Sfa-WZ	57.48	56.84	1.13%	125.26	126.67	1.12%	86.17	86.04	0.14%	0.31	0.32	2.70%
	Li-W	343.79	341.04	0.81%	20.94	21.11	0.80%	0.00	0.03	0.10%	1.00	1.00	0.13%

Validierung und Versuchsplan

	Sfa-W	57.30	56.84	0.81%	125.66	126.67	0.80%	86.57	86.04	0.61%	0.31	0.32	3.01%
18	Li-WZ	319.34	318.42	0.29%	11.27	11.31	0.29%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.04%
	Sfa-WZ	53.22	53.07	0.29%	135.28	135.67	0.29%	96.19	95.02	1.23%	0.29	0.30	3.56%
	Li-W	313.82	318.42	1.44%	11.47	11.31	1.47%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.04%
	Sfa-W	52.30	53.07	1.44%	137.66	135.67	1.47%	98.57	95.02	3.73%	0.28	0.30	5.23%
19	Li-WZ	325.92	325.10	0.25%	22.09	22.15	0.25%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.09%
	Sfa-WZ	54.32	54.18	0.25%	132.55	132.88	0.25%	96.76	93.49	3.49%	0.27	0.30	8.91%
	Li-W	325.78	325.10	0.21%	22.10	22.15	0.21%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.09%
	Sfa-W	54.30	54.18	0.21%	132.61	132.88	0.21%	96.82	93.49	3.55%	0.27	0.30	8.95%
20	Li-WZ	481.92	481.16	0.16%	14.94	14.96	0.16%	0.00	0.06	0.10%	1.00	1.00	0.43%
	Sfa-WZ	80.32	80.19	0.16%	89.64	89.78	0.16%	65.57	63.65	3.01%	0.27	0.29	7.74%
	Li-W	481.71	481.16	0.11%	14.95	14.96	0.11%	0.00	0.06	0.10%	1.00	1.00	0.38%
	Sfa-W	80.29	80.19	0.11%	89.68	89.78	0.11%	65.61	63.65	3.07%	0.27	0.29	7.78%
21	Li-WZ	180.58	180.46	0.07%	39.87	39.90	0.07%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.05%
	Sfa-WZ	30.10	30.08	0.07%	239.23	239.39	0.07%	186.52	181.47	2.78%	0.22	0.24	8.93%
	Li-W	180.54	180.46	0.05%	39.88	39.90	0.05%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.05%
	Sfa-W	30.09	30.08	0.05%	239.28	239.39	0.05%	186.57	181.47	2.81%	0.22	0.24	8.95%
22	Li-WZ	466.41	466.82	0.09%	7.72	7.71	0.01%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.02%
	Sfa-WZ	77.74	77.80	0.09%	46.31	46.27	0.09%	31.11	31.09	0.07%	0.33	0.33	0.04%
	Li-W	463.99	466.82	0.61%	7.76	7.71	0.06%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.02%
	Sfa-W	77.33	77.80	0.61%	46.55	46.27	0.61%	31.35	31.09	0.84%	0.33	0.33	0.47%
23	Li-WZ	512.76	507.57	1.02%	14.04	14.19	1.01%	0.00	0.01	0.01%	1.00	1.00	0.06%
	Sfa-WZ	85.46	84.60	1.02%	84.25	85.11	1.01%	60.80	61.76	1.56%	0.28	0.27	1.46%
	Li-W	511.56	507.57	0.79%	14.07	14.19	0.78%	0.00	0.01	0.01%	1.00	1.00	0.06%
	Sfa-W	85.26	84.60	0.79%	84.45	85.11	0.78%	61.00	61.76	1.24%	0.28	0.27	1.22%
24	Li-WZ	466.41	466.10	0.07%	7.72	7.72	0.01%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.05%
	Sfa-WZ	77.74	77.68	0.07%	92.62	92.68	0.07%	69.17	69.22	0.07%	0.25	0.25	0.02%
	Li-W	460.74	466.10	1.15%	7.81	7.72	0.12%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.05%
	Sfa-W	76.79	77.68	1.15%	93.76	92.68	1.16%	70.31	69.22	1.57%	0.25	0.25	1.19%
25	Li-WZ	466.41	465.98	0.09%	7.72	7.73	0.01%	0.00	0.01	0.01%	1.00	1.00	0.07%
	Sfa-WZ	77.74	77.66	0.09%	46.31	46.35	0.09%	28.87	28.39	1.68%	0.38	0.39	2.81%
	Li-W	462.37	465.98	0.77%	7.79	7.73	0.08%	0.00	0.01	0.01%	1.00	1.00	0.07%
	Sfa-W	77.06	77.66	0.77%	46.72	46.35	0.78%	29.28	28.39	3.11%	0.37	0.39	3.65%
26	Li-WZ	512.76	506.70	1.20%	14.04	14.21	1.18%	0.00	0.02	0.09%	1.00	1.00	0.14%

