

Entwicklung von Routingstrategien für fahrerlose Transportfahrzeuge in einem automatisierten Lagersystem

Development of routing strategies for driverless transport vehicles in an automated warehouse

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades
M.Sc.
an der Maschinenwesen der Technischen Universität München.

Themenstellende/r Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Betreuer/Betreuerin Siciliano, Giulia; M.Sc.

Eingereicht von Xiaobing Dai
Tumblingerstraße 56, 315
80337 München
+49 152 575 351 82

Eingereicht am 11.05.2020 in Garching

Inventarnr. fml 2019104

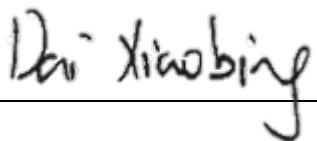
Anhang I

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

München, Garching, 11.05.2020

Ort, Datum, Unterschrift

Dr. Xiaobing

Anhang II

Vorwort

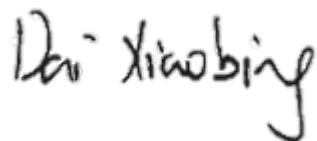
Die vorliegende Arbeit entstand unter der wissenschaftlichen und inhaltlichen Anleitung von Giulia Siciliano, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München.

Vereinbarung zum Urheberrecht

Hiermit gestatte ich dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik diese Studienarbeit bzw. Teile davon nach eigenem Ermessen an Dritte weiterzugeben, zu veröffentlichen oder anderweitig zu nutzen. Mein persönliches Urheberrecht ist über diese Regelung hinaus nicht beeinträchtigt.

Eventuelle Geheimhaltungsvereinbarungen über den Inhalt der Arbeit zwischen mir bzw. dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik und Dritten bleiben von dieser Vereinbarung unberührt.

München, Garching, 11.05.2020



Ort, Datum, Unterschrift

Abstract

In this thesis, we propose diverse routing strategies for a shuttle based warehouse, in order to improve the throughput of the warehouse.

In terms of optimization through order selection, we propose three criteria for order selection. For each criteria, we develop several implementation options. In addition, we also give two possible order selection methods. Through the combination of various criteria and different order selection methods, a specific implementation method of the optimization algorithm through order selection is given.

In terms of the optimization through order exchange, we propose the two-stage path-finding algorithm, in order to plan a route for the shuttle in motion after order exchange. In this thesis, we will discuss the specific implementation method of the two-stage path-finding algorithm for only a shuttle. In addition, we also discuss the problems and the possible solutions by the simultaneous planning for multiple shuttles.

Finally, we test the long-term stability and the efficiency of each strategy, and get the optimal parameter combination of each algorithm according to the results of the tests. Besides, we also study the influence of the shuttle quantity of the shuttles on system efficiency under each optimal algorithm, in order to provide a basis for the cost accounting of the system.

Inhaltsverzeichnis

Anhang I

Anhang II

Abstract

Abkürzungsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	2
1.3 Optimierungs- und Simulationsmethoden	2
1.3.1 Routingmethode	2
1.3.2 Methoden für Auswahl der Aufträge	3
1.3.3 Tecnomatix Plant Simulation	4
1.4 Aufbau der Arbeit	5
2 Stand der Technik	7
2.1 Modellierung von Multi-Agent-Path-Finding-Problem (MAPF-Problem) durch Zeitfenstermethode	8
2.1.1 Die Konfigurationen des Shuttle-Systems	8
2.1.2 Definitionen von Symbolen und Variablen für die Implementierung der Zeitfenster-Routing-Methode	9
2.1.3 Beschreibung der Routingstrategie in Rahmen der Zeitfenster-Modell	11
2.1.4 Integration von Beschleunigung und Verzögerung in der Zeitfenster-Routing-Methode	16
2.1.5 Einfluss der Sequenzierung auf der Zeitfenster-Routing-Methode	28
2.2 Heuristische Routingalgorithmen für einen Shuttle für lokale Optimierung	31
2.2.1 Dijkstra-Algorithmus zum Routing von bestimmten Startort zu jedem Zielort	32
2.2.2 Floyd-Warshall-Algorithmus zum Routing zwischen allen Paaren von Knoten	33

2.2.3 A*-Algorithmus zur Verringerung des Rechenaufwands	35
2.3 Kollisions- und Deadlocks-freier Multi-Agent-Path-Finding-Algorithmen für globale Optimierung	36
2.3.1 A* basierte Kooperative Pathfinding	36
2.3.2 Biased Cost Pathfinding (BCP)	44
2.3.3 Independence Detection (ID)	46
3 Entwicklung des Models	49
3.1 Initialisierung	49
3.1.1 Setzen der Eigenschaften aller Knoten im Modell	50
3.1.2 Erzeugung der Shuttles	54
3.1.3 Erstellung der Aufträge-Tabelle	56
3.1.4 Auslösung der Bewegung von Shuttles	56
3.2 Layout-Modul	58
3.2.1 Der Aufbau und das Verbindungsverfahren des Knotens	59
3.2.2 Die Konfiguration und Bewegung des Shuttles	62
3.2.3 Sensoren an den Knoten	66
3.3 Auftrags-Modul	66
3.3.1 Auslösezeit für die Zuweisung des Auftrags	66
3.3.2 Ergänzungsmethode von Auftragsbibliothek	70
3.3.3 Zuweisung der Aufträge	74
3.4 Routingmodul	76
3.4.1 Initialisierungsmodul für das Routing	78
3.4.2 Routingmodul	79
3.4.3 Nachbearbeitungsmodul für das Routing	81
3.5 Bewegungsmodul	82
3.5.1 Methodengrupp bei der Ankunft des Knotens	82
3.5.2 Methodengrupp bei dem Austritt des Knotens	85
3.5.3 Methode für das Bremsen des Shuttles	86
4 Optimierung bei der Zuweisung des Auftrags	87
4.1 Auswahlkriterien der Aufträge	87
4.1.1 Abstand -Kriterium: den Abstand zwischen dem Start-knoten des Auftrags und der aktuelle Standort des Shuttles	87

4.1.2 Sequenz-Kriterium: die Sequenz der Aufträge	89
4.1.3 Zeit-Kriterium: den Zeitstempel, die Aufgabe erstellt wurde	93
4.2 Individuelle Optimierung	94
4.3 Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles	101
4.3.1 Heuristische Methode zur Suche der besten Kombination	101
4.3.2 Auftragsauswahlalgorithmus bei Initialisierung	102
4.3.3 Auftragsauswahlalgorithmus während der Simulation	112
5 Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen	121
5.1 Methode des Auftragsumtauschs	121
5.1.1 Auswahl der Shuttles mit umtauschbares Auftrags	121
5.1.2 Kriterien für den Umtausch von Aufträgen	123
5.1.3 Algorithmus von Auftragsumtausch	124
5.2 Routingmethode in Bewegung	128
5.2.1 Prinzip von Änderung der Route in Bewegung	128
5.2.2 Zweistufigen Routingalgorithmus	135
5.2.3 Änderung der Route in Bewegung für einen Shuttle	146
5.2.4 Änderung der Route in Bewegung für mehren Shuttle	157
6 Auswertung der Algorithmen für globale Optimierung	169
6.1 Auswertungsmodell, -kriterien und –verfahren	170
6.1.1 Einflussgrößen der Leistung von Algorithmen und Systemen	170
6.1.2 Auswertungskriterien zum Systemstabilität und -leistung	172
6.1.3 Versuchsplan	179
6.1.4 Hilfssoftware zur Auswertung	182
6.2 Auswertung der Optimierung bei der Zuweisung des Auftrags	187
6.2.1 Auswertung verschiedener Kombinationen von drei Auswahlkriterien für Aufträge auf langfristige Systemstabilität	187
6.2.2 Auswertung verschiedener Kombinationen von drei Auswahlkriterien für Aufträge auf Systemleistung	198
6.2.3 Auswirkung der Anzahl der Shuttles auf der Ausgangs- menge bei verschiedene Optimierungsstrategie	205
6.3 Auswertung der Optimierung des Gesamtsystems durch den Umtausch von Aufträgen	210

6.3.1 Auswertung des Einflusses der Anzahl an Shuttles auf der Stabilität des Gesamtsystems	211
6.3.2 Auswertung des Einflusses der Anzahl an Shuttles auf den Durchsatz des Gesamtsystems	211
7 Zusammenfassung und Ausblick	215
7.1 Zusammenfassung	215
7.2 Ausblick	216
7.2.1 Die Kombination verschiedener Optimierungsmethoden zur Verbesserung der Gesamtleistung des Systems	216
7.2.2 Einsatz der dynamischen MAPF-Algorithmen in einem zeitkontinuierlichen System durch den zweistufigen Routingalgorithmus	216
7.2.3 Kostenanalyse des Systems mit verschiedene globale Optimierungsalgorithmen	216
Literaturverzeichnis	217
Abbildungsverzeichnis	221
Tabellenverzeichnis	229
Anhang A Experimentelle Ergebnisse für individuale Optimierung	A1
Anhang B Experimentelle Ergebnisse für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles	B1
Anhang C Experimentelle Ergebnisse für Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen	C1
Anhang D Handbuch von MatLab GUI	D1

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
BCP	Biased Cost Pathfinding
CA*	Cooperative A*
CARP	Context-Aware Route Planning
CBS	Conflict-Based Search
CO/EO-WHCA*	Conflict-Oriented and Event-Oriented Windowed Hierarchical Cooperative A*
CO-WHCA*	Conflict-Oriented Windowed Hierarchical Cooperative A*
FAR	Flow Annotation Replanning
FML	Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
GUI	Graphical User Interface
HA*	Hierarchical A*-Algorithmus
HCA*	Hierarchical Cooperative A*
ID	Independence Detection
ID/OD	Independence Detection / Operator Decomposition
LRA*	Local Repair A*
MAPF	Multi-Agent Path Finding Problem
OLPS	One-Level-Pallet-Shuttles
PALSA	Paletten Aufnehmen Lagern Sequenzieren Abgeben
RMFS	Robotic Mobile Fulfillment Systems
RRA*	Reverse Resumable A*
TUM	Technische Universität München
WHCA*	Windowed Hierarchical Cooperative A*

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Logistik ist ein sehr wichtiger Bestandteil des heutigen Geschäfts. Der Erfolg des heutigen Wettbewerbs zwischen Unternehmen hängt weitgehend von der Flexibilität und Effektivität des in der Fabrik verwendeten Logistiksystems ab. Ein nicht optimiertes Logistiksystem stellt enorme Investitionskosten dar und kann dem Unternehmen große Verluste verursachen, wenn es auf schnelle Schwankungen oder Spitzen reagiert. Beim Entwurf eines Logistiksystems sind die Kosten, Durchsatz und Raumnutzung zu beachten [TUM-2020].

In dieser Arbeit wird hauptsächlich die Optimierung des One-Level-Pallet-Shuttles(OLPS)-Systems untersucht. One-Level-Pallet-Shuttles bezeichnet ein autonomes Fahrzeug, das sich in x- und y-Richtung einer Ebene bewegen kann. Durch die Optimierung des OLPS-Systems kann die höchste Transporteffizienz auf begrenzten Raum und bei begrenzten Kosten erzielt werden [TUM-2020]. Die OLPS-System ist wie folgende dargestellt:

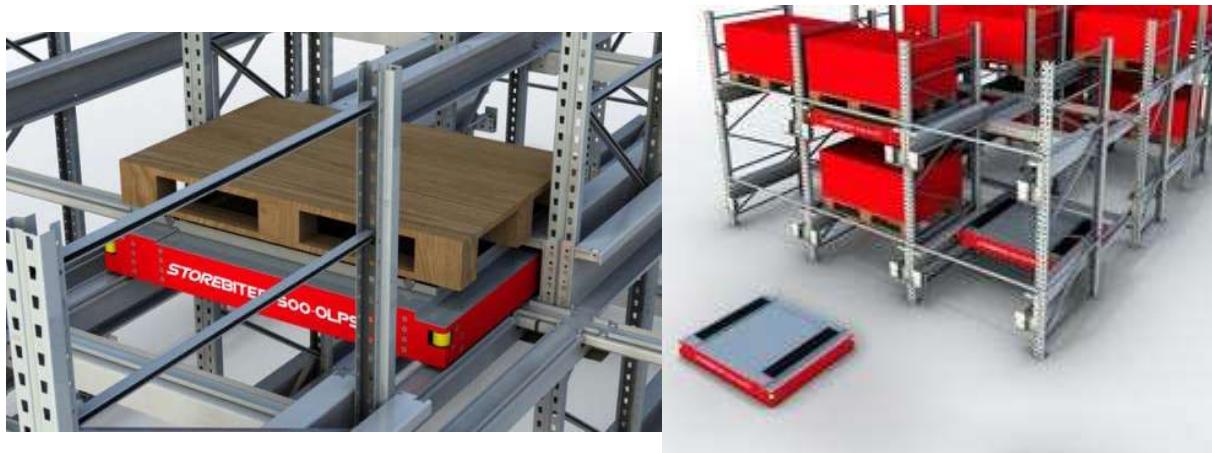


Abbildung 1-1: Das OLPS-Systeme [GEB-2020]

Für das in dieser Arbeit zu untersuchende OLPS-System gibt es derzeit noch keine zufriedenstellende Lösung, mit der die drei Parameter Kosten, Durchsatz und Raumnutzung gleichzeitig optimiert werden können. Um das OLPS-System intuitiver optimieren zu können, wird in dieser Arbeit eine Simulationssoftware, Tecnomatix Plant Simulation, verwendet. Damit können verschiedene Optimierungsstrategien durch Simulation verglichen.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Die Optimierung des OLPS-Systems ist ein MAPF-Problem (Multi-Agent Path Finding Problem). In allgemeinem MAPF-Problem werden ein Netzwerk und eine Reihe von Agenten mit unterschiedlichen Quell- und Zielpositionen angegeben. Die Aufgabe besteht darin, für jeden Agenten eine Route von seinem ursprünglichen Standort zu seinem Zielort zu planen, ohne Kollision mit anderen Agenten zu verursachen.

Um einen effizienten Materialfluss in einem automatisierten Lager und eine kontinuierliche Verteilung an/von Stationen für Kommission auf effektive Weise zu gewährleisten, müssen Entscheidungen darüber getroffen werden, welche Palette an welche bestimmte Stationen von welchem Shuttle und durch welchem Route und in welcher Zeit muss basierend auf dem aktuellen Zustand des Lagers gemacht werden. Diese Aufgabe beinhaltet zwei Teilprobleme:

- (1) Auftragszuweisung: Wie ein Auftrag aus der Auftragsbibliothek für das Shuttle ausgewählt wird
- (2) Routing: Wie eine kollisionsfreie Route für bestimmte Shuttle unter Berücksichtigung anderer Shuttles geplant wird

Die meisten Agenten (mit Ausnahme der Initialisierung) erhalten zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedliche Aufträge. Nach Erhalt des Auftrags wird für Shuttle eine Route geplant. Daher sind die Aufgaben dieser Arbeit:

- (1) Durch die Optimierung des Auftragssystems einen geeigneteren Auftrag für Shuttle auswählen.
- (2) Durch Optimierung des Routingsystems eine optimale Route mit weinigem Zeitaufwand für das Shuttle planen

Durch die oben beschriebene Optimierungsmethode kann der Durchsatz des Systems erhöhen, und die anfänglichen Investitionskosten und Betriebskosten des Systems reduzieren.

1.3 Optimierungs- und Simulationsmethoden

1.3.1 Routingmethode

Im Allgemeinen werden Routing-Methoden in zwei Gruppen unterteilt: zentralisiert und entkoppelt.

(1) Zentralisierte Routingmethoden

Durch die Zentralisierte Routing-Methoden lassen sich die Informationen aller Shuttles an die Zentralprozessor senden. Mithilfe der leistungsstarken Rechenleistung der Zentralprozessor können die optimale Strategie in kurzer Zeit für alle Shuttles entsprechend ihren unterschiedlichen Aufträge zu ermitteln. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, die globale Optimalität der gesuchten Route zu garantieren. Jedoch der Nachteil ist, dass eine sehr hohe Rechenleistung des Zentralprozessors erforderlich ist, um den globalen optimalen Routen in kurzer Zeit zu berechnen.

(2) Entkoppelte Routing-Methoden

Der Vorteil der entkoppelten Routing-Methoden besteht darin, dass komplexe Berechnung in verschiedene Subsysteme aufgeteilt werden können, wodurch die Rechenkomplexität jedes Subsystems verringert wird. Damit werden die Anforderungen an den Prozessor verringert und die Kosten gesenkt. Der allgemeine entkoppelten Routing-Methode ist jedoch aufgrund seines unabhängigen Betriebs oft schwierig, das globale Optimum zu erreichen. Daher besteht das Ziel des entkoppelten Routing-Methode im Allgemeinen darin, unter Berücksichtigung der Fähigkeiten des Prozessors eine relativ global optimale Lösung zu finden.

In diesem Modell werden die zentralisierte und entkoppelte Methoden kombiniert. Die Aufgaben des Routings werden jedem Shuttle zugewiesen, und jedes Shuttle plant die Route unabhängig nach dem Zielort des erhaltenen Auftrags. Um sich dem globalen Optimum anzunähern, ist jedoch eine geringe Datenkommunikation erforderlich, so dass weiterhin ein Zentralprozessor erforderlich ist.

1.3.2 Methoden für Auswahl der Aufträge

Im Allgemeinen gibt es zwei Methoden für die Auftragszuweisung im System: die Auftragszuweisung anhand der Sequenz der Aufträge und die Auftragsauswahl aus der Auftragsbibliothek.

(1) Auftragszuweisung anhand der Sequenz der Aufträge

Der beim Shuttle eingegangene Auftrag bezieht sich nur auf die derzeitige Sequenz der Aufträge, d.h. das Shuttle, das den Auftrag zuerst benötigt, muss den ersten Auftrag erhalten. Diese Auftragsauswahlmethode wird im Allgemeinen in kleinen Fabriken verwendet, in denen das Auftragsabwicklungsvolume nicht anspruchsvoll ist. Aufgrund ihrer Einzigartigkeit muss diese Methode nicht optimiert werden.