Validierung und Versuchsplan

	Sfa-WZ	85.46	84.45	1.20%	84.25	85.26	1.18%	58.23	58.34	0.19%	0.31	0.32	2.19%
	Li-W	511.16	506.70	0.88%	14.09	14.21	0.87%	0.05	0.02	0.11%	1.00	1.00	0.17%
	Sfa-W	85.19	84.45	0.88%	84.51	85.26	0.87%	58.49	58.34	0.27%	0.31	0.32	2.49%
27	Li-WZ	466.41	466.92	0.11%	7.72	7.71	0.01%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.00%
	Sfa-WZ	77.74	77.82	0.11%	92.62	92.52	0.11%	66.60	65.42	1.81%	0.28	0.29	4.09%
	Li-W	458.93	466.92	1.71%	7.84	7.71	0.17%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.00%
	Sfa-W	76.49	77.82	1.71%	94.13	92.52	1.74%	68.11	65.42	4.11%	0.28	0.29	5.63%
28	Li-WZ	352.17	350.69	0.42%	20.44	20.53	0.42%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.10%
	Sfa-WZ	58.70	58.45	0.42%	122.67	123.19	0.42%	88.09	87.73	0.41%	0.28	0.29	2.07%
	Li-W	350.90	350.69	0.06%	20.52	20.53	0.06%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.10%
	Sfa-W	58.48	58.45	0.06%	123.11	123.19	0.06%	88.53	87.73	0.92%	0.28	0.29	2.42%
29	Li-WZ	525.01	522.61	0.46%	13.71	13.78	0.46%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.15%
	Sfa-WZ	87.50	87.10	0.46%	82.28	82.66	0.46%	60.10	58.78	2.25%	0.27	0.29	6.69%
	Li-W	523.32	522.61	0.14%	13.76	13.78	0.14%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.15%
	Sfa-W	87.22	87.10	0.14%	82.55	82.66	0.14%	60.37	58.78	2.70%	0.27	0.29	6.99%
30	Li-WZ	316.11	315.03	0.34%	22.78	22.86	0.34%	0.00	0.08	0.10%	1.00	1.00	0.36%
	Sfa-WZ	26.34	26.25	0.34%	273.32	274.26	0.34%	229.46	228.82	0.28%	0.16	0.17	3.14%
	Li-W	315.96	315.03	0.30%	22.79	22.86	0.30%	0.00	0.07	0.10%	1.00	1.00	0.31%
	Sfa-W	26.33	26.25	0.30%	273.45	274.26	0.30%	229.59	228.82	0.33%	0.16	0.17	3.19%
31	Li-WZ	466.96	465.36	0.34%	15.42	15.47	0.34%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.00%
	Sfa-WZ	38.91	38.78	0.34%	185.03	185.66	0.34%	156.21	155.71	0.32%	0.16	0.16	3.44%
	Li-W	466.76	465.36	0.30%	15.43	15.47	0.30%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.00%
	Sfa-W	38.90	38.78	0.30%	185.11	185.66	0.30%	156.29	155.71	0.37%	0.16	0.16	3.48%
32	Li-WZ	161.67	160.97	0.44%	22.27	22.37	0.44%	0.00	0.07	0.10%	1.00	1.00	0.29%
	Sfa-WZ	13.47	13.41	0.44%	267.21	268.38	0.44%	225.23	225.68	0.20%	0.16	0.16	1.26%
	Li-W	161.62	160.97	0.41%	22.27	22.37	0.40%	0.00	0.07	0.10%	1.00	1.00	0.29%
	Sfa-W	13.47	13.41	0.41%	267.30	268.38	0.40%	225.32	225.68	0.16%	0.16	0.16	1.29%
33	Li-WZ	284.89	284.81	0.03%	12.64	12.64	0.03%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.00%
	Sfa-WZ	23.74	23.73	0.03%	151.64	151.68	0.03%	121.74	120.78	0.79%	0.20	0.20	3.21%
	Li-W	284.68	284.81	0.04%	12.65	12.64	0.04%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.00%
	Sfa-W	23.72	23.73	0.04%	151.75	151.68	0.04%	121.85	120.78	0.88%	0.20	0.20	3.28%
34	Li-WZ	413.83	413.42	0.10%	8.70	8.71	0.01%	0.00	-0.01	0.01%	1.00	1.00	0.14%
	Sfa-WZ	34.49	34.45	0.10%	104.39	104.50	0.10%	84.86	84.43	0.52%	0.19	0.19	2.59%
	Li-W	413.59	413.42	0.04%	8.70	8.71	0.00%	0.00	-0.01	0.01%	1.00	1.00	-