(2) Auftragsauswahl aus der Auftragsbibliothek

Bei einem Logistiksystem mit einem hohen Auftragsabwicklungs volumen pro Zeiteinheit wird eine große Anzahl von Aufträgen in kurzer Zeit in das System eingegeben. Die Shuttles kann nicht so viele Aufträge gleichzeitig bearbeiten, daher werden diese Aufträge in der Auftragsbibliothek gespeichert. Wenn das Shuttle jedes Mal ein neuer Auftrag benötigt, wird es eine neue Auftrag aus der Auftragsbibliothek ausgewählt.

Wie ein geeigneter Auftrag für Shuttle ausgewählt wird, damit die Bearbeitungszeit des Auftrags minimiert wird, ist ein Aspekt zur Optimierung.

1.3.3 Tecnomatix Plant Simulation

Tecnomatix Plant Simulation ist eine von Siemens PLM Software entwickelte Software zur Modellierung, Simulation, Analyse, Visualisierung und Optimierung von Produktionsystemen und Logistiksystemen.

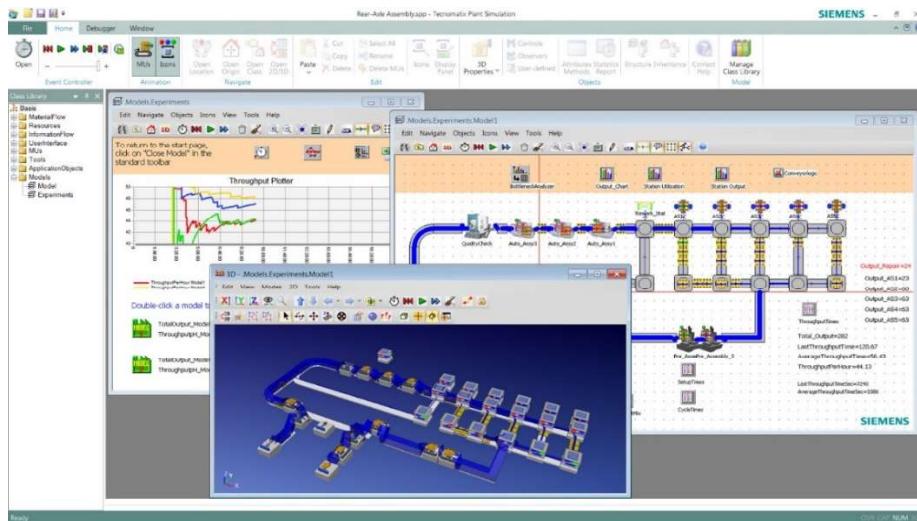


Abbildung 1-2: Tecnomatix Plant Simulation [Sie-2020]

Tecnomatix Plant Simulation verwendet objektorientierte Technologie und benutzerdefiniert Bibliotheken, um hierarchische Simulationsmodelle mit guter Struktur zu erstellen. Durch den Software können die Objektparameter bearbeitet werden und alle verfügbaren Analysetools verwenden [Sie-2020].

In dieser Arbeit wird Tecnomatix Plant Simulation verwendet, um mögliche Optimierungsmethoden zu simulieren und die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden zu vergleichen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Das erste Kapitel dieser Arbeit stellt hauptsächlich den Forschungshintergrund vor und erläutert die Forschungsziele. Darüber hinaus werden die Routingmethoden und Auftragszuweisungsmethoden kurz beschrieben und die wichtigste experimentelle Plattform Tecnomatix Plant Simulation vorgestellt. Schließlich ist der Aufbau der Arbeit zum strukturierten Verständnis.

Im zweiten Kapitel wird hauptsächlich der Stand der Technik von MAPF vorgestellt. In diesem Abschnitt wird die Modellierung von MAPF basierend auf der Zeitfenstertheorie vorgestellt und die Auswirkungen der Sequenzierung der Aufträge sowie der Beschleunigung und Verzögerung des Shuttles auf die Modellierung und die entsprechenden Lösungen analysiert. Als nächstes werden mehrere heuristische Algorithmen zur Lösung des MAPF-Problems für einen Shuttle vorgestellt, die das Routing für ein einzelnes Shuttle bequemer und schneller durchführen und die Grundlage für die nachfolgenden kooperativen Algorithmen bilden. Schließlich werden basierend auf dem heuristischen Algorithmus für einen Shuttle verschiedene Methoden von Kollisions- und Deadlocks-freien MAPF-Algorithmen für globale Optimierung angegeben, um eine theoretische Grundlage für die Entwicklung des folgenden globalen Optimierungsalgoritmus bereitzustellen.

Im dritten Kapitel werden die Struktur, die Funktion und die zugehörige Programmiermethoden des ursprünglichen Modells vorgestellt. Das ursprüngliche Modell ist ein zeitkontinuierliches System, das auf dem CA*-Routingalgorithmus basiert. In diesem Abschnitt werden das Initialisierungsmodul, das Layout-modul, das Auftragsmodul, das Routingmodul und das Bewegungsmodul des Originalmodells vorgestellt. Hierbei werden hauptsächlich die Methoden, Tabellen und Parametereinstellungen jedes Objekts beschrieben, die sich auf die Entwicklung des globalen Optimierungsalgoritmus beziehen.

In den vierten und fünften Kapiteln werden zwei globale Optimierungsalgorithmen vorgestellt. In Kapitel 4 wird ein globaler Optimierungsalgorithmus bei der Zuweisung des Auftrags vorgeschlagen. Entsprechend den Attributen der Auftrag werden drei Kriterien (Abstand, Sequenz, Zeit) für die Auswahl der Bestellung und verschiedene Optionen für jedes Kriterium angegeben. Darüber hinaus werden zwei Methoden zur Auftragsauswahl beschrieben, nämlich individuale Optimierung und Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles. Nach unterschiedlichen Auftragsauswahlkriterien und unterschiedlichen Auftragsauswahlmethoden werden spezifische Implementierungsmethoden vorgestellt.

Im fünften Kapitel wird der Optimierungsalgorithmus durch den Umtausch der Aufträge vorgestellt. Zunächst werden die Arten des Shuttles, deren Aufträge umgetauscht werden können, und die Kriterien für den Auftragsumtausch bestimmt. Damit die Route für Shuttle nach dem Auftragsumtausch zu einem neuen Zielknoten neu geplant werden kann, wird als nächstes ein zweistufiger Routingalgorithmus vorgeschlagen. Mit dem zweistufigen Routingalgorithmus kann die Route in Bewegung geplant werden. In diesem Abschnitt wird die spezifische Implementierungsmethode für den zweistufigen Routingalgorithmus zum Ändern der Route für ein einzelnes Shuttle beschrieben. Für mehrere Shuttles, die gleichzeitig die Routen wechselt werden müssen, werden in diesem Abschnitt mögliche Probleme und einige Lösungen beschrieben.

Im sechsten Kapitel werden die zwei neu entwickelten globalen Optimierungsalgorithmen bewertet. In diesem Abschnitt werden die langfristige Stabilität des Optimierungsalgorithmus und die Auswirkungen des Optimierungsalgorithmus auf die Systemleistung analysiert. Unter jedem Algorithmus wird die besten Kombination der Auswahlkriterien für den Optimierungsalgorithmus bei Zuweisung des Auftrags gefunden. Zusätzlich wird der Einfluss der Anzahl der Shuttles im System auf der Systemleistung und die durchschnittliche Effizienz des Shuttles unter verschiedenen Algorithmen analysiert.

Schließlich fasst das siebte Kapitel die Schlussfolgerungen der vollständigen Arbeit zusammen und schlägt die möglichen zukünftigen Forschungsrichtungen vor.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Hauptmodellierungsmethode sowie die Routingalgorithmen zur lokale und globale Optimierung für MAPF-Problem (Multi-Agent-Path-Finding-Problem) vorgestellt.

In Abschnitt 2.1 wird die Definition und die Modellierungsmethode des MAPF-Problems vorgestellt. In diesem Abschnitt wird hauptsächlich die auf dem Zeitfenster basierende Modellierungsmethode vorgestellt, durch die das Zeitfenster, das reservierte Zeitfenster und die Route definiert werden. Als nächstes werden relevante Kenntnisse des Routings in Rahmen der Zeitfenstermethode und der Einfluss von Beschleunigung und Verzögerung des Shuttles auf den Routingalgorithmen vorgestellt. Schließlich werden für Aufträge mit der Anforderung der Sequenz die üblicherweise verwendeten Behandlungsmethoden zusammengefasst.

Da das MAPF-Modell häufig einen großen Maßstab hat, ist es schwierig und aufwendig, durch die allgemeinen Programmierungsmethoden die optimale Lösung zu finden. In Abschnitt 2.2 werden einige heuristischen Algorithmen in einem auf Zeitfenster basierenden Modell vorgestellt, um eine relativ optimale Route für einen Agent in kürzerer Zeit und mit weniger Rechenaufwand zu bekommen. Diese heuristischen Algorithmen umfassen den Dijkstra-Algorithmus, den Floyd-Warshall-Algorithmus und den am häufigsten verwendeten A*-Algorithmus.

Das MAPF-Problem enthält häufig mehrere Agenten, und der obige heuristische Algorithmus kann nur unabhängig voneinander nach der optimalen Route für jeden Agenten suchen, was als lokales Optimum bezeichnet wird. Um eine global optimale Lösung von MAPF-Problem zu finden, müssen die Kollisionen zwischen den lokalen optimalen Routen der Agenten vermieden werden. In Abschnitt 2.3 werden mehrere Kollisions- und Deadlocks-freier Multi-Agent-Path-Finding-Algorithmen zur Suche globales Optimums vorgestellt. Diese Algorithmen legen den Grundstein für die Entwicklung des globalen optimalen Algorithmus.

2.1 Modellierung von Multi-Agent-Path-Finding-Problem (MAPF-Problem) durch Zeitfenstermethode

2.1.1 Die Konfigurationen des Shuttle-Systems

Shuttle-Systeme können entsprechend ihrer möglichen Bewegungsrichtungen in unterschiedlichen Kategorien unterteilt werden:

Degree of freedom	Characteristics			
Change of an aisle	not possible	possible		
Change of a tier	not possible	possible		
Configuration	aisle-captive tier-captive	aisle-to-aisle tier-captive	aisle-captive tier-to-tier	aisle-to-aisle tier-to-tier
Movement axes	x	x / y	x / z	x / y / z

Abbildung 2-1: Die Konfigurationen des Shuttle-Systems [Lie-2017]

Die x-Richtung ist die Bewegungsrichtung der Hauptachse in der Ebene des Shuttles; die y-Richtung repräsentiert die Richtung des Aufzugs, d.h. das Shuttle kann dadurch sich zwischen verschiedenen Ebenen bewegen; die z-Richtung ist die Bewegungsrichtung in der Ebene senkrecht zur x-Richtung. In dieser Arbeit wird das einstufige Walzensystem (One Level Pallet System, OLPS), das x-z-Modell in der obigen Abbildung untersucht. Die Shuttles können eine zweidimensionale Bewegung in der Ebene ausführen, berücksichtigen jedoch nicht die Bewegung des Shuttles zwischen verschiedenen Ebenen.

Unter normalen Umständen wird das Layout räumlich in mehrere Knoten aufgeteilt, um das Routing zu erleichtern. Die Länge des Knotens muss größer sein als die Länge des Shuttles, damit der Standort des Shuttles durch einen einzigen Knoten bestimmt werden kann. Wie unten gezeigt:

Tabelle 2-1: Definition und Beschreibung von Symbolen und Variablen

	$L_{Knoten} < L_{Shuttle}$	$L_{Knoten} = L_{Shuttle}$	$L_{Knoten} > L_{Shuttle}$
Bilddarstellung			
Der Standort des Shuttles	>1,unsicher	=1,sicher	=1,sicher
Die Position des Shuttles am Standort	-	sicher	unsicher
Unter der Annahme, dass die Größe jedes Knotens gleich ist, kann die maximale Anzahl von Knoten in einer einzelnen Richtung n_{max} mithilfe der folgenden Formel berechnet werden:			
$n_{max} = \left\lfloor \frac{L}{L_{Shuttle}} \right\rfloor = floor\left(\frac{L}{L_{Shuttle}}\right)$			(2-1)
$L_{Knoten,min} = \frac{L}{n_{max}}$			(2-2)

Wobei stellt L die Länge des gesamten Layouts, $L_{Shuttle}$ die Länge des Shuttles und L_{Knoten} die Länge des Knotens in dieser Richtung dar.

2.1.2 Definitionen von Symbolen und Variablen für die Implementierung der Zeitfenster-Routing-Methode

Die grundlegende Methode zur Lösung des MAPF-Problems ist die Zeitfenster-Routing-Methode. Um die Beschreibung später zu vereinfachen, werden hier einige Symbole und Variablen, die später verwendet werden, definiert. Sofern im folgenden Text nicht anders erläutert, ist die Definition von Symbolen und Variablen dieselbe wie hier.

Tabelle 2-2: Definition und Beschreibung von Symbolen und Variablen

Variablen	Beschreibung	Wertebereich
N	Anzahl der Shuttles	$N \in \mathbb{Z}^+$
Shuttle[i] = s[i]	Der i-ten Shuttle	$1 \leq i \leq N, i \in \mathbb{Z}^+$
M	Anzahl der Knoten	$M \in \mathbb{Z}^+, M = Me + Ma$
Me	Anzahl der Eingangs-Knoten	$Me < M, Me \in \mathbb{Z}^+$
Ma	Anzahl der Ausgangs-Knoten	$Ma < M, Ma \in \mathbb{Z}^+$
Knoten[j] = k[j]	Der j-ten Knoten	$1 \leq j \leq M, j \in \mathbb{Z}^+$
Auftrag[p] = a[p]	Der p-ten Auftrag	$1 \leq p, p \in \mathbb{Z}^+$

In jeden Auftrag sind Die folgenden Informationen enthalten:

Tabelle 2-3: Definition und Beschreibung von Symbolen und Variablen im Auftrag

Daten	Beschreibung	Aufrufmethode
Erstellungszeitpunkt t	Der Zeitpunkt, auf dem der Auftrag erstellt wird	$a[p].t$
Startort $Start$	Der Startort des Auftrags	$a[p].s$
Zielort $Ziel$	Der Zielort des Auftrags	$a[p].z$
Ladenzustand LZ	Der Ladenzustand von Auftrag, d.h. ob Shuttle leer oder beladen beim Ausführen des Auftrags ist	$a[p].LZ$

Zu jedem Zeitpunkt t kann das System die Informationen über das reservierte Zeitfenster im jeden Knoten erfahren und dann in einer Tabelle einspeichern. Jedes reservierte Zeitfenster enthält die Startzeit, die Endzeit und den Knoten sowie den Shuttle, von dem dieser Knoten in diesem bestimmten Zeitraum belegt wird.

Definition des Zeitfensters: Der Zeitraum von der Eintritt-Zeit t bis zur Austritt-Zeit t' wird als Zeitfenster f bezeichnet.

$$f = [t, t'] \quad (2-3)$$

Definition des reservierten Zeitfensters: Der Zeitraum vom Einfahren des Shuttle[i] in den Knoten[j] bis zum völligen Verlassen des Knoten[j] wird als das $q(k[j], a[p])$ -te reservierte Zeitfenster $f(k[j], a[p])$ in dem Knoten[j] bezeichnet.

$$f(k[j], a[p]) = [t(k[j], a[p]), t'(k[j], a[p])] \quad (2-4)$$

Zeitfenster $f(k[j], a[p])$ hat die folgenden Daten.

Tabelle 2-4: Daten im reservierten Zeitfenster

Daten	Beschreibung	Aufrufmethode
Startzeit t	Die Zeitpunkt der Eintritt des Shuttles	$f.ta$
Endzeit t'	Die Zeitpunkt der völlig Austritt des Shuttles	$f.te$
Shuttle s	Das Shuttle, das dies Zeitfenster betrete	$f.s$
Knoten k	Die räumliche Position des Zeitfensters	$f.k$

Definition der Route: Während der Bewegung vom Startort zum Zielort des Auftrag[p] bilden alle Knoten[j], die das Shuttle[i] durchläuft, und das auf dem Knoten reservierte Zeitfenster $f(k[j], a[p])$ die Route des Shuttles $\pi(a[p])$.

$$\tau(k[j], a[p]) = \{k[j], f(k[j], a[p])\} \quad (2-5)$$

$$\pi(a[p]) = (\tau(a[p].s, a[p]), \dots, \tau(k[j], a[p]), \dots, \tau(a[p].z, a[p])) \quad (2-6)$$

Definition des Segments: Das Shuttle bewegt sich von einem Knoten und stoppt am anderen Knotens. Während dieser Zeit gibt es nur eine Beschleunigungs- und eine Verzögerungsphase und keinen Stopp. Dann werden alle Knoten zwischen diese zwei Knoten und ihre entsprechenden Zeitfenster als ein Segment bezeichnet

2.1.3 Beschreibung der Routingstrategie in Rahmen der Zeitfenster-Modell

Der Zweck der Verwendung der Zeitfenster-Routing-Methode ist, Deadlock-freie Routen für Shuttles zu erhalten. In den folgenden Text wird beschrieben, wie eine Route für das Shuttle mithilfe des Zeitfenster-Routing-Methode geplant wird. Diese Methode besteht hauptsächlich aus zwei Teilen: einer geeigneten Abfahrtszeit zu finden und ein Zeitfenster zu expandieren.

Angenommen, Shuttle[i] hat die vorherige Auftrag zum Zeitpunkt t abgeschlossen und sofort einen neuen Auftrag[p] erhalten. Eine Route $\pi(a[p])$ muss für den neuen Auftrag geplant werden. Zu diesem Zeitpunkt wurden die Routen anderer Shuttles festgelegt und relevante Zeitfenster reserviert.

1. Anfangszeitfenster finden und überprüfen

Zuerst muss das freie Zeitfenster auf dem aktuellen Knoten gefunden werden. Die Startzeit dieses Zeitfensters muss die aktuelle Zeit t sein, und ihre Endzeit ist die Startzeit dieses Zeitfensters, die unter aller Zeitfenstern am frühesten ist und größer als t die aktuelle Zeit ist. Die Berechnungsverfahren kann durch die folgende Formel ausgedrückt werden:

$$t'(a[p].s, a[p]) = \min_{m \neq p} tse(a[m])$$

$$s.t. (1) fs(a[p], a[m]) = f(a[p].s, a[m]), \forall m \neq p \quad (2-7)$$

$$(2) tse(a[m]) = \begin{cases} fs(a[p], a[m]).ta, & \text{if } fs(a[p], a[m]).ta \geq t \\ \infty, & \text{if } fs(a[p], a[m]).te < t \end{cases}, \forall m \neq p$$

Das freie Zeitfenster auf dem Startort des Auftrags[p] lautet:

$$fs(a[p]) = [ts(a[p].s, a[p]), t'(a[p].s, a[p])] = [t, t'(a[p].s, a[p])] \quad (2-8)$$

Der nächste Schritt besteht darin, zu überprüfen, ob das freie Zeitfenster groß genug, damit der Shuttle unter der Berücksichtigung der Zeit für die Wechsel der Ausrichtung erfolgreich abfahren kann. Die Länge des Zeitfensters ist definiert als die Differenz zwischen der Startzeit und der Endzeit des Zeitfensters.

$$\Delta t(f) = t' - t \geq 0 \quad (2-9)$$

$$\Delta t(fs(a[p])) = t'(a[p].s, a[p]) - t \geq 0 \quad (2-10)$$

Die Länge des freien Zeitfensters muss genügend lang sein, damit das Shuttle den Startknoten vollständig verlassen kann. Daher muss die folgende Formel erfüllt sein:

$$\Delta t(fs(a[p])) \geq DF \times \Delta ts_{durch} + AF \times \Delta ts_{an} + WA \times \Delta t_{WA} \quad (2-11)$$

Wobei ist Δts_{durch} die Zeit des Shuttles von der Beschleunigung bis zum vollständigen Verlassen beim Startknoten; Δts_{an} ist die Zeit, die das Shuttle beim Startknoten belegt, wenn das Shuttle von der Startknoten startet und an den folgenden Knoten stoppt. Für ein ideales System ohne Berücksichtigung des Beschleunigung und Verzögerung, sind Δts_{durch} und Δts_{an} gleich. In dem realen Shuttlesystem können diese beiden Werte jedoch aufgrund der vorhandenen Beschleunigung und Verzögerung unterschiedlich sein. Der spezifische Berechnungsmethode wird in Abschnitt 2.1.4 ausführlich beschrieben.

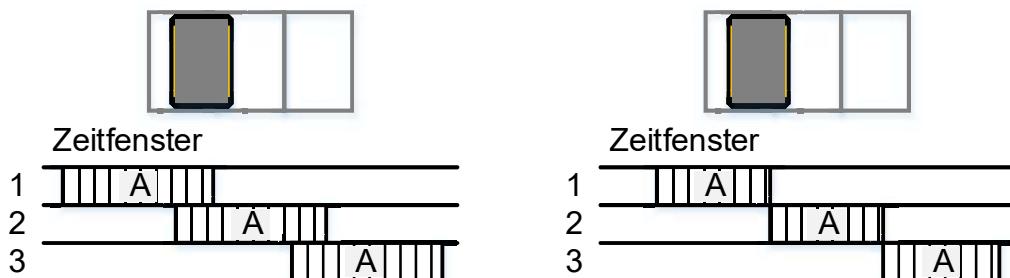


Abbildung 2-2: Die Zeitfenster unter oder ohne Berücksichtigung der Beschleunigung und Verzögerung

Δts_{durch} und Δts_{an} haben die folgende Beziehung:

$$\Delta ts_{an} > \Delta ts_{durch} \quad (2-12)$$

Δts_{an} hängt jedoch mit der nachfolgenden *Route* zusammen, sodass es derzeit schwierig ist, genaue Werte zu erhalten. Hier können einen Schätzungsansatz für Δts_{an} verfolgt werden:

$$\Delta ts_{an} = \Delta ts_{durch} + \Delta ts_{min} \quad (2-13)$$

Δts_{min} ist ein geschätzter Wert und eine Konstante. Wenn

$$l_{\text{nächste Knoten von } k[j]} \geq \frac{1}{2} \frac{v_{max}^2}{a} \quad (2-14)$$

ist, bedeutet dies, dass sich der Bewegungsstatus des nächsten Knotens nicht auf den aktuellen Knoten auswirkt., d.h. $\Delta ts_{min} = 0$, $\Delta ts_{an} = \Delta ts_{durch}$. Daher

$$t'(a[p].s, a[p]) - t = \Delta t(fs(a[p])) \geq \Delta ts_{durch} + WA \times \Delta t_{WA} \geq \Delta ts_{durch} \quad (2-15)$$

Die spezifischen Berechnungsmethoden von Δts_{durch} und Δts_{an} werden in Abschnitt 2.1.4 ausführlich vorgestellt. DF bedeutet, dass das nachfolgende Anhalten keinen Einfluss auf dem Zeitraum beim Startknoten; AF bedeutet, dass der Zeitraum beim Startknoten vom nachfolgenden Knoten beeinflusst wird.

$$DF = \begin{cases} 1, & \text{wenn für diesen Knoten Durchfahrt erforderlich} \\ 0, & \text{wenn für diesen Knoten Durchfahrt nicht erforderlich} \end{cases} \quad (2-16)$$

$$AF = \begin{cases} 1, & \text{wenn dieser Knoten die Einfluss von Anfahrt hat} \\ 0, & \text{wenn dieser Knoten keine Einfluss von Anfahrt hat} \end{cases} \quad (2-17)$$

Da der Zeitraum beim Startknoten entweder vom nachfolgenden Knoten beeinflusst wird oder nicht, haben DF und AF die folgende Beziehung:

$$DF + AF = 1 \quad (2-18)$$

Δt_{WA} ist die Zeit, die das Shuttle benötigt, um die Fahrtrichtung zu wechseln, und WA bedeutet, ob das Shuttle am Startknoten Ausrichtung wechseln muss, d.h.

$$WA = \begin{cases} 1 & , \text{wenn Ausrichtung wechseln notwendig} \\ 0 & , \text{wenn Ausrichtung wechseln nicht notwendig} \end{cases} \quad (2-19)$$

Dieses Zeitfenster am Startknoten kann nur zum erfolgreiche Routing verwendet werden, wenn alle oben genannten Bedingungen erfüllt sind; andernfalls schlägt die Routenplanung definitiv fehl. Um die Routing jedes Mal erfolgreich zu machen, ist es daher erforderlich, mindestens ein Zeitfenster mit $\Delta t \geq \Delta t_{\text{durch}}$ nach dem Abschluss des vorherigen Auftrags (nach dem Laden oder dem Entladen) zu haben.

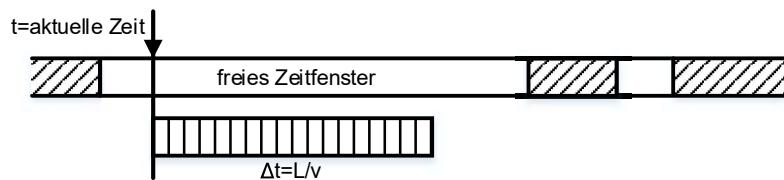


Abbildung 2-3: Das qualifizierte Zeitfenster am Startknoten

2. Zeitfenster expandieren

Damit sich das Shuttle von einem Knoten zum nächsten bewegt, müssen ein geeignetes Zeitfenster am nächsten Knoten gefunden werden. Dieser Vorgang wird als „Zeitfenster expandieren“ bezeichnet. Zunächst werden die Komponenten des Zeitfensters diskutiert. Das Zeitfenster kann hauptsächlich aus Eintritt-, Durchfahren- und Austritt-Teil bestehen.

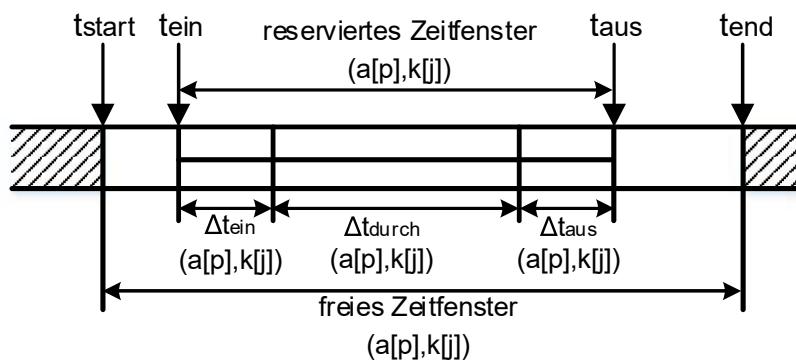


Abbildung 2-4: Aufbau eines Zeitfensters (Eintritt-, Durchfahren- und Austritt-Teil)

Wenn sich das Shuttle von einem Knoten zum nächsten bewegt, kann das Zeitfenster wie in der folgenden Abbildung gezeigt sein.

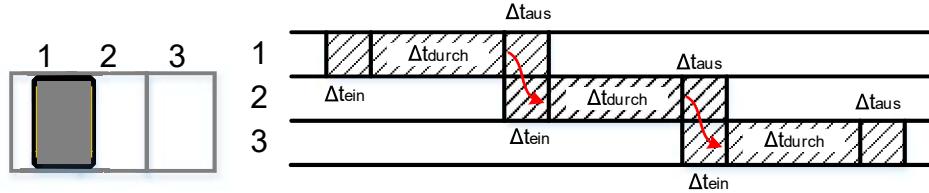


Abbildung 2-5: Zeitfenster benachbarter Knoten während der Bewegung des Shuttles

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass außer dem Startknoten und dem Zielknoten der Austritt-Teil eines Knotens gleich der Eintritt- Teil des nächsten Knotens ist. Daher kann geschlossen werden, dass, wenn das freie Zeitfenster des nächsten Knotens expandiert werden kann, dieses Zeitfenster mit dem Zeitfenster des aktuellen Knotens überlappen muss. Die Länge des überlappten Teils ist mindestens die Zeit für Austritt-Teil des aktuellen Knoten oder für Eintritt- Teil des nächsten Knoten.

$$\begin{aligned}\Delta t_{overlap}(a[p], k[j_1], k[j_2]) &= t_{aus}(a[p], k[j_1]) - t_{ein}(a[p], k[j_2]) \\ &\geq \Delta t_{ein}(a[p], k[j_1]) = \Delta t_{aus}(a[p], k[j_2])\end{aligned}\quad (2-20)$$

Es gibt auch Anforderungen an die Position des überlappten Teils. Für den Knoten $k[j_1]$ kann die Startzeit des überlappten Teils nicht früher als der Endzeitpunkt des Durchfahren-Teils des Knoten $k[j_1]$ sein. Für den Knoten $k[j_2]$ kann die Endzeit des überlappten Teils nicht später als die Endzeit des freien Zeitfensters auf Knoten $k[j_2]$ abzüglich der Zeit für den Austritt- und der Durchfahren-Teil von Knoten $k[j_2]$ sein. Dadurch kann garantiert werden, dass das Shuttle genügend Zeit hat, um den Knoten $k[j_1]$ und $k[j_2]$ durchzufahren.

$$\begin{cases} t_{ein}(a[p], k[j_2]) \geq t_{start}(k[j_1]) + \Delta t_{ein}(a[p], k[j_1]) + \Delta t_{durch,min}(a[p], k[j_1]) \\ t_{aus}(a[p], k[j_1]) \leq t_{end}(k[j_2]) - \Delta t_{aus}(a[p], k[j_2]) - \Delta t_{durch,min}(a[p], k[j_2]) \end{cases} \quad (2-21)$$

Natürlich müssen Knoten $k[j_1]$ und Knoten $k[j_2]$ erfüllen, dass sie physikalisch benachbart sind. Wenn die obigen drei Bedingungen erfüllt sind, kann der nächste Knoten expandiert werden.

3. Beanspruchte Knoten (claimed nodes)

Da die Berechnung des reservierten Zeitfensters nicht genau ist, kann das Shuttle den Knoten wahrscheinlich nicht gemäß dem reservierten Zeitfenster eintreten oder verlassen. Das Wichtigste ist die Reihenfolge der Shuttles, d.h. welche Shuttles diesen Knoten zuerst belegen.

Hier werden die beanspruchten Knoten für das Shuttle eingeführt, was bedeutet, dass das Shuttle nur dann den Knoten belegt, wenn der Knoten von diesem Shuttle beansprucht wird. Wie unten gezeigt:

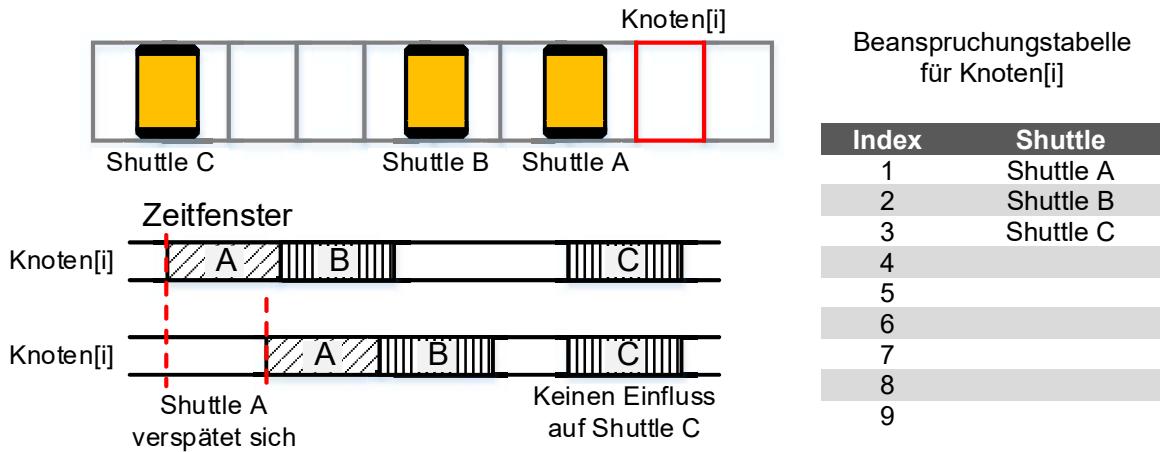


Abbildung 2-6: Erklärung des beanspruchten Knotens

Wenn Shuttle 1 zu spät ist, muss Shuttle 2, selbst wenn es bereit ist, den Knoten entsprechend ihrem Zeitfenster zu betreten, auf Shuttle 1 warten, da Shuttle 1 den Knoten früher als Shuttle 2 beansprucht hat. Andere nicht betroffene Shuttles wie Shuttle 3 bewegen sich immer noch entsprechend ihrem Zeitfenster.

2.1.4 Integration von Beschleunigung und Verzögerung in der Zeitfenster-Routing-Methode

Gegenwärtig ignoriert das allgemeine MAPF-Problem die Beschleunigung und die Verzögerung des Shuttles während der Bewegung und nehmen an, dass das Shuttle in sehr kurzer Zeit die voreingestellte Geschwindigkeit erreichen kann. Dies Annahme kann für kleine Objekte akzeptiert sein. Jedoch werden bei der Fabriklogistik häufig schwere Waren transportiert, und es ist unrealistisch, das Shuttle plötzlich zu beschleunigen oder zu verzögern. Daher führt das Modell in dieser Arbeit das Konzept der Beschleunigung und der Verzögerung ein und untersucht, wie die Route unter der Bedingung einer konstanten Beschleunigung oder Verzögerung geplant werden kann [Lie-2018a].

In diesem Abschnitt wird die Zeit basiert auf den allgemeinen Routingalgorithmen berechnet, die das Shuttle benötigt, um sich vom Ruhezustand am Startknoten zum Stop am anderen Knoten zu bewegen. Außerdem müssen die erforderlichen Zeitfenster für das Shuttle an jedem Knoten berechnet werden. In dieser Arbeit wird ausgängen, dass der Wert von der Beschleunigung und Verzögerung des Shuttles gleich a ist; dass die maximale Geschwindigkeit des Shuttles in alle Richtungen gleich

v_{max} ist. Hier wird angenommen, dass die Beschleunigung oder die Verzögerung des Shuttles abrupt sein kann.