Validierung und Versuchsplan

													0.14%
	Sfa-W	34.47	34.45	0.04%	104.45	104.50	0.04%	84.92	84.43	0.59%	0.19	0.19	2.65%
35	Li-WZ	325.92	326.06	0.04%	22.09	22.08	0.04%	0.00	-0.01	0.01%	1.00	1.00	0.02%
	Sfa-WZ	27.16	27.17	0.04%	265.10	264.98	0.04%	233.03	231.80	0.53%	0.12	0.13	3.39%
	Li-W	325.82	326.06	0.07%	22.10	22.08	0.07%	0.00	-0.01	0.01%	1.00	1.00	0.06%
	Sfa-W	27.15	27.17	0.07%	265.18	264.98	0.07%	233.11	231.80	0.56%	0.12	0.13	3.42%
36	Li-WZ	297.20	296.15	0.35%	12.11	12.16	0.35%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.13%
	Sfa-WZ	24.77	24.68	0.35%	145.36	145.87	0.35%	121.98	121.17	0.66%	0.16	0.17	5.01%
	Li-W	297.05	296.15	0.30%	12.12	12.16	0.30%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.13%
	Sfa-W	24.75	24.68	0.30%	145.43	145.87	0.30%	122.05	121.17	0.73%	0.16	0.17	5.06%
37	Li-WZ	431.89	428.47	0.80%	8.34	8.40	0.08%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.20%
	Sfa-WZ	35.99	35.71	0.80%	100.03	100.82	0.79%	84.33	84.24	0.10%	0.16	0.16	4.55%
	Li-W	431.68	428.47	0.75%	8.34	8.40	0.07%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.20%
	Sfa-W	35.97	35.71	0.75%	100.07	100.82	0.74%	84.37	84.24	0.16%	0.16	0.16	4.60%
38	Li-WZ	162.56	162.68	0.07%	44.29	44.26	0.07%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.05%
	Sfa-WZ	9.03	9.04	0.01%	797.24	796.66	0.07%	726.98	723.88	0.43%	0.09	0.09	3.53%
	Li-W	162.54	162.68	0.08%	44.30	44.26	0.08%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.05%
	Sfa-W	9.03	9.04	0.01%	797.33	796.66	0.08%	727.07	723.88	0.44%	0.09	0.09	3.54%
39	Li-WZ	294.10	293.60	0.17%	24.48	24.52	0.17%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-WZ	16.34	16.31	0.17%	440.67	441.42	0.17%	392.04	391.18	0.22%	0.11	0.11	3.04%
	Li-W	294.05	293.60	0.15%	24.49	24.52	0.15%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-W	16.34	16.31	0.15%	440.74	441.42	0.15%	392.11	391.18	0.24%	0.11	0.11	3.06%
40	Li-WZ	435.99	434.80	0.27%	16.51	16.56	0.27%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-WZ	24.22	24.16	0.27%	297.25	298.07	0.27%	265.64	265.40	0.09%	0.11	0.11	2.98%
	Li-W	435.92	434.80	0.26%	16.52	16.56	0.26%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-W	24.22	24.16	0.26%	297.30	298.07	0.26%	265.69	265.40	0.11%	0.11	0.11	2.99%
41	Li-WZ	481.34	480.63	0.15%	7.48	7.49	0.01%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.00%
	Sfa-WZ	80.22	80.11	0.15%	89.75	89.88	0.15%	67.57	65.92	2.50%	0.25	0.27	7.29%
	Li-W	473.30	480.63	1.52%	7.61	7.49	0.15%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.00%
	Sfa-W	78.88	80.11	1.52%	91.27	89.88	1.55%	69.09	65.92	4.81%	0.24	0.27	8.84%
43	Li-WZ	297.20	297.25	0.02%	12.11	12.11	0.02%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-WZ	24.77	24.77	0.02%	290.71	290.66	0.02%	254.92	251.65	1.30%	0.12	0.13	8.27%
	Li-W	296.50	297.25	0.25%	12.14	12.11	0.25%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-W	24.71	24.77	0.25%	291.40	290.66	0.25%	255.61	251.65	1.57%	0.12	0.13	8.49%

Validierung und Versuchsplan

44	Li-WZ	431.89	430.60	0.30%	8.34	8.36	0.03%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-WZ	35.99	35.88	0.30%	100.03	100.33	0.30%	75.96	74.28	2.26%	0.24	0.26	7.32%
	Li-W	430.91	430.60	0.07%	8.35	8.36	0.01%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-W	35.91	35.88	0.07%	200.51	200.65	0.07%	176.44	174.60	1.05%	0.12	0.13	7.53%
45	Li-WZ	259.16	259.34	0.07%	13.89	13.88	0.07%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-WZ	14.40	14.41	0.07%	500.08	499.73	0.07%	451.45	449.18	0.50%	0.10	0.10	3.86%
	Li-W	258.94	259.34	0.15%	13.90	13.88	0.15%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.01%
	Sfa-W	14.39	14.41	0.15%	500.49	499.73	0.15%	451.86	449.18	0.60%	0.10	0.10	3.95%
46	Li-WZ	379.16	378.45	0.19%	9.49	9.51	0.02%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.03%
	Sfa-WZ	21.06	21.03	0.19%	341.81	342.45	0.19%	310.20	309.15	0.34%	0.09	0.10	4.90%
	Li-W	378.89	378.45	0.12%	9.50	9.51	0.01%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.03%
	Sfa-W	21.05	21.03	0.12%	342.05	342.45	0.12%	310.44	309.15	0.42%	0.09	0.10	4.97%
47	Li-WZ	273.96	273.20	0.28%	13.14	13.18	0.28%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.02%
	Sfa-WZ	15.22	15.18	0.28%	473.06	474.38	0.28%	434.15	432.21	0.45%	0.08	0.09	7.47%
	Li-W	273.76	273.20	0.21%	13.15	13.18	0.20%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.02%
	Sfa-W	15.21	15.18	0.21%	473.41	474.38	0.20%	434.50	432.21	0.53%	0.08	0.09	7.54%
48	Li-WZ	399.04	397.01	0.51%	9.02	9.07	0.05%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.20%
	Sfa-WZ	22.17	22.06	0.51%	324.78	326.44	0.51%	298.87	298.23	0.21%	0.08	0.09	7.68%
	Li-W	398.76	397.01	0.44%	9.03	9.07	0.04%	0.00	0.02	0.10%	1.00	1.00	0.20%
	Sfa-W	22.15	22.06	0.44%	325.01	326.44	0.44%	299.10	298.23	0.29%	0.08	0.09	7.75%
49	Li-WZ	259.16	259.40	0.09%	13.89	13.88	0.09%	0.00	0.01	0.01%	1.00	1.00	0.06%
	Sfa-WZ	14.40	14.41	0.09%	500.08	499.61	0.09%	455.17	454.58	0.13%	0.09	0.09	0.36%
	Li-W	258.99	259.40	0.16%	13.90	13.88	0.16%	0.00	0.01	0.01%	1.00	1.00	0.06%
	Sfa-W	14.39	14.41	0.16%	500.41	499.61	0.16%	455.50	454.58	0.20%	0.09	0.09	0.42%
50	Li-WZ	379.16	379.09	0.02%	9.49	9.50	0.00%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.04%
	Sfa-WZ	21.06	21.06	0.02%	341.81	341.87	0.02%	312.77	312.88	0.04%	0.08	0.08	0.19%
	Li-W	378.95	379.09	0.04%	9.50	9.50	0.00%	0.00	0.00	0.01%	1.00	1.00	0.04%
	Sfa-W	21.05	21.06	0.04%	342.00	341.87	0.04%	312.96	312.88	0.03%	0.08	0.08	0.13%

## E Eingangsdaten

### E.1 Eingangsdatensätze Lagerstrategie Durchsatzbasierte Einlagerung

Tabelle 40 bis Tabelle 43 zeigen die Eingangsdatensätze der in Abschnitt 7.1.1 untersuchten Varianten.