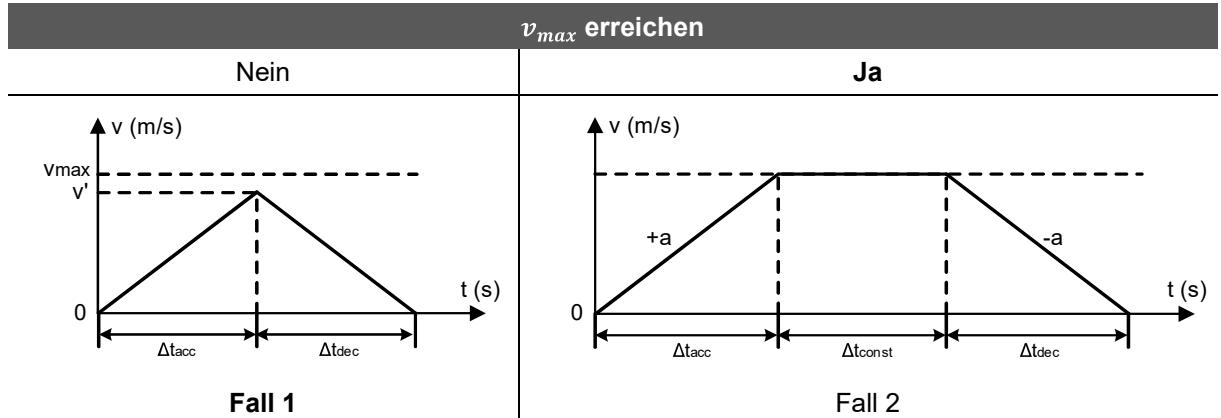
1. Der allgemeine Bewegungszustand des Shuttles

Wenn das Shuttle sich $N \in \mathbb{Z}^+$ Knoten entlang der aktuellen Richtung bewegen soll, dann beträgt die Gesamtlänge für die Bewegung des Shuttles

$$s = N \cdot l_{Knoten} \quad (2-22)$$

Je nachdem, ob das Shuttle während dieser Segment die Höchstgeschwindigkeit v_{max} erreichen kann, kann die Bewegungszustand des Shuttles in die folgenden zwei Kategorien unterteilt werden:

Tabelle 2-5: Vier Darstellungsoptionen des Abstands



Fall 1: In dieser Segment kann die Höchstgeschwindigkeit v_{max} erreicht werden

Wenn die Beschleunigung und die Verzögerung des Shuttles groß genug ist oder die Länge des Segments genügend lang ist, kann das Shuttle die höchste Geschwindigkeit v_{max} erreichen. Die Bewegungszeit Δt in Fall 1 wird nach folgender Formel berechnet:

$$\Delta t = \Delta t_{acc} + \Delta t_{const} + \Delta t_{dec} = \frac{s}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a} \quad (2-23)$$

Fall 2: In dieser Segment kann die Höchstgeschwindigkeit v_{max} nicht erreicht werden

Wenn die Beschleunigung und die Verzögerung des Shuttles nicht groß genug ist oder die Länge des Segments nicht genügend lang ist, kann das Shuttle die höchste Geschwindigkeit v_{max} leider nicht erreichen. Die Bewegungszeit Δt und die maximale Geschwindigkeit $v' < v_{max}$ in Fall 2 wird nach folgender Formel berechnet:

$$v' = \sqrt{as} \quad (2-24)$$

$$\Delta t = \Delta t_{acc} + \Delta t_{dec} = 2\sqrt{\frac{s}{a}} \quad (2-25)$$

Die obigen zwei Fälle werden gemäß der Beziehung zwischen N , v_{max} und a bestimmt. Der Grenzwert N_{grenz} kann gemäß der folgenden Formel bestimmt werden

$$s_{grenz} = N_{grenz} \cdot l_{Knoten} = \frac{v_{max}^2}{a} \quad (2-26)$$

Wenn $N > N_{grenz}$ ist, kann es gemäß dem ersten Fall berechnet werden; wenn $N < N_{grenz}$ ist, kann es gemäß dem zweiten Fall berechnet werden

2. Der Bewegungszustand des Shuttles am Startknoten

Die Entfernung des Shuttles am Startknoten beträgt:

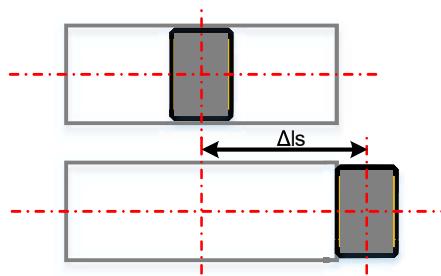
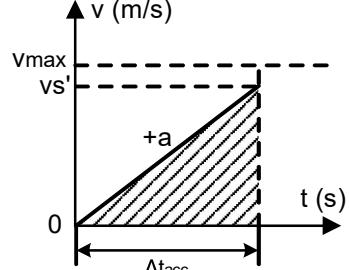
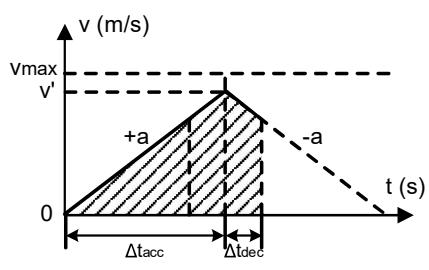
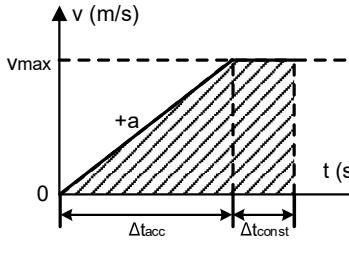
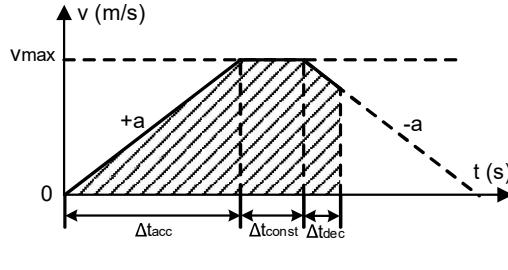


Abbildung 2-7: Die Entfernung des Shuttles am Startknoten

$$\Delta ls = \frac{1}{2}(l_{Knoten} + l_{Shuttle}) \quad (2-27)$$

Je nachdem, ob das Shuttle während der Bewegung am Startknotens die maximale Geschwindigkeit v_{max} erreichen kann und ob es die Verzögerungsphase erreicht, kann die Bewegungszustand des Shuttles am Startknoten in die folgenden vier Kategorien unterteilt werden:

Tabelle 2-6: Bewegungszustände am Startknoten

Fälle	v_{max} erreichen	
	Nein	Ja
Verzöge- rungsphase erreichen	Nein  <p>Fall 1</p>	 <p>Fall 2</p>
	Ja  <p>Fall 3</p>	 <p>Fall 4</p>

Fall 1: Nur der Beschleunigungsphase am Startknoten und die maximale Geschwindigkeit $vs' < v_{max}$

Die geringe Beschleunigung des Shuttles kann dazu führen, dass das Shuttle nicht auf die höchste Geschwindigkeit v_{max} beschleunigt, wenn es den Startknoten vollständig verlässt. Die Bewegungszeit Δts am Startknoten und die maximale Geschwindigkeit vs' in Fall 1 wird nach folgender Formel berechnet:

$$vs' = \sqrt{2a \cdot \Delta ls} = \sqrt{a(l_{Knoten} + l_{Shuttle})} \quad (2-28)$$

$$\Delta ts = \frac{vs'}{a} = \sqrt{2 \frac{\Delta ls}{a}} = \sqrt{\frac{l_{Knoten} + l_{Shuttle}}{a}} \quad (2-29)$$

Fall 2: Der Beschleunigungs- und Verzögerungsphase am Startknoten und die maximale Geschwindigkeit $v' < v_{max}$

Wenn die Beschleunigung des Shuttles nicht groß genug ist und die Entfernung dieses Segments nicht genügend lang ist. Die Segment schließt mit Ausnahme des Startkno-

tens nur einen Knoten ein, d.h. $N = 1$. In diesem Fall muss das Shuttle sich verlangsamen, bevor der Startknoten vollständig verlassen wird, damit das Shuttle rechtzeitig am nächsten Knoten anhalten kann. Die Bewegungszeit Δts am Startknoten in Fall 2 wird nach folgender Formel berechnet:

$$s = N \cdot l_{Knoten} = l_{Knoten} \quad (2-30)$$

$$\Delta ts = \Delta t_{acc} + \Delta t_{dec} = 2\sqrt{\frac{s}{a}} - \sqrt{2\frac{s - \Delta ls}{a}} = 2\sqrt{\frac{l_{Knoten}}{a}} - \sqrt{\frac{l_{Knoten} - l_{Shuttle}}{a}} \quad (2-31)$$

Fall 3: Der Beschleunigungsphase und wahrscheinlich der konstanten Bewegungsphase am Startknoten und die maximale Geschwindigkeit v_{max}

Wenn die Beschleunigung des Shuttles groß genug ist und die Entfernung dieses Segments genügend lang ist. Das Shuttle kann am Startknoten die Höchstgeschwindigkeit v_{max} erreichen und diese Höchstgeschwindigkeit für einen bestimmten Zeitraum beibehalten. Die Bewegungszeit Δts am Startknoten in Fall 3 wird nach folgender Formel berechnet:

$$\Delta ts = \Delta t_{acc} + \Delta t_{const} = \frac{s}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{2a} \quad (2-32)$$

Fall 4: Der Beschleunigungs- und Verzögerungsphase und wahrscheinlich der konstanten Bewegungsphase am Startknoten und die maximale Geschwindigkeit v_{max}

Wenn die Beschleunigung des Shuttles groß genug ist und die Entfernung dieses Segments nicht genügend lang ist. Die Segment schließt mit Ausnahme des Startknotens nur einen Knoten ein, d.h. $N = 1$. In diesem Fall muss das Shuttle sich verlangsamen, bevor der Startknoten vollständig verlassen wird, damit das Shuttle rechtzeitig am nächsten Knoten anhalten kann. Die Bewegungszeit Δts am Startknoten in Fall 4 wird nach folgender Formel berechnet:

$$s = N \cdot l_{Knoten} = l_{Knoten} \quad (2-33)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta ts = \Delta t_{acc} + \Delta t_{const} + \Delta t_{dec} &= \frac{s}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a} - \sqrt{2 \frac{s - \Delta ls}{a}} \\
 &= \frac{l_{Knoten}}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a} - \sqrt{\frac{l_{Knoten} - l_{Shuttle}}{a}}
 \end{aligned} \tag{2-34}$$

3. Der Bewegungszustand des Shuttles am Endknoten

Die Entfernung des Shuttles am Endknoten beträgt:

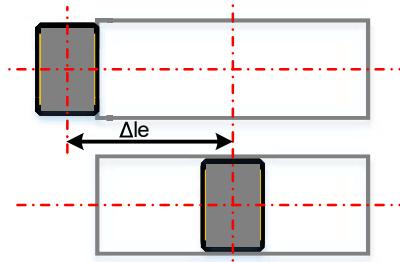
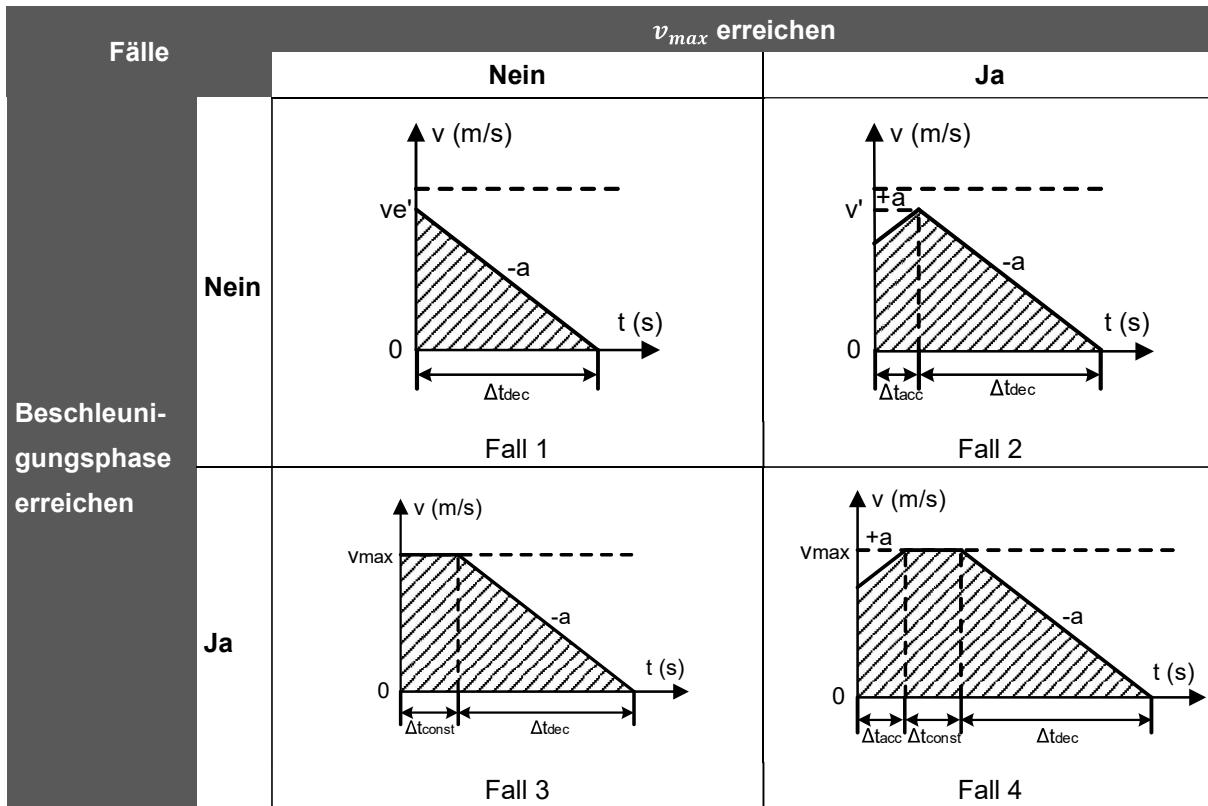


Abbildung 2-8: Die Entfernung des Shuttles am Endknoten

$$\Delta le = \frac{1}{2}(l_{Knoten} + l_{Shuttle}) \tag{2-35}$$

Je nachdem, ob das Shuttle während der Bewegung am Startknoten die maximale Geschwindigkeit v_{max} erreichen kann und ob es die Beschleunigungsphase gibt, kann die Bewegungszustand des Shuttles am Endknoten in die folgenden vier Kategorien unterteilt werden:

Tabelle 2-7: Bewegungszustände am Endknoten



Fall 1: Nur der Verzögerungsphase am Endknoten und die maximale Geschwindigkeit $ve' < v_{max}$

Die geringe Verzögerung des Shuttles kann dazu führen, dass das Shuttle sich nicht von der höchster Geschwindigkeit v_{max} verzögert, wenn es den Endknoten eintreten. Die Bewegungszeit Δte am Endknoten und die maximale Geschwindigkeit ve' in Fall 1 wird nach folgender Formel berechnet:

$$ve' = \sqrt{2a \cdot \Delta le} = \sqrt{a(l_{Knoten} + l_{Shuttle})} \quad (2-36)$$

$$\Delta te = \frac{ve'}{a} = \sqrt{2 \frac{\Delta ls}{a}} = \sqrt{\frac{l_{Knoten} + l_{Shuttle}}{a}} \quad (2-37)$$

Fall 2: Der Beschleunigungs- und Verzögerungsphase am Endknoten und die maximale Geschwindigkeit $v' < v_{max}$

Wenn die Verzögerung des Shuttles nicht groß genug ist und die Entfernung dieses Segments nicht genügend lang ist. Die Segment schließt mit Ausnahme des Startkno-

tens nur einen Knoten ein, d.h. $N = 1$. In diesem Fall muss das Shuttle sich noch beschleunigen, wenn das Shuttle den Endknoten eintreten, damit das Shuttle rechtzeitig am diesen Knoten anhalten kann. Die Bewegungszeit Δt_e am Endknoten in Fall 2 wird nach folgender Formel berechnet:

$$s = N \cdot l_{Knoten} = l_{Knoten} \quad (2-38)$$

$$\Delta t_e = \Delta t_{acc} + \Delta t_{dec} = 2\sqrt{\frac{s}{a}} - \sqrt{2\frac{s - \Delta t_e}{a}} = 2\sqrt{\frac{l_{Knoten}}{a}} - \sqrt{\frac{l_{Knoten} - l_{Shuttle}}{a}} \quad (2-39)$$

Fall 3: Der Verzögerungsphase und wahrscheinlich der konstanten Bewegungsphase am Endknoten und die maximale Geschwindigkeit v_{max}

Wenn die Beschleunigung des Shuttles groß genug ist und die Entfernung dieses Segments genügend lang ist. Das Shuttle kann am Endknoten die Höchstgeschwindigkeit v_{max} erreichen und diese Höchstgeschwindigkeit für einen bestimmten Zeitraum beibehalten. Die Bewegungszeit Δt_e am Endknoten in Fall 3 wird nach folgender Formel berechnet:

$$\Delta t_e = \Delta t_{const} + \Delta t_{dec} = \frac{s}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{2a} \quad (2-40)$$

Fall 4: Der Beschleunigungs- und Verzögerungsphase und wahrscheinlich der konstanten Bewegungsphase am Endknoten und die maximale Geschwindigkeit v_{max}

Wenn die Verzögerung des Shuttles groß genug ist und die Entfernung dieses Segments nicht genügend lang ist. Die Segment schließt mit Ausnahme des Endknotens nur einen Knoten ein, d.h. $N = 1$. In diesem Fall muss das Shuttle noch sich beschleunigen, wenn das Shuttle den Endknoten eintreten, damit das Shuttle rechtzeitig am diesen Knoten anhalten kann. Die Bewegungszeit Δt_e am Endknoten in Fall 4 wird nach folgender Formel berechnet:

$$s = N \cdot l_{Knoten} = l_{Knoten} \quad (2-41)$$

$$\begin{aligned}\Delta te &= \Delta t_{acc} + \Delta t_{const} + \Delta t_{dec} = \frac{s}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a} - \sqrt{2 \frac{s - \Delta le}{a}} \\ &= \frac{l_{Knoten}}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a} - \sqrt{\frac{l_{Knoten} - l_{Shuttle}}{a}}\end{aligned}\quad (2-42)$$

4. Bewegungszustand des Shuttles am Zwischenknoten

Die Entfernung des Shuttles am Zwischenknoten beträgt:

$$\Delta ld = l_{Knoten} + l_{Shuttle} \quad (2-43)$$

Der Bewegungszustand des Zwischenknotens hängt mit der Geschwindigkeit bei dem Eintritt und dem Austritt zusammen. Wenn sich das Shuttle am Zwischenknoten bewegt und die maximale Geschwindigkeit v_{max} erreichen kann, ist der Bewegungszustand wie folgt:

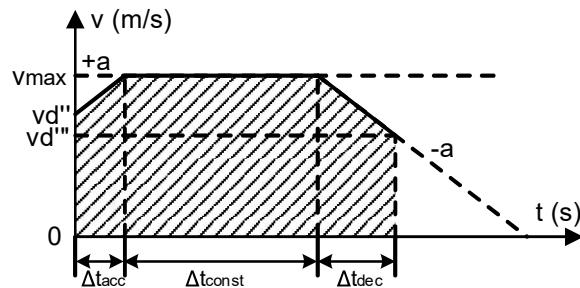


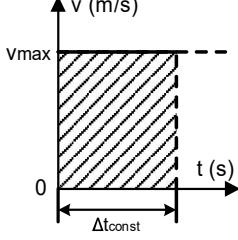
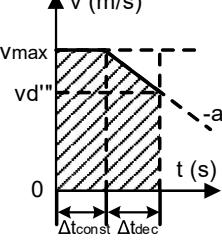
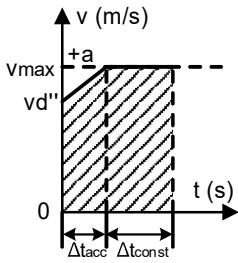
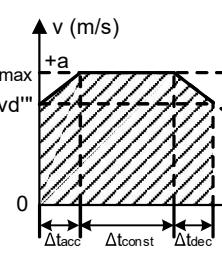
Abbildung 2-9: Allgemeiner Bewegungszustand des Zwischenknotens mit der maximalen Geschwindigkeit $v = v_{max}$

Die Zeit, um sich auf solchen Zwischenknoten zu bewegen, kann unter folgenden Formel berechnet werden:

$$\begin{aligned}\Delta td(v_d'', v_d''') &= \Delta t_{acc} + \Delta t_{const} + \Delta t_{dec} \\ &= \frac{v_{max} - (v_d'' + v_d''')}{a} + \frac{\Delta ld}{v_{max}} + \frac{v_d''^2 + v_d'''^2}{2av_{max}}\end{aligned}\quad (2-44)$$

Je nachdem, ob die Beschleunigungs- oder Verzögerungsphase während der Bewegung am Zwischenknoten auftritt, kann der Bewegungszustand in die folgenden vier Fälle unterteilt werden:

Tabelle 2-8: Bewegungszustände am Zwischenknoten mit der maximalen Geschwindigkeit $v = v_{max}$

Fälle	Verzögerungsphase erreichen	
	Nein	Ja
Nein	 Fall 1	 Fall 2
Beschleunigungsphase erreichen	 Fall 3	 Fall 4

Fall 1: Nur der konstanten Bewegungsphase am Zwischenknoten und die maximale Geschwindigkeit v_{max}

Dies Fall geschieht normalerweise in der Mitte des längeren Segments. Das Beschleunigen und Verzögerung des Shuttles kann mit ausreichend Zeit und Raum durchgeführt werden. Der Zwischenknoten muss sich nur mit der schnellsten Geschwindigkeit bewegen. Die Bewegungszeit Δtd am Zwischenknoten in Fall 1 wird nach folgender Formel berechnet:

$$v_d'' = v_{max}, v_d''' = v_{max} \quad (2-45)$$

$$\Delta td = \Delta t_{const} = \frac{\Delta ld}{v_{max}} \quad (2-46)$$

Fall 2: Der konstanten Bewegungs- und Verzögerungsphase am Zwischenknoten und die maximale Geschwindigkeit v_{max}

Dies Fall tritt im Allgemeinen gegen Ende längerer Segmente auf. Die Verzögerung des Shuttles ist nicht groß genug, um in den letzten vielen Knoten anzuhalten, daher

muss das Shuttle einige im Voraus bremsen. Die Bewegungszeit Δtd am Zwischenknoten in Fall 2 wird nach folgender Formel berechnet:

$$v_d'' = v_{max}, v_d''' < v_{max} \quad (2-47)$$

$$\Delta td(v_d''') = \Delta t_{const} + \Delta t_{dec} = \frac{v_d'''^2}{2av_{max}} - \frac{v_d'''}{a} + \frac{\Delta ld}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{2a} \quad (2-48)$$

Fall 3: Der Beschleunigungs- und konstanten Bewegungsphase am Zwischenknoten und die maximale Geschwindigkeit v_{max}

Dies Fall tritt im Allgemeinen gegen Start längerer Segmente auf. Die Beschleunigung des Shuttles ist nicht groß genug, daher muss sich das Shuttle weiter in diesem Knoten beschleunigen. Die Bewegungszeit Δtd am Zwischenknoten in Fall 3 wird nach folgender Formel berechnet:

$$v_d'' < v_{max}, v_d''' = v_{max} \quad (2-49)$$

$$\Delta td(v_d'') = \Delta t_{acc} + \Delta t_{const} = \frac{v_d''^2}{2av_{max}} - \frac{v_d''}{a} + \frac{\Delta ld}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{2a} \quad (2-50)$$

Fall 4: Der Beschleunigungs-, konstanten Bewegungs- und Verzögerungsphase am Zwischenknoten und die maximale Geschwindigkeit v_{max}

Dies Fall geschieht normalerweise in der Mitte des kurzen Segments. Da die Beschleunigung und Verzögerung des Shuttles immer noch nicht groß genug ist, kann die maximale Geschwindigkeit v_{max} zwar im Segment erreicht werden, die Höchstgeschwindigkeit kann jedoch nicht zu lange beibehalten werden. Daher muss ein Teil der Bewegungszeit beim Zwischenknoten für die Beschleunigungsphase und ein Teil für die Verzögerungsphase sein, und nur ein kleiner Teil der Zeit bewegt sich mit der höchsten Geschwindigkeit.

Da dies Fall nur am mittleren Knoten geschieht, kann die folgende Formel leicht aus der Symmetrie abgeleitet werden:

$$v_d'' = v_d''' < v_{max} \quad (2-51)$$

In diesem Fall wird die Bewegungszeit Δtd am Zwischenknoten nach folgender Formel berechnet:

$$\Delta td(v_d'' = v_d''') = \Delta t_{acc} + \Delta t_{const} + \Delta t_{dec} = \frac{v_d''^2 - 2v_{max}v_d'' + a \cdot \Delta ld + v_{max}^2}{av_{max}} \quad (2-52)$$

Wenn sich das Shuttle am Zwischenknoten bewegt und die maximale Geschwindigkeit nur $v'_d < v_{max}$ oder $v' < v_{max}$ erreichen kann, kann der Bewegungszustand in die folgenden drei Fälle unterteilt werden:

Tabelle 2-9: Bewegungszustände am Zwischenknoten mit der maximalen Geschwindigkeit $v < v_{max}$

Fälle	Verzögerungsphase erreichen	
	Nein	Ja
Nein	–	<p>Velocity-time diagram for Case 5. The vertical axis is velocity v (m/s) and the horizontal axis is time t (s). A diagonal line starts at $(0, 0)$ and ends at $(\Delta t_{acc}, v_{max})$. The area under the line is shaded. The slope of the line is $+a$. The time interval is Δt_{acc}.</p>
Beschleunigungsphase erreichen	<p>Velocity-time diagram for Case 6. The vertical axis is velocity v (m/s) and the horizontal axis is time t (s). A diagonal line starts at $(0, v_{max})$ and ends at $(\Delta t_{dec}, v_{d''''})$. The area under the line is shaded. The slope of the line is $-a$. The time interval is Δt_{dec}.</p>	<p>Velocity-time diagram for Case 7. The vertical axis is velocity v (m/s) and the horizontal axis is time t (s). The diagram shows two phases: a deceleration from v_{max} to $v_{d''''}$ (slope $-a$) and an acceleration from $v_{d''''}$ to v_{max} (slope $+a$). The total time is $\Delta t_{acc} + \Delta t_{dec}$.</p>
Ja	<p>Velocity-time diagram for Case 6. The vertical axis is velocity v (m/s) and the horizontal axis is time t (s). A diagonal line starts at $(0, v_{max})$ and ends at $(\Delta t_{dec}, v_{d''''})$. The area under the line is shaded. The slope of the line is $-a$. The time interval is Δt_{dec}.</p>	<p>Velocity-time diagram for Case 7. The vertical axis is velocity v (m/s) and the horizontal axis is time t (s). The diagram shows two phases: a deceleration from v_{max} to $v_{d''''}$ (slope $-a$) and an acceleration from $v_{d''''}$ to v_{max} (slope $+a$). The total time is $\Delta t_{acc} + \Delta t_{dec}$.</p>

Fall 5: Nur der Beschleunigungsphase am Zwischenknoten und die maximale Geschwindigkeit $v'_d < v_{max}$

Dies Fall geschieht, wenn die Beschleunigung des Shuttles zu gering ist oder der Entfernung zwischen den Knoten nicht groß genug ist. Dies Fall tritt im Allgemeinen in den ersten Teil des Segments auf. Die Beschleunigungsphase kann in ein bis zwei Knoten nicht abgeschlossen, so dass an einigen Knoten in der frühen Phase Shuttle nur sich beschleunigt.

$$v_d'^2 - v_d''^2 = 2a \cdot \Delta ld \quad (2-53)$$

$$\Delta t e = \Delta t_{acc} = \frac{v_d' - v_d''}{a} = \frac{2\Delta ld}{v_d' + v_d'''} \quad (2-54)$$

Fall 6: Nur der Verzögerungsphase am Zwischenknoten und die maximale Geschwindigkeit $v_d' < v_{max}$

Dies Fall geschieht, wenn die Verzögerung des Shuttles zu klein ist oder der Entfernung zwischen den Knoten nicht groß genug ist. Wenn das Shuttle zum letzten Teil des Segments fährt, muss es mehrere Knoten im Voraus bremsen, damit das Shuttle am letzten Knoten anhält.

$$v_d'^2 - v_d'''^2 = 2a \cdot \Delta ld \quad (2-55)$$

$$\Delta t e = \Delta t_{dec} = \frac{v_d' - v_d'''}{a} = \frac{2\Delta ld}{v_d' + v_d'''} \quad (2-56)$$

Fall 7: Der Beschleunigungs- und Verzögerungsphase am Zwischenknoten und die maximale Geschwindigkeit $v_d' = v' < v_{max}$

Dies Fall geschieht, wenn die Beschleunigung und Verzögerung gering und das Segment kurz ist. Dies Fall tritt nur in der Mitte des Segments auf. Entsprechend der Symmetrie können die Beziehung zwischen v_d'' und v_d''' erhalten werden, wie unten gezeigt

$$v_d'' = v_d''' = \sqrt{a(s - \Delta ld)}, v_d' = v' = \sqrt{as} \quad (2-57)$$

In diesem Fall wird die Bewegungszeit Δtd am Zwischenknoten nach folgender Formel berechnet:

$$\Delta t e = \Delta t_{acc} + \Delta t_{dec} = \frac{2}{\sqrt{a}} (\sqrt{s} - \sqrt{s - \Delta ld}) \quad (2-58)$$

2.1.5 Einfluss der Sequenzierung auf der Zeitfenster-Routing-Methode

Im eigentlichen Logistiksystem müssen einige Waren gemäß einer bestimmten Sequenz transportiert werden, z. B. JIS-Regale. Daher ist es bei der Routing erforderlich, den Einfluss der Sequenzierung zu berücksichtigen und sicherzustellen, dass die Waren mit der niedrigeren Sequenz nicht vor den Waren mit der höheren Sequenz ankommen.

1. Lösung durch das Einsetzen des Puffer-Knoten

Um die Sequenz von Aufträge anzupassen, werden Puffer-Knoten normalerweise in der Nähe der relevanten Zielknoten gesetzt. nach Position und Form des Puffers wird das System in die folgenden zwei Typen unterteilt [Lie-2018b]:

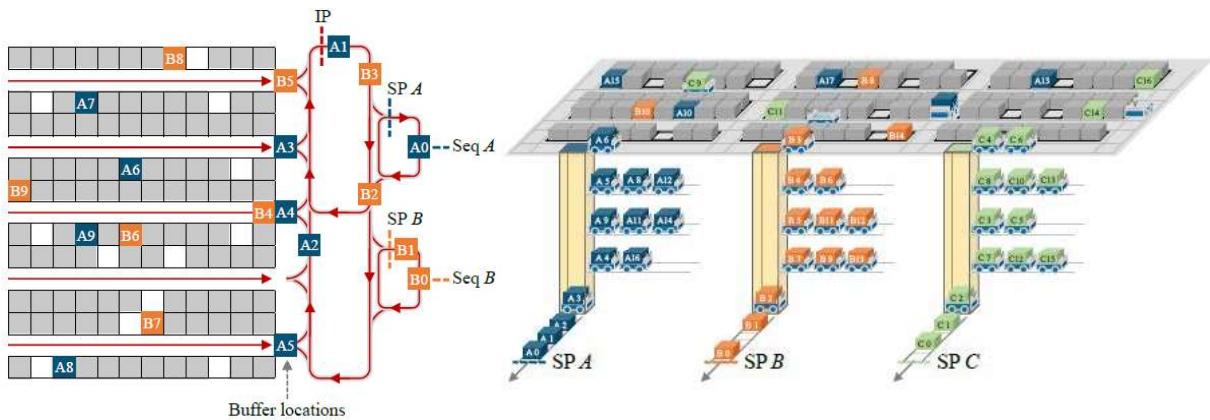


Abbildung 2-10: Zwei Typen von Pufferknoten [Lie-2018b]

Die Einstellung von Puffer-Knoten führt manchmal zu folgendem globalen Deadlock.

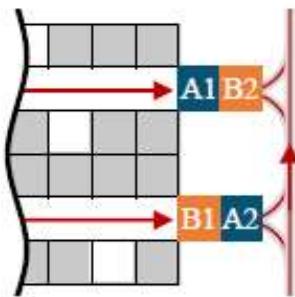


Abbildung 2-11: Deadlock für Aufträge mit zwei voneinander unabhängige Sequenz [Lie-2018b]

Es gibt im obigen Bild zwei verschiedene unabhängige Aufträge-Gruppe, nämlich A und B. A2 muss sich nach A1 bewegen, und A1 nach B2, B2 nach B1, B1 nach A2. Das führt zu einem globalen Deadlock, der vermieden werden müssen.

2. Lösung durch Routing-Algorithmus

Bei System ohne Puffer-Knoten muss die Sequenzierung vollständig durch Routing-Algorithmus realisieren.

Eine der Methoden besteht darin, die Sequenz in der Nähe des Zielknotens anzupassen. Wenn ein Shuttle, dessen Auftrag in falsche Sequenz liegt, den Zielknoten betritt, muss das Shuttle den Zielknoten vorübergehend verlassen, um Platz für das Shuttle, dessen Auftrag in richtige Sequenz liegt, freizulassen.

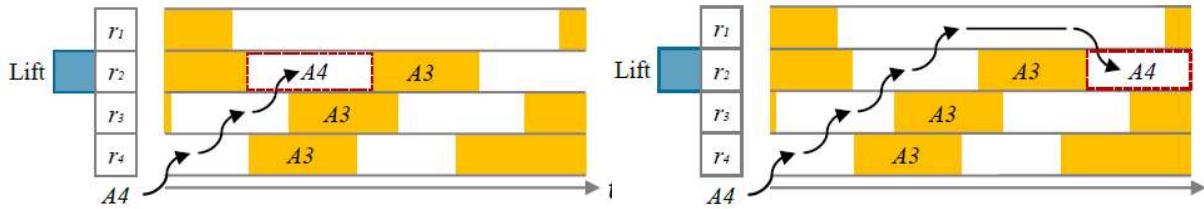


Abbildung 2-12: Das Shuttle mit dem Auftrag mit falscher Sequenz verlässt vorübergehend den Zielknoten, um auf das Shuttle mit dem Auftrag mit richtiger Sequenz zu warten [Lie-2018b]

Die Logik von Algorithmus ist wie folgt:

Algorithmus für der Sequenz-basierter Anpassung beim Zielort

- Auslöser:** Shuttle den Zielort erreicht
 - 1 Wenn Shuttle auf dem Zielknoten liegt
 - 2 Wenn der Auftrag des Shuttles richtig ist
 - 3 Beladen oder entladen
 - 4 Sonst wenn der Auftrag des Shuttles falsch ist
 - 5 Für alle Shuttles mit dem Auftrag, dessen Zielort gleich ist
 - 6 Routing unter Berücksichtigung des Sequenzzeitfenster im bestimmte Zeitraum reservieren

Abbildung 2-13: Algorithmus für der Sequenz-basierter Anpassung beim Zielort

Diese Methode ist eine lokale Anpassungsmethode, die auf Situationen angewendet werden kann, in denen sich in der Nähe des Zielknotens viele relativ freie Knoten befinden. Wenn der Verkehr in der Nähe des Zielknotens spannend ist, wirkt sich die Anpassung auf andere nicht relevante Shuttle-Pfade aus. Das macht den Verkehr in der Nähe des Knotens stressiger, wodurch die Effizienz des gesamten Systems verringert wird.

Es gibt einen anderen Algorithmus, mit dem die Sequenz sich nicht in der Nähe des Zielknotens anpasst, sondern eine Warten-Strategie am Startknoten verwendet. Wenn die benötigte Sequenz mit der Sequenz des Auftrags vom Shuttle übereinstimmt, wird die Route für das Shuttle geplant, andernfalls wartet das Shuttle an der Startposition. Die Logik von Algorithmus ist wie folgt:

Algorithmus für der Sequenz-basierter Anpassung beim Startort

- Auslöser:** Shuttle ein neuer Auftrag bekommt oder beim Aktivieren
- 1 Wenn die benötigte Sequenz die Sequenz des Auftrags gleich ist
 - 2 Routing
 - 3 Sonst wenn die benötigte Sequenz die Sequenz des Auftrags nicht gleich ist
 - 4 Shuttle in Warteliste einfügen
 - Auf dem Startort warten
- Auslöser:** Shuttle den Zielort erreicht
- 1 Beladen oder entladen
 - 2 Wenn der Zielknoten die Anforderung von Sequenz hat
 - 3 die benötigte Sequenz aktualisieren
 - 4 das wartende Shuttle aktivieren
-

Abbildung 2-14: Algorithmus für der Sequenz-basierter Anpassung beim Startort

Das Modell in dieser Arbeit verwendet diese Methode. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass das Sequenzierung der Aufträge das System nicht zusätzlich belastet. Weil die Route für das Shuttle, dessen Auftrag in der falschen Sequenz liegt, nicht geplant wird, kann diese Methode die Überlastung des Systems geringfügig verringern. Die Nachteile dieser Methode liegen jedoch ebenfalls offensichtlich. Mit dieser Methode reduziert sich die Anzahl der abgeschlossenen Aufträge mit der Anforderung von Sequenzierung erheblich.

2.2 Heuristische Routingalgorithmen für einen Shuttle für lokale Optimierung

Routingalgorithmen sind eine Art der Netzwerkprogrammierung, die darauf abzielt, den kürzesten Abstand in einem bekannten Netzwerkgraphen zu finden (Shortest Path Problems).

Netzwerkgraphen bestehen aus Knoten V (nodes) und Kanten E (edges) für ungerichteter Graph oder Bögen A (arcs) für gerichteter Graph. Jede Kante oder Bogen hat ihr Gewicht c (cost). Die Netzwerk kann als $G=[V,A,c]$ oder $G=[V,E,c]$ Bezeichnet. Alle übergebenen Bögen oder Kanten vom Knoten[i] zum Knoten[j] wird als eine Route bezeichnet [Yu-2013].

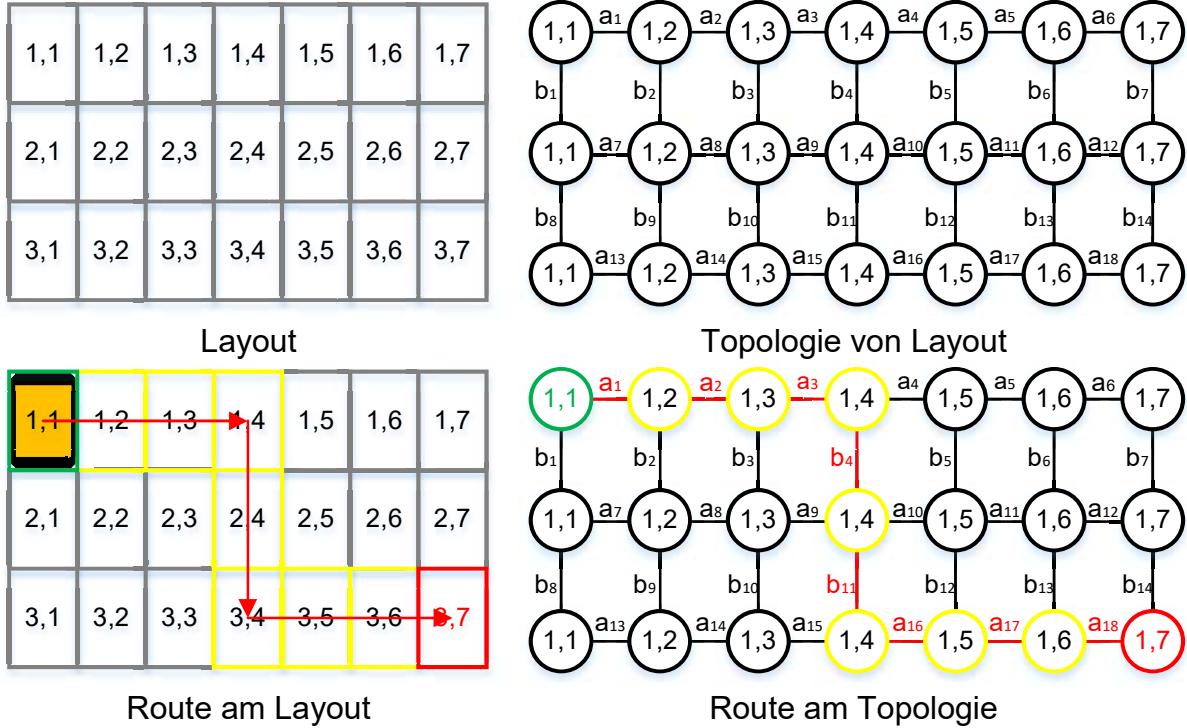


Abbildung 2-15: Struktur und Topologie des Netzwerkproblems

2.2.1 Dijkstra-Algorithmus zum Routing von bestimmten Startort zu jedem Zielort

Dijkstra-Algorithmus ist ein Algorithmus zur Lösung des Kürzesten-Pfaden-Problems (Shortest Path Problem in English) im Netzwerk. Durch Dijkstra-Algorithmus können die kürzesten Routen von einem bestimmten Startort zu jedem Zielort im Netzwerks zu berechnet werden [Wan-2011].

Diese Methode braucht eine Tabelle zur Berechnungen. Die Tabelle sieht folgendermaßen aus. Wobei bedeutet

- $d[j]$: den kürzesten Abstand von Startort zu Knoten $[j]$,
- $p[j]$: den unmittelbaren Vorgängerknoten auf kürzester Route von Startort zu Knoten $[j]$,
- M: die Gruppe aller Knoten, die Expandiert werden.

Tabelle 2-10: Initialisierung der Berechnungstabelle für Dijkstra-Algorithmus

Knoten j	Startort	1	...	Startort-1	Startort+1	...	M
$d[j]$	0	∞	...	∞	∞	...	∞
$p[j]$			

$M = \{ \text{Startort} \}$

In der Initialisierungsphase wird $d[\text{Startort}]$ auf 0 und andere auf unendlich (beim Programmierung eine große Zahl M, Big M in English) eingesetzt. Es gibt nun nur einen Knoten, der expandiert wird, nämlich den Startort.

Algorithmus der Initialisierungsphase von Dijkstra

- 1 Für alle Knoten schleifen
 - 2 Wenn Knoten[j] Startort ist
 - $d[j] = 0$
 - 3 sonst
 - $d[j] = \text{inf}$
 - 4
 - 5
 - 6 $M = \{\text{Startort}\}$
-

Abbildung 2-16: Algorithmus der Initialisierungsphase von Dijkstra

Während der Iterationsphase werden die folgenden Algorithmen verwendet:

Algorithmus der Iterationsphase von Dijkstra

- | | |
|--|---|
| | Eingang: Berechnungstabelle nach der Initialisierung |
|--|---|
- 1 Wenn M nicht leer ist
 - 2 Einen beliebige Knoten[h] aus M wählen
 - 3 Knoten[h] aus M löschen
 - 4 Für alle Nachbarn (Knoten[j]) von Knoten[h] schleifen
 - 5 Wenn $d[j] > d[h] + \text{cost}(h, j)$
 - 6 $d[j] > d[h] + \text{cost}(h, j); p[j] = h$
 - 7 Knoten[j] markieren und dann in M hinzufügen
-

Abbildung 2-17: Algorithmus der Iterationsphase von Dijkstra

Ein Knoten[j] tritt in M ein, wenn den Abstand von Startort nach Knoten[j] aktualisiert wird. Knoten[j] verlässt M, wenn der kürzesten Route von Startort nach Knoten[j] hergestellt und Knoten[j] zu einem Zwischenknoten wird.

Der Route vom Startort zu einem anderen Knoten kann durch Rückrechnung erhalten werden.

2.2.2 Floyd-Warshall-Algorithmus zum Routing zwischen allen Paaren von Knoten

Dijkstra-Algorithmus kann nur die kürzeste Route von einem bestimmten Startort zu einem bestimmten Zielort finden. Wenn alle Route zwischen zwei beliebigen Knoten berechnen werden wollen, müssen alle Knoten als Startort betrachtet und dann Dijkstra-Algorithmus verwendet werden, was der Routingalgorithmus zeitaufwändig

macht. Robert Floyd und Stephen Warshall bieten ein neuer Algorithmus, mit denen die kürzesten Routen zwischen allen Paaren von Knoten einmalig gefunden werden können [Ain-2012].

Floyd-Warshall-Algorithmus ähnlich wie Dijkstra-Algorithmus müssen durch Tabellen ausführen werden. Die Tabelle sieht folgendermaßen aus. Wobei bedeutet

- $d[i,j]$: Länge der kürzesten Route vom Knoten*[i]* nach Knoten*[j]*,
- $p[i,j]$: unmittelbarer Vorgängerknoten auf dem kürzesten Route von Knoten*[i]* nach Knoten*[j]*.

Berechnungstabelle ist asymmetrisch für gerichtete Graphen und symmetrisch für ungerichtete Graphen.

Tabelle 2-11: Initialisierung der Berechnungstabelle für Floyd-Warshall-Algorithmus

Knoten j		1	...	j-1	j		j+1		...	M			
		$d[i,1]$	$p[i,1]$...	$d[i,j-1]$	$p[i,j-1]$	$d[i,j]$	$p[i,j]$	$d[i,j+1]$	$p[i,j+1]$...	$d[i,M]$	$p[i,M]$
i=	1	0	1		
	:				
	j-1			..	0	j-1					..		
	j			..			0	j			..		
	j+1			..					0	j+1	..		
	M			0	M

Während der Initialisierungsphase werden die Informationen zwischen direkt verbundenen Knoten entsprechend dem Layout in der Tabelle eingefügt. Der Initialisierungsalgorithmus lautet wie folgt:

Algorithmus der Initialisierungsphase von Floyd-Warshall-Algorithmus

- ```

1 Für alle Knoten[j] schleifen
2 $d[j, j] = 0; p[j, j] = j$
3 Für alle Knoten[i] mit $i \neq j$ schleifen
4 Wenn Knoten[i] direkte Verbindung mit Knoten[j] hat
5 $d[i, j] = cost[i, j]; p[i, j] = i$
6 sonst
7 $d[i, j] = inf; p[i, j] = []$

```
- 

Abbildung 2-18: Algorithmus der Initialisierungsphase von Floyd-Warshall-Algorithmus

Während der Iterationsphase werden die folgenden Algorithmen verwendet:

---

#### Algorithmus der Iterationsphase von Floyd-Warshall-Algorithmus

---

```

1 Für alle Knoten[j] schleifen
2 Für alle Knoten[i] mit i ≠ j schleifen
3 Für alle Knoten[v] schleifen
4 Wenn d[i, j] > d[i, v] + d[v, j]
5 d[i, j] = d[i, v] + d[v, j]; p[i, j] = p[v, j]

```

---

Abbildung 2-19: Algorithmus der Iterationsphase von Floyd-Warshall-Algorithmus

Obwohl durch Dijkstra-Algorithmus und Floyd-Warshall-Algorithmus die Lösungsgeschwindigkeit erhöht wird, gibt es für allgemeine Routing immer noch einen großen Rechenaufwand. Für das allgemeine entkoppelte Routing müssen nicht den kürzesten Pfad vom Startort zu aller anderen beliebigen Orte berechnen, sondern vom bestimmten Startort zum bestimmten Zielort. Daher sind vieler Berechnungsprozesse von beiden oben genannten Algorithmen nicht notwendig.

Gegenwärtig werden für diese Routingaufgaben häufig der A\*-Serie-Algorithmen verwendet.

### 2.2.3 A\*-Algorithmus zur Verringerung des Rechenaufwands

Der Zweck von A\*-Algorithmus besteht darin, dass sich die Route von einem bestimmten Startort zum bestimmten Zielort so schnell wie möglich finden lassen. Basiert auf Dijkstra-Algorithmen verwendet A\*-Algorithmus bei Auswahl des expandierenden Knoten aus M einen Näherungsalgorithmus, um den am besten geeigneten Knoten bevorzugt expandieren zu können. Da der Zielort festgelegt ist, brauchen durch A\*-Algorithmus alle Knoten expandiert zu werden, was zu der Verringerung der Anzahl der Expansionsvorgänge und zu der Erhöhung der Sucheffizienz führt [Duc-2014].

Die Initialisierungsphase des A\*-Algorithmus ist dieselbe wie bei Dijkstra-Algorithmus. der einzige Unterschied besteht in der Iterationsphase des Algorithmus. In der Iterationsphase des A\*-Algorithmus wird der Knoten nicht zufällig aus M ausgewählt. Statt dessen wird durch die Berechnung des Abstands vom Knoten in M zum Zielort unter Verwendung des Approximationsalgorithmus der Knoten mit minimalem Annäherungsabstand ausgewählt. Wenn der ausgewählte Knoten der Zielknoten ist, wird die optimale Route gefunden.

---

**Algorithmus der Iterationsphase von A\***

---

|    |                                                             |
|----|-------------------------------------------------------------|
|    | <b>Eingang:</b> Berechnungstabelle nach der Initialisierung |
| 1  | Wenn M nicht leer ist                                       |
| 2  | Für alle Knoten[h] in M schleifen                           |
| 3  | L Den ernährten Abstand vom Knoten[h] zum Zielort berechnen |
| 4  | den Knoten[h] mit minimalen ernährten Abstand aus M wählen  |
| 5  | Wenn Knoten[h] Zielort ist                                  |
| 6  | L Optimale Route gefunden wird, Algorithmus beenden         |
| 7  | Knoten[h] aus M löschen                                     |
| 8  | Für alle Nachbarn (Knoten[j]) von Knoten[h] schleifen       |
| 9  | Wenn $d[j] > d[h] + \text{cost}(h, j)$                      |
| 10 | $d[j] > d[h] + \text{cost}(h, j) ; p[j] = h$                |
| 11 | Knoten[j] markieren und dann in M hinzufügen                |

---

Abbildung 2-20: *Algorithmus der Iterationsphase von A\**

Dies Algorithmus erhöht die Wahrscheinlichkeit, den Zielort zu finden, und reduziert andere nutzlose Berechnungen nach Erreichen des Zielortes. Die Genauigkeit der Näherungsalgorithmus beeinflusst nur die Suchgeschwindigkeit des A\*-Algorithmus und nicht dessen Optimalitätsgrad.

## 2.3 Kollisions- und Deadlocks-freier Multi-Agent-Path-Finding-Algorithmen für globale Optimierung

Die oben eingeführten Routingalgorithmen gelten hauptsächlich nur für einen Agenten. In dem Shuttlesystem sind im Allgemeinen mehrere Agenten (Shuttles) enthalten. Diese Shuttles sind nicht unabhängig voneinander. Ihre Route können sich überlappen, und dann können Kollisionen oder sogar Deadlocks auftreten.

Um diese Fehler zu vermeiden, werden viele verschiedene Algorithmen für Multi-Agent-System untersucht. Einige dieser Algorithmen werden unten beschrieben.

### 2.3.1 A\* basierte Kooperative Pathfinding

A\*-Algorithmus ist derzeit der am weitesten verbreitete Routingalgorithmus. Es gibt viele Studien, um der A\*-Algorithmus auf MAPF-Probleme anzuwenden. Um den Rechenaufwand für den Näherungsabstand im A\*-Algorithmus zu verringern, werden HA\*- und HCA\*-Algorithmen vorgegeben, dadurch die Berechnung des Näherungsabstands vom Routingalgorithmus trennen kann. Um die Kollision und Deadlock in MAPF

zu vermeiden, werden der LRA\*-, der CA\*-, der WHCA\*- und der CO-WHCA\*-Algorithmus vorgeschlagen. Diese Algorithmen werden nachstehend ausführlich beschrieben [Sil-2005].

### 1. Local Repair A\* (LRA\*)

Das Wesentliche des Algorithmus LRA\* besteht darin, die Route des an der Kollision beteiligten Shuttles nur dann zu ändern, wenn eine Kollision im nächsten Zeitpunkt zwischen diesen Shuttles erkannt wird, um diese Kollisionen zu vermeiden [Zel-1992].

Im Rahmen dieses Algorithmus ignoriert jedes Shuttle bei dem Routing andere Shuttles und deren reservierte Zeitfenster. Daher ist die Route für dieses einzelne Shuttle optimal. Da andere Shuttles ignoriert werden, können während des tatsächlichen Bewegung Kollisionen auftreten.

Eine Kollision zwischen Shuttles bedeutet, dass zwei oder mehr Shuttles gleichzeitig denselben Knoten besitzen möchten. Anhand des LRA\*-Algorithmus wählt zufällig ein betroffenes Shuttle aus, behält sich das Verwendungsrecht des Knotens vor, und lässt andere Shuttles die Route neu berechnen. Der ausführliche Algorithmus ist unten gezeigt:

---

#### Algorithmus von LRA\*

---

- 1   Route für alle Shuttles berechnen, ohne die Berücksichtigung anderer Shuttles
  - 2   Alle Shuttles sich bewegen
  - 3   Wenn eine Kollision auftritt
    - 4   ein betroffenes Shuttle zufällig auswählen
    - 5   Die Route des gewählten Shuttle behalten
    - 6   neue Routen für anderen Shuttles berechnen
  - 7   Alle Shuttles sich weiter bewegen
  - 8   Zum 3. Schritt
- 

Abbildung 2-21: Algorithmus von LRA\*

Dieser Algorithmus eignet sich für den Fall, dass die Anzahl der Shuttles gering ist, da die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Kollisionen gering ist und die Anzahl der an Kollision beteiligten Shuttles ebenfalls gering ist. Der Vorteil dieses LRA\*-Algorithmus ist, dass er einfach zu berechnen und zu implementieren ist. Dieser Algorithmus garantiert, dass die Routen vor der Kollision und die nach der Kollision neu geplante Route ebenfalls optimal sind.

Dieser Algorithmus kann jedoch die globale Optimalität nicht garantieren. Einer der Gründe ist, dass das Shuttle, das den Auftrittsknoten der Kollision belegen wird, zufällig ausgewählt wird. Außerdem ist für das betreffende Shuttle die optimale Route vom Startort zum Kollisionsknoten und vom Kollisionsknoten zum Zielort nicht gleich die optimale Route direkt vom Startort zum Zielort unter der Berücksichtigung der möglichen Kollision.

Dieser Algorithmus ist auch nicht für zeitkontinuierliche Systeme geeignet. Der Algorithmus erfordert, dass das mit der Kollision verbundene Shuttle ihre Route sofort ändern kann. Aber das Shuttle hat zu diesem Zeitpunkt immer noch Geschwindigkeit und kann nicht plötzlich stoppen, so dass eine echte Beule auftreten kann, der zur Beschädigung des Shuttles führt. Und der Reaktionsabstand dieses Algorithmus ist zu kurz, es ist schwierig, eine gute Kollisionsvermeidungsstrategie zu geben, so dass LRA\* tatsächlich selten verwendet wird.