**Tabelle 40: Eingangsdatensatz, Variante 1**

Bezeichnung	Einheit	V. 1a	V. 1b
Gassenlänge	mm	50000	50000
Kanaltiefe Links		1	1
Kanaltiefe Rechts		1	1
Anzahl Ebenen		12	12
Anzahl eingesetzter Shuttle-Fahrzeuge im Shuttle-System (ein Gang)		3	3
Höhe Ladeinheit	mm	400	400
Breite Ladeinheit (Fahrtrichtung Lastaufnahmemittel)	mm	400	400
Länge Ladeinheit (Fahrtrichtung Shuttle-Fahrzeug)	mm	400	400
Horizontaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten (Fahrtrichtung Shuttle-Fahrzeug)	mm	100	100
Horizontaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten in der Tiefe (Fahrtrichtung Lastaufnahmemittel)	mm	100	100
Vertikaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten	mm	100	100
Parametrierung des Zeitbedarfs des Lastaufnahmemittels		1	1
Geschwindigkeit Fahrzeugheber	m/s	1	1
Geschwindigkeit Shuttle-Fahrzeug	m/s	1	1
Geschwindigkeit Lastaufnahmemittel unbeladen	m/s	1	1
Geschwindigkeit Lastaufnahmemittel, beladen	m/s	1	1
Beschleunigung Fahrzeugheber	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Beschleunigung Shuttle-Fahrzeug	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Beschleunigung Lastaufnahmemittel	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Beschleunigung Lastaufnahmemittel, beladen	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Bremsbeschleunigung Fahrzeugheber	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Bremsbeschleunigung Shuttle-Fahrzeug	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Bremsbeschleunigung Lastaufnahmemittel, unbeladen	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Bremsbeschleunigung Lastaufnahmemittel, beladen	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Dauer, die zum Anheben oder Absetzen der Ladeinheit durch das Lastaufnahmemittel benötigt wird	s	1	1
Übergabe des Shuttle-Fahrzeugs von der Ebene auf den Fahrzeugheber oder vom Fahrzeugheber in die Ebene	s	4	4
Schalt- und Positionierzeit Fahrzeugheber	s	1	1
Schalt- und Positionierzeit Shuttle-Fahrzeug	s	0,1	0,1
Zeit für die Aufnahme/Abgabe der Ladeinheit durch das Shuttle-Fahrzeug am Ein/Auslagerungspunkt		4	4
Zeit für einen Lastaufnahmevorgang einfachtief	s	4	4
Zeit für einen Lastaufnahmevorgang doppeltief	s	6	6
Anzahl der Artikel(nummern) des Anwenders		1000	1000
Anzahl der Artikel(nummern) der Schnelldreher-Artikel des Anwenders		100	20
Anteil der Schnelldreher-Ladeeinheiten im Shuttle-System (ein Gang)	%	100	20
Zugriffshäufigkeit für Schnelldreher-Ladeeinheiten	%	100	80
Füllgrad des Shuttle-Systems (ein Gang)	%	95	95
Zonierungsstrategie des Shuttle-Systems		2	3
Zonierung eines Rechteckes		0	1
Ebenenausschluss für Rechteckzonierung		0	8

Mittlere Zeitverzögerung bis eine ausgelagerte Ladeeinheit als Einlagerauftrag zum Shuttle-System zurückkehrt	s	500	500
Mittlere Schwankungsbreite der Zeitverzögerung, bis eine ausgelagerte Ladeeinheit als Einlagerauftrag zum Shuttle-System zurückkehrt	s	300	300
Mittlere Auftragslänge eines Auftrags (Anzahl an Positionen)		10	10
Schwankungsbreite der mittleren Auftragslänge		5	5
Anzahl stündliche Fahraufträge		150	150

**Tabelle 41: Eingangsdatensatz, Variante 2**

Bezeichnung	Einheit	V. 1a	V. 1b
Gassenlänge	mm	80000	80000
Kanaltiefe Links		2	2
Kanaltiefe Rechts		2	2
Anzahl Ebenen		15	15
Anzahl eingesetzter Shuttle-Fahrzeuge im Shuttle-System (ein Gang)		5	5
Höhe Ladeeinheit	mm	400	400
Breite Ladeeinheit (Fahrtrichtung Lastaufnahmemittel)	mm	400	400
Länge Ladeeinheit (Fahrtrichtung Shuttle-Fahrzeug)	mm	400	400
Horizontaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten (Fahrtrichtung Shuttle-Fahrzeug)	mm	100	100
Horizontaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten in der Tiefe (Fahrtrichtung Lastaufnahmemittel)	mm	100	100
Vertikaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten	mm	100	100
Parametrierung des Zeitbedarfs des Lastaufnahmemittels		1	1
Geschwindigkeit Fahrzeugheber	m/s	5	5
Geschwindigkeit Shuttle-Fahrzeug	m/s	4	4
Geschwindigkeit Lastaufnahmemittel unbeladen	m/s	3	3
Geschwindigkeit Lastaufnahmemittel, beladen	m/s	3	3
Beschleunigung Fahrzeugheber	m/(s <sup>2</sup> )	5	5
Beschleunigung Shuttle-Fahrzeug	m/(s <sup>2</sup> )	4	4
Beschleunigung Lastaufnahmemittel	m/(s <sup>2</sup> )	3	3
Beschleunigung Lastaufnahmemittel, beladen	m/(s <sup>2</sup> )	3	3
Bremsbeschleunigung Fahrzeugheber	m/(s <sup>2</sup> )	5	5
Bremsbeschleunigung Shuttle-Fahrzeug	m/(s <sup>2</sup> )	4	4
Bremsbeschleunigung Lastaufnahmemittel, unbeladen	m/(s <sup>2</sup> )	3	3
Bremsbeschleunigung Lastaufnahmemittel, beladen	m/(s <sup>2</sup> )	3	3
Dauer, die zum Anheben oder Absetzen der Ladeeinheit durch das Lastaufnahmemittel benötigt wird	s	1	1
Übergabe des Shuttle-Fahrzeugs von der Ebene auf den Fahrzeugheber oder vom Fahrzeugheber in die Ebene	s	2	2
Schalt- und Positionierzeit Fahrzeugheber	s	0,1	0,1
Schalt- und Positionierzeit Shuttle-Fahrzeug	s	0,1	0,1
Zeit für die Aufnahme/Abgabe der Ladeeinheit durch das Shuttle-Fahrzeug am Ein/Auslagerungspunkt		3	3
Zeit für einen Lastaufnahmevergange einfachtief	s	2	2
Zeit für einen Lastaufnahmevergange doppeltief	s	5	5
Mittlere Zeitverzögerung bis eine ausgelagerte Ladeeinheit als Einlagerauftrag zum Shuttle-System zurückkehrt	s	500	500
Mittlere Schwankungsbreite der Zeitverzögerung, bis eine ausgelagerte Ladeeinheit als Einlagerauftrag zum Shuttle-System zurückkehrt	s	300	300
Mittlere Auftragslänge eines Auftrags (Anzahl an Positionen)		10	10
Schwankungsbreite der mittleren Auftragslänge		5	5
Anzahl stündliche Fahraufträge		300	300

**Tabelle 42: Eingangsdatensatz, Variante 3**

Bezeichnung	Einheit	V. 1a	V. 1b
-------------	---------	-------	-------

Gassenlänge	mm	80000	80000
Kanaltiefe Links		2	2
Kanaltiefe Rechts		2	2
Anzahl Ebenen		15	15
Anzahl eingesetzter Shuttle-Fahrzeuge im Shuttle-System (ein Gang)		1	1
Anzahl der Ebenen, die ein Shuttle-Fahrzeug bedient (1, 2 oder maximal 3)	mm	1	1
Höhe Ladeeinheit	mm	400	400
Breite Ladeeinheit (Fahrtrichtung Lastaufnahmemittel)	mm	400	400
Länge Ladeeinheit (Fahrtrichtung Shuttle-Fahrzeug)	mm	400	400
Horizontaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten (Fahrtrichtung Shuttle-Fahrzeug)	mm	100	100
Horizontaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten in der Tiefe (Fahrtrichtung Lastaufnahmemittel)	mm	100	100
Vertikaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten	mm	100	100
Parametrierung des Zeitbedarfs des Lastaufnahmemittels		0	0
Geschwindigkeit Auslagerheber	m/s	6	6
Geschwindigkeit Einlagerheber	m/s	6	6
Geschwindigkeit Shuttle-Fahrzeug	m/s	1	1
Geschwindigkeit Lastaufnahmemittel unbeladen	m/s	1	1
Geschwindigkeit Lastaufnahmemittel, beladen	m/s	1	1
Beschleunigung Auslagerheber	m/s	6	6
Beschleunigung Einlagerheber	m/(s <sup>2</sup> )	6	6
Beschleunigung Shuttle-Fahrzeug	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Beschleunigung Lastaufnahmemittel	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Beschleunigung Lastaufnahmemittel, beladen	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Bremsbeschleunigung Auslagerheber	m/(s <sup>2</sup> )	6	6
Bremsbeschleunigung Einlagerheber	m/(s <sup>2</sup> )	6	6
Bremsbeschleunigung Shuttle-Fahrzeug	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Bremsbeschleunigung Lastaufnahmemittel, unbeladen	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Bremsbeschleunigung Lastaufnahmemittel, beladen	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Übergabezeit des Shuttle-Fahrzeugs zur Lastaufnahme/abgabe einer Ladeeinheit auf einen Übergabeplatz	s	4	4
Übergabezeit des Auslagerhebers zur Lastaufnahme/abgabe einer Ladeeinheit auf einen Übergabeplatz	s	2	2
Übergabezeit des Einlagerhebers zur Lastaufnahme/abgabe einer Ladeeinheit auf einen Übergabeplatz	s	2	2
Dauer, die zum Anheben oder Absetzen der Ladeeinheit durch das Lastaufnahmemittel benötigt wird	s	0,5	0,5
Zeit für einen Lastaufnahmevergange einfachtief	s	1	1
Zeit für einen Lastaufnahmevergange doppeltief	s	1	1
Anzahl der Artikel(nummern) des Anwenders		10000	10000
Anzahl der Artikel(nummern) der Schnelldreher-Artikel des Anwenders		100	20
Anteil der Schnelldreher-Ladeeinheiten im Shuttle-System (ein Gang)	%	100	20
Zugriffshäufigkeit für Schnelldreher-Ladeeinheiten	%	100	80
Füllgrad des Shuttle-Systems (ein Gang)	%	95	95
Zonierungsstrategie des Shuttle-Systems		2	2
Mittlere Zeitverzögerung bis eine ausgelagerte Ladeeinheit als Einlagerauftrag zum Shuttle-System zurückkehrt	s	500	500
Mittlere Schwankungsbreite der Zeitverzögerung, bis eine ausgelagerte Ladeeinheit als Einlagerauftrag zum Shuttle-System zurückkehrt	s	300	300
Mittlere Auftragslänge eines Auftrags (Anzahl an Positionen)		10	10
Schwankungsbreite der mittleren Auftragslänge		5	5
Anzahl Fahraufträge Stunde 1		450	600