## 2. Cooperative A\* (CA\*)

Bei dem Routing für jedes Shuttle durch den LRA\*-Algorithmus berücksichtigt anderer Shuttles im System nicht, sodass die globale Optimalität des Systems prinzipiell nicht wirklich erreicht werden kann. Basiert auf dem A\*-Algorithmus wird bei dem CA\*-Algorithmus eine Reservierungstabelle eingeführt, um die Routen aller Shuttles im System aufzuzeichnen. Für OLPS ist die Reservierungstabelle eine dreidimensionale Tabelle, die die x- und z-Koordinaten der Knoten und die Zeitkoordinate t enthält [Sil-2005].

Bei dem Routing für das Shuttle wird anhand der Informationen in der Reservierungstabelle bestimmen, ob und wann der nächste Knoten eintreten kann. Auf diese Weise können die Routen im System jederzeit nicht kollidieren.

In einem OLPS-System weist das Shuttle die Informationen des nächsten Auftrags nicht, so dass der Zielknoten des bearbeitenden Auftrags im Allgemeinen ein unendliches Zeitfenster reserviert, falls nach dem Abschluss des aktuellen Auftrags keinen weiteren Auftrag vorliegt und der Shuttle immer auf dem Knoten bleibt. Das bedeutet, dass andere Shuttles keine Gelegenheit haben, den Knoten zu betreten, sobald der Knoten als Zielort belegt ist, was nicht nur zu einer Verringerung des optimalen Niveaus des gesamten Systems, sondern auch zu einem gewissen Deadlock führt. Das Auftreten von Deadlock wird unten gezeigt.

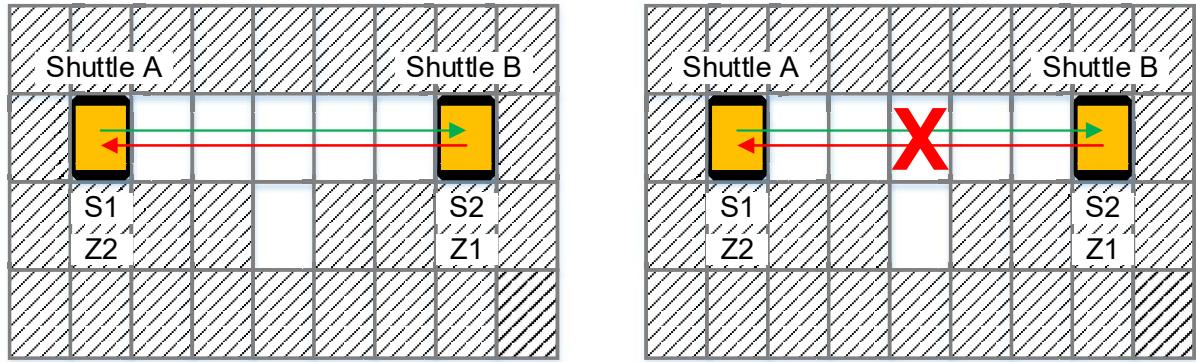


Abbildung 2-22: Eine Situation des Deadlocks im OLPS-System

Wenn sich Shuttle A von S1 nach Z1 und Shuttle B von S2 nach Z2 nur in der obigen Abbildung gezeigten leeren Bereich bewegen müssen, tritt ein Deadlock auf. Unter der Annahme, dass die Route zuerst für Shuttle A geplant ist, schlägt das Routing für Shuttle A fehl, da der Zielknoten Z1 von Shuttle B belegt wurde, und Shuttle A befindet sich immer noch am Startpunkt S1. In gleicher Weise schlägt das Routing für Shuttle B auch fehl, und Shuttle B bewegt sich nicht und hält an seinem Startpunkt S2 an. Gleichermaßen gilt, wenn zuerst die Route von Shuttle B geplant wird. Dies führt dazu, dass beide Shuttles an ihrem Startpunkt anhalten, was als Deadlock genannt wird.

Für die obige Situation sind die möglichen Routen wie folgt und die spezifischen Implementierungsmethoden werden unten beschrieben.

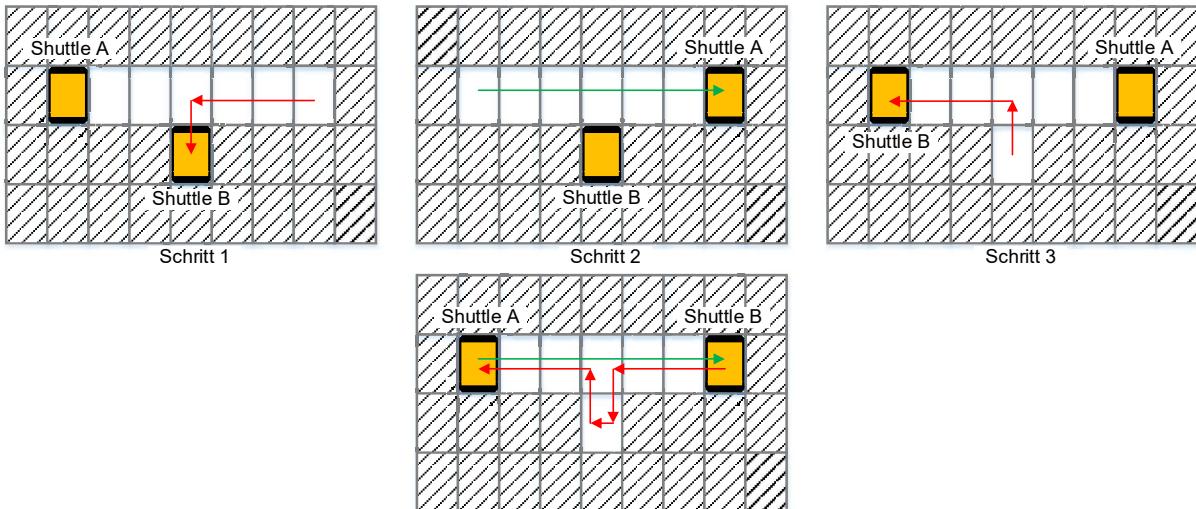


Abbildung 2-23: Eine Lösung für Deadlock im OLPS-System

Das ursprüngliche Modell in dieser Arbeit verwendet diesen CA\*-Algorithmus und vermeidet Deadlocks erfolgreich entsprechend der Besonderheit von Layout und Aufträge. Die detaillierte Methode wird im Kapitel 3 vorgestellt.

### **3. Hierarchical A\*-Algorithmus (HA\*) & Hierarchical Cooperative A\* (HCA\*)**

Die Suchgeschwindigkeit des A\*-Algorithmus hängt enge von der Genauigkeit des annähernden Abstands ab. Um die Genauigkeit der Annäherung zu bekommen, ist häufig ein großer Rechenaufwand erforderlich. Im Folgenden werden zwei Methoden zur Reduzierung des Rechenaufwands beschrieben.

Eine Methode besteht darin, den annähernden Abstand ohne Berücksichtigung des aktuellen Zustands des Systems zu berechnen. Für das OLPS-System werden die Reservierungstabelle und alle Shuttles auf dem Layout ignoriert, sodass das System nach dem tatsächlichen Start direkt den zuvor berechneten annähernden Abstand nutzen kann. Die Trennung der Berechnung des annähernden Abstand vom Routing-Algorithmus bei dem Laufen des Systems wird als Hierarchical A\*-Algorithms (HA\*) bezeichnet [Cul-1994].

Das Modell in dieser Arbeit verwendet diesen HA\*-Algorithmus. Zunächst werden den annähernden Abstände zwischen den einzelnen Knoten über Dijkstra-Algorithmus berechnet und lässt sich das Ergebnis in der Tabelle „Minimale\_Fahrzeit“ einspeichern.

Eine andere Methode besteht darin, den annähernden Abstand bei dem Laufen des Systems zu berechnen. Diese Annäherungsmethode berücksichtigt den Zustand des aktuellen Systems und wird als Hierarchical Cooperative A\* (HCA\*) bezeichnet. Um den Rechenaufwand für die Berechnung des Näherungsabstands zu verringern und die Berechnungsgeschwindigkeit zu erhöhen, werden verschiedene heuristische Algorithmen angeboten, z. B. Reverse Resumable A\* (RRA\*). Da in dieser Arbeit HCA\* nicht behandelt, wird er nicht eingehend erörtert [Hol-1996].

### **4. Windowed Hierarchical Cooperative A\* (WHCA\*)**

Da jeder Shuttle einen Auftrag zu unterschiedlichen Zeitpunkt erhält, wird die Routinalgorythmus unmittelbar danach ausgeführt. Daher, wenn kein neuer Auftrag in das System eingehen, ändert sich die Priorität dieser Routen in diesem Zeitraum nicht; wenn einen neuen Auftrag in das System eingeht, ist die Priorität der neue Auftrag am niedrigsten, und die Priorität anderer Aufträge ändert sich nicht. Ein Shuttle mit höhere Priorität bedeutet, dass dies Shuttle während der Bewegung, wenn eine Kollision auftritt, der betreffende Knoten zuerst eingeben kann. Dieser relativ konstante Prioritätszustand wird als statische Priorität bezeichnet [Lat-2012].

Wenn ein System eine statische Prioritätsmethode verwendet, ist es für das gesamte System schwierig, das globale Optimum zu erreichen. Daher wird eine dynamische Priorität eingeführt. Anhand des WHCA\*-Algorithmus werden nach bestimmte Zeit die

Prioritäten der Routen aller Shuttles neu setzen, d.h. die Routen für alle Shuttles werden neu geplant [Kor-1990].

---

#### Algorithmus der Prioritätsänderung von WHCA\*

---

- |                                                              |                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Auslöser:</b> Festes Zeitintervall T                      |                                                                                 |
| <b>Input:</b> Shuttles, Aufträge, reservierte Zeitfenster, W |                                                                                 |
| 1                                                            | Alle reservierte Zeitfenster löschen                                            |
| 2                                                            | Für r=1 bis Anzahl der Shuttles schleifen                                       |
| 3                                                            | ein nicht ausgewähltes Shuttle[i] zufällig auswählen                            |
| 4                                                            | Routing für den Shuttle[i] unter Berücksichtigung der reservierten Zeitfenster  |
| 5                                                            | Die Zeitfenster für die erste W Knoten auf der Route von Shuttle[i] reservieren |
| 6                                                            | Alle Shuttles sich weiter bewegen                                               |
- 

Abbildung 2-24: Algorithmus der Prioritätsänderung von WHCA\*

Bei Verwendung der WHCA\*-Algorithmus werden die Zeitintervall T und die Anzahl der reservierten Knoten W vorgegeben. K und T müssen die Bedingung erfüllen, dass jedes Shuttle innerhalb der Zeitintervall T nicht mehr als K Knoten fahren kann. Für die Robust des Systems wird angenommen, dass die Länge, die das Shuttle innerhalb der Zeitintervall T fahren kann, den Abstand ist, die das Shuttle sich auf Knotts kürzester Seite mit der höchsten Geschwindigkeit bewegen kann.

$$\eta WL_{short} = v_{max}T, \eta \in (0,1] \quad (2-59)$$

Im Allgemeinen wird  $\eta = 0.5$ .

Die maximale Endzeit eines reservierten Zeitfensters darf die Zeitintervall T oder die Zeit, die benötigt wird, um auf dem Knoten zu bleiben, nicht überschreiten. Auf diese Weise wird ein Shuttle einen Knoten nicht für unendliche Zeit belegen, selbst wenn sich das Shuttle bereits in seiner Zielposition befindet und keine neuen Aufgaben vorliegen.

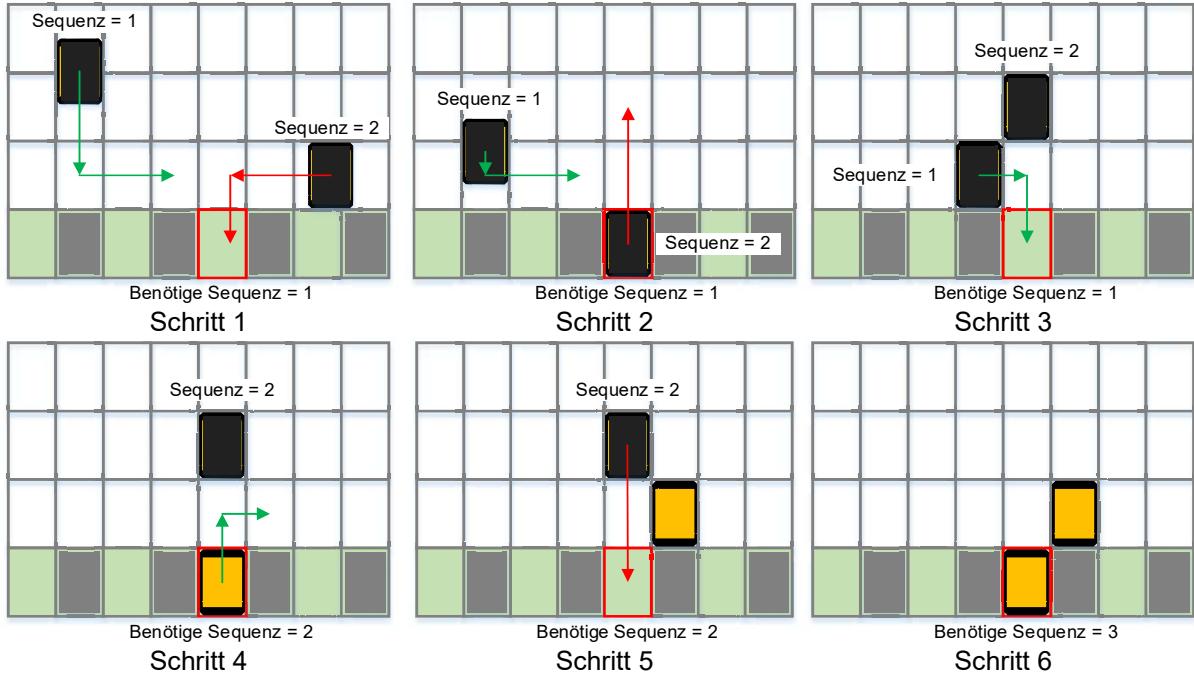


Abbildung 2-25: WHCA\* zur Lösung des durch die Sequenz verursachten Deadlocks

Beim WHCA\*-Algorithmus ist die Anzahl der reservierten Knoten  $W$  erforderlich, dadurch entsprechende Zeitintervall  $T$  empirischen mit  $\eta = 0.5$  berechnen. Bei diesem Algorithmus sind  $W$  und  $T$  feste Werte und haben nichts mit dem Zustand des Systems zu tun. Daher kommt es vor, dass sich mehrere Shuttles nach einem festgelegten Intervall  $T$  sehr nahe am nächsten Kollisionsknoten befinden, sodass nicht genügend Abstand vorhanden ist, um einen besseren Route zur Vermeidung von Kollisionen zu finden. Wenn beim Fahren des Shuttles keine Wechselbeziehung besteht, ist es außerdem sinnlos, die Route neu zu planen. Dies erhöht nur die Rechnungsaufwand des Systems.

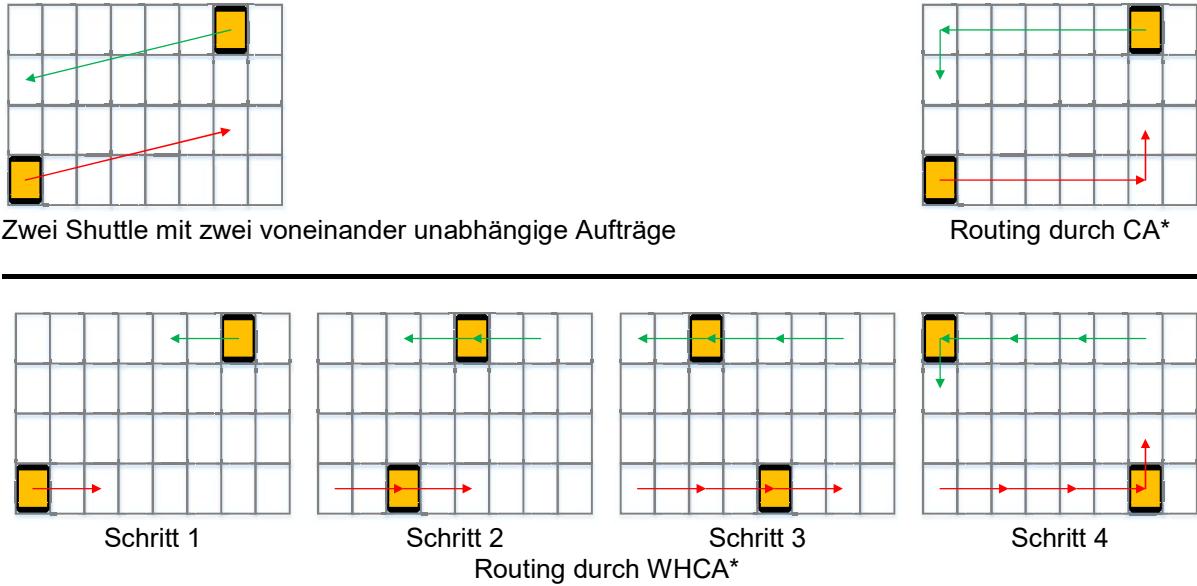


Abbildung 2-26: Routing für zwei Shuttle mit zwei voneinander unabhängige Aufträge mit CA\* und WHCA\*

## 5. Conflict-Oriented Windowed Hierarchical Cooperative A\* (CO-WHCA\*)

Um das Problem, dass der Schaltpunkt von den Routen zu nahe am Kollisionspunkt liegt, zu lösen, wird der CO-WHCA\*-Algorithmus eingeführt. Durch CO-WHCA\* werden das geeignete W sowie T entsprechend der Zeitpunkt, auf dem die Kollision zum ersten Mal auftritt, wenn das Shuttle fährt. Die Logik von CO-WHCA\*-Algorithmus lautet wie folgt [Bna-2014]:

### Algorithmus von CO-WHCA\*

- |    |                                                                                           |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <b>Auslöser:</b> Variables Zeitintervall $T[k-1]$                                         |
|    | <b>Input:</b> Shuttles, Aufträge, reservierte Zeitfenster                                 |
| 1  | Alle reservierte Zeitfenster löschen                                                      |
| 2  | Für $r=1$ bis Anzahl der Shuttles schleifen                                               |
| 3  | ein nicht ausgewähltes Shuttle[i] zufällig auswählen                                      |
| 4  | Routing für den Shuttle[i] unter Berücksichtigung der reservierten Zeitfenster            |
| 5  | Die Zeitfenster für alle Knoten auf der Route von Shuttle[i] reservieren                  |
| 6  | den kürzesten Kollisions- oder Deadlock-Zeitpunkt $T[k]$ finden und zu $W[k]$ konvertiert |
| 7  | Die reservierte Zeitfenster löschen                                                       |
| 8  | Für $i=1$ bis Anzahl der Shuttles schleifen                                               |
| 9  | Die Zeitfenster für die erste $W[k]$ Knoten auf der Route von Shuttle[i] reservieren      |
| 10 | die nächste Auslösezeit $T[k]$ einstellen                                                 |
| 11 | Alle Shuttles sich weiter bewegen                                                         |

Abbildung 2-27: Algorithmus von CO-WHCA\*

Dieser Algorithmus unterteilt den gesamten Weg des Shuttles in zwei Teile. Wenn keine Kollision oder kein Deadlock auftritt, befindet sich das gesamte System in einem global optimalen Zustand. Wenn Kollisionen oder Deadlocks auftreten, beginnt das System, diese Kollisionen oder Deadlocks mit z.B. CA\*-Algorithmus zu verarbeiten. Obwohl beim CA\*-Algorithmus durch mehrmalige Änderung der Priorität von Routen diese Deadlocks gelöst werden können, ist diese Methode nicht sehr effektiv. Bei der Verarbeitung von Deadlocks können Sie andere Algorithmen wie Independence Detection (ID) verwenden, um die Effizienz der Verarbeitungsphase von Deadlocks zu erhöhen, die Optimalität der Routen in der Verarbeitungsphase zu verbessern und die globale Optimalität zu erreichen.