Tabelle 43: Eingangsdatensatz, Variante 4

Bezeichnung	Einheit	V. 1a	V. 1b
Gassenlänge	mm	40000	40000
Kanaltiefe Links		1	1
Kanaltiefe Rechts		1	1
Anzahl Ebenen		25	25
Anzahl eingesetzter Shuttle-Fahrzeuge im Shuttle-System (ein Gang)		1	1
Anzahl der Ebenen, die ein Shuttle-Fahrzeug bedient (1, 2 oder maximal 3)	mm	1	1
Höhe Ladeeinheit	mm	400	400
Breite Ladeeinheit (Fahrtrichtung Lastaufnahmemittel)	mm	400	400
Länge Ladeeinheit (Fahrtrichtung Shuttle-Fahrzeug)	mm	400	400
Horizontaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten (Fahrtrichtung Shuttle-Fahrzeug)	mm	100	100
Horizontaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten in der Tiefe (Fahrtrichtung Lastaufnahmemittel)	mm	100	100
Vertikaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten	mm	100	100
Parametrierung des Zeitbedarfs des Lastaufnahmemittels		0	0
Geschwindigkeit Auslagerheber	m/s	3	3
Geschwindigkeit Einlagerheber	m/s	3	3
Geschwindigkeit Shuttle-Fahrzeug	m/s	2	2
Geschwindigkeit Lastaufnahmemittel unbeladen	m/s	1	1
Geschwindigkeit Lastaufnahmemittel, beladen	m/s	1	1
Beschleunigung Auslagerheber	m/s	3	3
Beschleunigung Einlagerheber	m/(s <sup>2</sup> )	3	3
Beschleunigung Shuttle-Fahrzeug	m/(s <sup>2</sup> )	2	2
Beschleunigung Lastaufnahmemittel	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Beschleunigung Lastaufnahmemittel, beladen	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Bremsbeschleunigung Auslagerheber	m/(s <sup>2</sup> )	3	3
Bremsbeschleunigung Einlagerheber	m/(s <sup>2</sup> )	3	3
Bremsbeschleunigung Shuttle-Fahrzeug	m/(s <sup>2</sup> )	2	2
Bremsbeschleunigung Lastaufnahmemittel, unbeladen	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Bremsbeschleunigung Lastaufnahmemittel, beladen	m/(s <sup>2</sup> )	1	1
Übergabezeit des Shuttle-Fahrzeugs zur Lastaufnahme/abgabe einer Ladeeinheit auf einen Übergabeplatz	s	5	5
Übergabezeit des Auslagerhebers zur Lastaufnahme/abgabe einer Ladeeinheit auf einen Übergabeplatz	s	4	4
Übergabezeit des Einlagerhebers zur Lastaufnahme/abgabe einer Ladeeinheit auf einen Übergabeplatz	s	4	4
Dauer, die zum Anheben oder Absetzen der Ladeeinheit durch das Lastaufnahmemittel benötigt wird	s	4	4
Zeit für einen Lastaufnahmevorgang einfachtief	s	1	1
Zeit für einen Lastaufnahmevorgang doppeltief	s	1	1
Anzahl der Artikel(nummern) des Anwenders		10000	10000
Anzahl der Artikel(nummern) der Schnelldreher-Artikel des Anwenders		100	40
Anteil der Schnelldreher-Ladeeinheiten im Shuttle-System (ein Gang)	%	100	40
Zugriffshäufigkeit für Schnelldreher-Ladeeinheiten	%	100	70
Füllgrad des Shuttle-Systems (ein Gang)	%	95	93
Zonierungsstrategie des Shuttle-Systems		2	2
Mittlere Zeitverzögerung bis eine ausgelagerte Ladeeinheit als Einlagerauftrag zum Shuttle-System zurückkehrt	s	500	500
Mittlere Schwankungsbreite der Zeitverzögerung, bis eine ausgelagerte Ladeeinheit als Einlagerauftrag zum Shuttle-System zurückkehrt	s	300	300
Mittlere Auftragslänge eines Auftrags (Anzahl an Positionen)		10	10
Schwankungsbreite der mittleren Auftragslänge		5	5

Anzahl Fahraufträge Stunde 1		300	320
------------------------------	--	-----	-----

## E.2 Eingangsdatensätze zur Anwendung des A-Priori- und des evolutionären Algorithmus

Tabelle 44 zeigt die konstanten Parameterwerte des untersuchten Shuttle-Systems.

**Tabelle 44: Konstante Parameterwerte**

Parameter	Parameterwert
Abstand zwischen zwei Ebenen ( $l_y$ ) [m]	0,4
Abstand zwischen zwei Positionen im Gang ( $l_x$ ) [m]	0,5
Anzahl Positionen im Gang ( $n_x$ )	100
Lastaufnahmezeiten Shuttle-Fahrzeug ( $t_{G,x} = t_{G,\ddot{U}P,x}$ ) [s]	3
Position E/A-Punkt ( $l_{EA}$ ) [m]	-1
Positionier- und Schaltzeiten Heber ( $t_{P,y}$ ) [s]	0,5
Positionier- und Schaltzeiten Shuttle-Fahrzeug ( $t_{P,x}$ ) [s]	0,5
Lagertiefe	1
Shuttle-System	GEG-System

Tabelle 45 zeigt die variablen Parameter, d. h. die Variantenbildung.

**Tabelle 45: Variable Parameterwerte**

Variante	1	2	3	4	5
Anzahl Ebenen ( $n_y$ )	12				36
Beschleunigung Heber ( $a_L$ ) [ $m/s^2$ ]	2	4	7	2	4
Beschleunigung Shuttle-Fahrzeug ( $a_S$ ) [ $m/s^2$ ]	5	3,5	2	5	3,5
Geschwindigkeit Heber ( $v_L$ ) [m/s]	1	4	7	1	4
Geschwindigkeit Shuttle-Fahrzeug ( $v_S$ ) [m/s]	5	3,5	2	5	3,5
Lagerfüllgrad [%]	95			50	95
Lastaufnahmezeit Heber ( $t_{G,y}$ ) [s]	1	4	2,5	1	4

Tabelle 46 zeigt die Anzahl der Positionen je Zone für eine unterschiedliche Anzahl an Zonen.

**Tabelle 46: Anzahl Positionen für eine unterschiedliche Anzahl an Zonen**

Zonen	1	2	3	4	6
$l_z$ (Anzahl Positionen pro Zone)	$l_z = (1200)$	$l_z = \begin{pmatrix} 400 \\ 800 \end{pmatrix}$	$l_z = \begin{pmatrix} 240 \\ 360 \\ 600 \end{pmatrix}$	$l_z = \begin{pmatrix} 120 \\ 180 \\ 300 \\ 600 \end{pmatrix}$	$l_z = \begin{pmatrix} 100 \\ 140 \\ 160 \\ 200 \\ 280 \\ 320 \end{pmatrix}$
$w_z$ (Zugriffshäufigkeit pro Zone)	$w_z = (1)$	$w_z = \begin{pmatrix} 0,6 \\ 0,4 \end{pmatrix}$	$w_z = \begin{pmatrix} 0,6 \\ 0,3 \\ 0,1 \end{pmatrix}$	$w_z = \begin{pmatrix} 0,6 \\ 0,3 \\ 0,1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$w_z = \begin{pmatrix} 0,3 \\ 0,25 \\ 0,2 \\ 0,15 \\ 0,06 \\ 0,04 \end{pmatrix}$

### E.3 Eingangsdatensätze Lagestrategie Reihenfolgesortierung, Anwendung mit Annahme Grenzdurchsatz

Tabelle 47 zeigt die konstanten Parameterwerte des untersuchten Shuttle-Systems.

**Tabelle 47: Konstante Parameterwerte**

Parameter	Parameterwert
Abstand zwischen zwei Ebenen ( $l_y$ ) [m]	0,4
Abstand zwischen zwei Positionen im Gang ( $l_x$ ) [m]	0,5
Anzahl Ebenen ( $n_y$ )	12
Anzahl Positionen im Gang ( $n_x$ )	100
Lagerfüllgrad [%]	95
Lastaufnahmezeit Heber ( $t_{G,y}$ ) [s]	2
Lastaufnahmezeiten Heber ( $t_{G,x} = t_{G,ÜP,x}$ ) [s]	3
Position E/A-Punkt ( $l_{EA}$ ) [m]	-1
Positionier- und Schaltzeiten Heber ( $t_{p,y}$ ) [s]	0,5
Positionier- und Schaltzeiten Shuttle-Fahrzeug ( $t_{p,x}$ ) [s]	0,5
Lagertiefe	1
Shuttle-System	GEG-System

Tabelle 48 zeigt die variablen Parameterwerte, d. h. die Variantenbildung.

**Tabelle 48: Variable Parameterwerte**

Variante	1	2	3
<b>Parameter</b>	<b>Parameterwert</b>		
Beschleunigung Heber ( $a_l$ ) [ $m/s^2$ ]	2,5	7	2,5
Beschleunigung Shuttle-Fahrzeug ( $a_s$ ) [ $m/s^2$ ]	2	2	7
Geschwindigkeit Heber ( $v_l$ ) [m/s]	2	7	2
Geschwindigkeit Shuttle-Fahrzeug ( $v_s$ ) [m/s]	2	2	7

### E.4 Eingangsdatensätze Lagerstrategie Reihenfolgesortierung, variable Auftragslast

Die im Folgenden genannten Parameterwerte beziehen sich auf die in Abschnitt 7.2.2 untersuchten Varianten. Für gang- und ebenengebundene sowie für ganggebundene Shuttle-Systeme wurden jeweils dieselben Varianten 1 und 2 angewendet. Tabelle 47 zeigt die konstanten Parameter, die für beide Varianten gelten.

**Tabelle 49: Konstante Parameterwerte**

Parameter	Parameterwert
Abstand zwischen zwei Ebenen ( $l_y$ ) [m]	0,4
Abstand zwischen zwei Positionen im Gang ( $l_x$ ) [m]	0,5
Anzahl Positionen im Gang ( $n_x$ )	100
Lagerfüllgrad [%]	95
Position E/A-Punkt ( $l_{EA}$ ) [m]	-1
Positionier- und Schaltzeiten Heber ( $t_{p,y}$ ) [s]	0,5
Positionier- und Schaltzeiten Shuttle-Fahrzeug ( $t_{p,x}$ ) [s]	0,5
Lagertiefe	2
Mittlere Auftragslänge	10
Schwankungsbreite mittlere Auftragslänge	5

Tabelle 50 zeigt die variablen Parameterwerte, d. h. die Variantenbildung.

**Tabelle 50: Variable Parameterwerte**

Variante	1	2
Parameter	Parameterwert	
Shuttle-System	GEG/GG	GEG/GG
Anzahl Ebenen	12	36
Lastaufnahmezeiten Shuttle-Fahrzeug [s]	3 (ÜP), 4 (ET), 6 (DT)	2 (ET und ÜP), 4 (DT)
Lastaufnahmezeit Heber ( $t_{G,y}$ ) [s]	5	2
Beschleunigung Heber ( $a_L$ ) [ $m/s^2$ ]	3	2,5
Beschleunigung Shuttle-Fahrzeug ( $a_S$ ) [ $m/s^2$ ]	2,5	2
Geschwindigkeit Heber ( $v_L$ ) [m/s]	3	2
Geschwindigkeit Shuttle-Fahrzeug ( $v_S$ ) [m/s]	2,5	2
Auftragseingang Auslageraufträge pro Stunde	250, 350 (GEG), 150, 250 (GG)	250, 450 (GEG), 150, 250 (GG)
Anzahl Shuttle-Fahrzeuge	12 (GEG), 11 (GG)	36 (GEG), 32 (GG)

### E.5 Eingangsdatensätze Lagerstrategie Lagerreorganisation, GG-System

Tabelle 51 zeigt die Eingangsdatensätze der in 7.3.1 untersuchten Varianten.

**Tabelle 51: Eingangsdatensatz Lagerreorganisation, GG-System**

Bezeichnung	Einheit	Variante 1	Variante 2
Gassenlänge		50000	50000
Kanaltiefe Links		2	2
Kanaltiefe Rechts		2	2
Anzahl Ebenen		12	12
Anzahl eingesetzter Shuttle-Fahrzeuge im Shuttle-System (ein Gang)		4	4
Höhe Ladeeinheit	mm	400	400
Breite Ladeeinheit (Fahrtrichtung Lastaufnahmemittel)	mm	400	400
Länge Ladeeinheit (Fahrtrichtung Shuttle-Fahrzeug)	mm	400	400
Horizontaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten (Fahrtrichtung Shuttle-Fahrzeug)	mm	100	100
Horizontaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten in der Tiefe (Fahrtrichtung Lastaufnahmemittel)	mm	100	100
Vertikaler Abstand zwischen zwei Ladeeinheiten	mm	100	100
Parametrierung des Zeitbedarfs des Lastaufnahmemittels		1	1
Geschwindigkeit Fahrzeugheber	m/s	3	1
Geschwindigkeit Shuttle-Fahrzeug	m/s	3	1
Geschwindigkeit Lastaufnahmemittel unbeladen	m/s	3	1
Geschwindigkeit Lastaufnahmemittel, beladen	m/s	3	1
Beschleunigung Fahrzeugheber	$m/(s^2)$	3	1
Beschleunigung Shuttle-Fahrzeug	$m/(s^2)$	3	1
Beschleunigung Lastaufnahmemittel	$m/(s^2)$	3	1
Beschleunigung Lastaufnahmemittel, beladen	$m/(s^2)$	3	1
Bremsbeschleunigung Fahrzeugheber	$m/(s^2)$	3	1
Bremsbeschleunigung Shuttle-Fahrzeug	$m/(s^2)$	3	1
Bremsbeschleunigung Lastaufnahmemittel, unbeladen	$m/(s^2)$	3	1
Bremsbeschleunigung Lastaufnahmemittel, beladen	$m/(s^2)$	3	1
Dauer, die zum Anheben oder Absetzen der Ladeeinheit durch das Lastaufnahmemittel benötigt wird	s	1	1
Übergabe des Shuttle-Fahrzeugs von der Ebene auf den Fahrzeugheber oder vom Fahrzeugheber in die Ebene	s	3	6
Schalt- und Positionierzeit Fahrzeugheber	s	0,1	0,1
Schalt- und Positionierzeit Shuttle-Fahrzeug	s	0,1	0,1

Zeit für einen Lastaufnahmevorgang einfachtief	s	3	6
Zeit für einen Lastaufnahmevorgang doppeltief	s	5	8
Anzahl der Artikel(nummern) des Anwenders		3000	3000
Anzahl der Artikel(nummern) der Schnelldreher-Artikel des Anwenders		10	10
Anteil der Schnelldreher-Ladeeinheiten im Shuttle-System (ein Gang)	%	10	10
Zugriffshäufigkeit für Schnelldreher-Ladeeinheiten	%	70	70
Füllgrad des Shuttle-Systems (ein Gang)	%	95	95
Zonierungsstrategie des Shuttle-Systems		3	3
Zonierung eines Rechteckes			
Ebenenausschluss für Rechteckzonierung		8	8
Anzahl durchzuführender Umlagerungen		418	418

## E.6 Eingangsdatensätze Lagerstrategie Lagerreorganisation, GEG-System

Tabelle 52 zeigt die Parameterwerte des untersuchten Shuttle-Systems.

**Tabelle 52: Parameterwerte**

Parameter	Parameterwert
Abstand zwischen zwei Ebenen ( $l_y$ ) [m]	0,4
Abstand zwischen zwei Positionen im Gang ( $l_x$ ) [m]	0,5
Anzahl Ebenen ( $n_y$ )	12
Anzahl Positionen im Gang ( $n_x$ )	100
Beschleunigung Heber ( $a_l$ ) [ $m/s^2$ ]	2
Beschleunigung Shuttle-Fahrzeug ( $a_s$ ) [ $m/s^2$ ]	2
Geschwindigkeit Heber ( $v_l$ ) [m/s]	2,5
Geschwindigkeit Shuttle-Fahrzeug ( $v_s$ ) [m/s]	2
Lagerfüllgrad [%]	95
Lastaufnahmezeit Heber ( $t_{G,y}$ ) [s]	2
Lastaufnahmezeiten Heber ( $t_{G,x} = t_{G,\ddot{u}P,x}$ ) [s]	3
Position E/A-Punkt ( $l_{EA}$ ) [m]	-1
Positionier- und Schaltzeiten Heber ( $t_{P,y}$ ) [s]	0,5
Positionier- und Schaltzeiten Shuttle-Fahrzeug ( $t_{P,x}$ ) [s]	0,5
Shuttle-System	GEG-System