### 2.3.2 Biased Cost Pathfinding (BCP)

Das Hauptproblem von MAPF ist der Umgang mit vorhersehbaren Kollisionen und Deadlocks. Der obige CA\*-Algorithmus bietet eine Methode durch die Änderung der Prioritäten. Nach der Änderung der Priorität wählen einige Shuttles jedoch immer noch die Route mit dem Kollisionsort aus, da durch diese Route den Zielort schneller erreicht werden können. Dies führt zu einer lokalen Überlastung auf bestimmten Knoten, wodurch die Routen später schwierig geplant werden können. Um diese Überlastung zu verringern und die Auslastungsrate jedes Knotens im Layout ähnlich zu gestalten, wird Biased Cost Pathfinding (BCP) eingeführt [Ger-2006].

Die Hauptidee von BCP besteht darin, während der Routing eine virtuelle Kostenfunktion auf bestimmten Knoten zu geben. Dadurch ist für das Shuttle sehr schwierig, diesen Knoten zu nähern, was zu der Vermeidung der Kollisionen auf diesen Knoten und zu dem Abbau der Belastung auf diesem Teil des Systems. Die Kostenfunktion in der allgemeinen Forschung bezieht sich nur auf dem Knotenort, was bedeutet, dass andere Shuttles zu keinem Zeitpunkt einfach auf den Kollisionsknoten zugreifen können, was für die globale Optimierung nicht gut ist. In dieser Arbeit wird daher eine auf Raum und Zeit basierte Kostenfunktion vorgeschlagen.

Die üblicherweise verwendete Kostenfunktion  $c(K, t)$  hat die folgenden Formen:

#### 1. Kubische Verteilung

$$c(K, t) = \begin{cases} \infty, & \text{if } d(K, C) < b \text{ and } |t - t_c| < \tau \\ 0, & \text{if } d(K, C) \geq b \text{ or } |t - t_c| \geq \tau \end{cases} \quad (2-60)$$

## 2. Sphärische Verteilung

$$c(K, t) = \frac{M}{\sqrt{C_1(d(K,C)-b)^2+C_2(t-t_c)^2+C_3}} \quad (2-61)$$

## 3. Dreidimensionale Normalverteilung

$$c(K, t) = \frac{M}{\sqrt{2\pi(2C_1^2\sigma^2+C_2^2\sigma_t^2)}} \exp\left(-\frac{C_1^2[d(K,C)]^2+C_2^2(t-t_c)^2}{2(2C_1^2\sigma^2+C_2^2\sigma_t^2)}\right) \quad (2-62)$$

Wobei vertretet K Knoten; C Kollisionsort;  $d(K, C)$  den Abstand vom Knoten bis zum Kollisionsort mit z.B. Manhattan- oder linearem Abstand;  $t_c$  Kollisionszeitpunkt; b der benutzerdefinierte Grenzabstand;  $\sigma$  Anzahl der kollidierenden Shuttles und  $\sigma_t$  Standardabweichung auf der Zeitachse.

Die Logik des Algorithmus von BCP ist wie unten gezeigt.

---

### Algorithmus von BCP

---

- |    |                                                                                    |
|----|------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <b>Auslöser:</b> einen neue Auftrag[p] für Shuttle[i] ins System gehen             |
|    | <b>Input:</b> Shuttles, Aufträge, reservierte Zeitfenster                          |
| 1  | Routing für Shuttle[i] ohne Berücksichtigung der reservierten Zeitfenster          |
| 2  | Alle Kollisionsknoten und -Zeitpunkte erkennen                                     |
| 3  | Für c=1 bis die Anzahl der Kollisionen schleifen                                   |
| 4  | ein mit Kollision verbundenes Shuttle zufällig auswählen                           |
| 5  | Eine virtuelle Kostenfunktion für alle betreffende Shuttle setzen                  |
| 6  | Für alle andere Shuttles schleifen                                                 |
| 7  | ein nicht ausgewähltes Shuttle[i] zufällig auswählen                               |
| 8  | Routing unter Berücksichtigung der reservierten Zeitfenster und der Kostenfunktion |
| 9  | Die Zeitfenster für alle Knoten auf der Route von Shuttle[i] reservieren           |
| 10 | Alle Shuttles sich weiter bewegen                                                  |
- 

Abbildung 2-28: Algorithmus von BCP

Wenn ein neuer Auftrag in das System eingeht, wird der Route für diesen Auftrag zunächst ohne Berücksichtigung des reservierten Zeitfensters geplant. Dann wird ermittelt, wo und wann alle Kollisionen auftreten. Für jede Kollision wird einer der betreffenden Shuttles zufällig ausgewählt, und eine Kostenfunktion wird zu anderen Shuttles hinzugefügt. Nach dem Einrichten aller Kostenfunktion wird das zuvor reservierte Zeitfenster gelöscht und die Routen für alle Shuttles basierend auf dem reservierten Zeitfenster und der Kostenfunktion geplant.

### 2.3.3 Independence Detection (ID)

ID ist eine Methode zur Lösung lokaler Kollisionen. Bei den oben genannten Methoden (wie WHCA\*, BCP usw.) müssen die Routen für alle Shuttles neu geplant werden, wenn eine Kollision im gesamten System auftritt. Eine Kollision tritt jedoch häufig nur zwischen wenigen Shuttles auf. Das Rerouting für alle Shuttles verursacht viele unnötige Berechnungen, da Shuttles, die nicht mit Kollisionen zusammenhängen, die Route nicht ändern müssen.

Mit ID kann die Shuttles im Zusammenhang mit der Kollision und die nicht für Kollision relevanten Shuttles unterscheiden. Das kann den Rechenaufwand minimieren [Sta-2010].

Algorithmus von Bearbeitung der Kollision durch ID wird wie unten gezeigt:

---

#### Algorithmus von Bearbeitung der Kollision durch ID

---

**Auslöser:** Kollision passiert

**Input:** Shuttles, Aufträge, reservierte Zeitfenster

- 1 alle Shuttles im Zusammenhang mit dieser Kollision finden und gruppieren
  - 2 Wenn Kollision auftritt schleifen
  - 3    Alle andere Kollision-relevante Shuttles ins Gruppe einfügen
  - 4    Kollisions-freie Routen für Shuttles innerhalb der Gruppe ohne Berücksichtigung der Shuttles außerhalb der Gruppe
- 

Abbildung 2-29: Algorithmus von Bearbeitung der Kollision durch ID

ID kann nicht nur zur Lösung der Kollision verwendet werden, sondern auch zur Reduzierung des Rechenaufwands bei der Planung der Routen für alle Shuttles im System. Die Logik für Routing ist wie folgt:

---

#### Algorithmus von Routing durch ID

---

**Input:** Shuttles, Aufträge

- 1 Für jedes Shuttle eine Gruppe bilden
  - 2 Routen für alle Gruppen ohne Berücksichtigung anderer Gruppen planen
  - 3 Wenn Kollision auftritt schleifen
  - 4    Alle kollidierte Shuttles in eine Gruppe einfügen
  - 5    Routen für alle Gruppen ohne Berücksichtigung anderer Gruppen planen
- 

Abbildung 2-30: Algorithmus von Routing durch ID

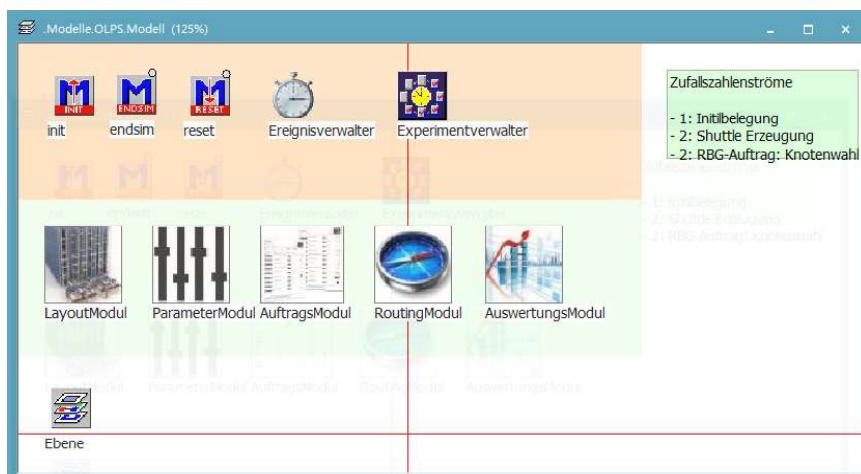
Zusätzlich zu den oben genannten globalen Optimierungsmethoden gibt es noch FAR (Flow Annotation Replanning) [Wan-2008], ID/OD (Independence Detection / Operator Decomposition) [Sta-2010], CBS (Conflict-Based Search) [Sha-2015], RMFS (Robotic Mobile Fulfillment Systems) [Mer-2017], CARP (Context-Aware Route Planning) [Ter-2010; Hvě-2018] usw.



### 3 Entwicklung des Models

Das ursprüngliche Modell wird vom Lehrstuhl-FML (Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik) in TUM (Technische Universität München) entwickelt und im Projekt PALSA (Paletten Aufnehmen Lagern Sequenzieren Abgeben) verwendet.

Das Modell wurde unter Verwendung der oben beschriebenen Theorien von Dijkstra-Algorithmus, Zeitfenster-Routing-Methode, Routing-basierte Sequenzierung, Beschleunigung und Verzögerung, HCA\* usw. konstruiert. Das Modell wird basierend auf den Eigenschaften der Software, Siemens Tecnomatix Plant Simulation, in 6 Module unterteilt:



- LayoutModul
- ParameterModul
- AuftragsModul
- RoutingModul
- AuswertungsModul
- Ebene

Abbildung 3-1: Sechs Modul des Modells

In diesem Kapitel werden einige der Kernmodule erläutert, die als Leitfaden für die globale Optimierungsmethode in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dienen.

#### 3.1 Initialisierung

Das Initialisierungsmodul ist in AuftragsModul geschrieben. Die Hauptmethode und die relevanten Tabellen lauten wie folgt:

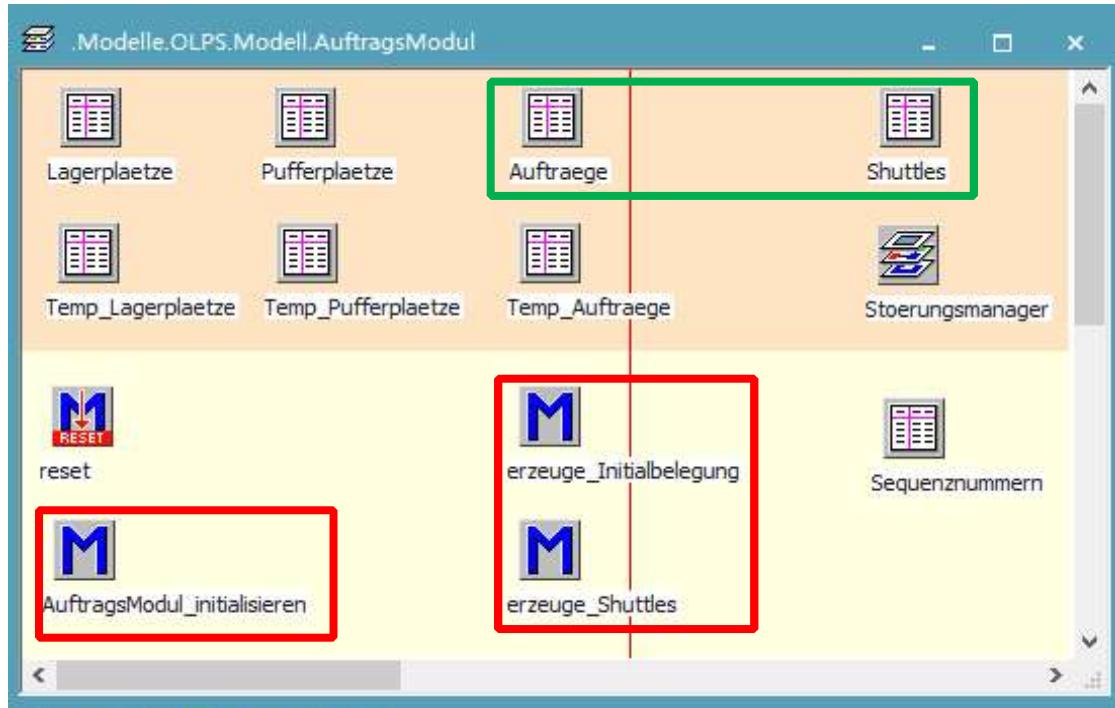


Abbildung 3-2: relevante Methode und Tabelle des Initialisierungsmoduls im AuftragsModul

In der Initialisierungsphase des Modells besteht es hauptsächlich aus drei Teilen:

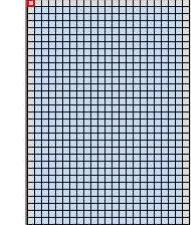
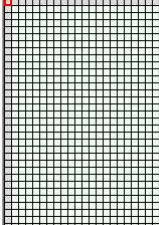
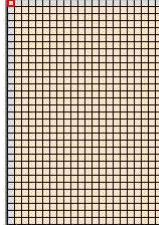
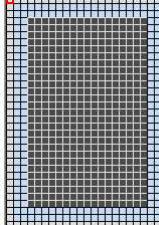
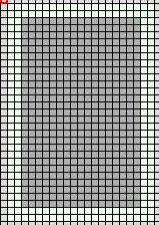
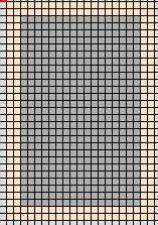
1. Setzen der Eigenschaften aller Knoten im Modell;
2. Erzeugung alle Shuttles;
3. Initialisierung der Auftragsbibliothek.

In diesem Abschnitt wird zusätzlich zur Beschreibung der obigen Teile auch die Bewegungslogik des Shuttles am Anfang angegeben.

### 3.1.1 Setzen der Eigenschaften aller Knoten im Modell

In diesem Teil wird hauptsächlich die Spielart jedes Knotens bestimmt und durch verschiedene Bilder dargestellt. Die folgende Bild und entsprechende Namen werden in diesem Modell verwendet, um der IO\_LKW-Knoten, IO\_RBG-Knoten und Lagerplatz im verschiedene Zustand zu unterscheiden.

Tabelle 3-1: Bilden und Bildnamen von verschiedenen Typen und Zustände des Knotens

| Zustand         | IO_RBG                                                                            | IO_LKW                                                                            | Lagerplatz                                                                          |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| nicht<br>belegt |  |  |  |
| belegt          |  |  |   |
|                 | IO_RBG_belegt                                                                     | IO_LKW_belegt                                                                     | Lagerplatz_belegt_<br>Einlagerung                                                   |
|                 |                                                                                   |                                                                                   | Lagerplatz_belegt_<br>Auslagerung                                                   |

Anstatt die Platte direkt auf den Knoten zu platzieren werden in diesem Modell die Knoten im Belegt-Zustand auch durch entsprechende Bilder dargestellt. Das hängt von der Struktur der Knoten zusammen. Jeder Knoten in diesem Modell besteht aus einer Reihe von Objekten, die später im LayoutModul und im BewegungsModul(Ebene) ausführlich beschrieben werden.

Neben dem Bild jedes Knotens im Modell wird in der Initialisierungsphase auch die Spielart des IO-Knotens (Einlagerung / Auslagerung) definiert. Das ursprüngliche Modell enthält einige unterschiedliche Layout-Methode wie abwechselnd (in diesem Modell), halb/halb usw. Da die Layout-Methode von IO-Knoten nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, wird hier das Standardlayout (abwechselnd) gewählt. Das Layout der Knoten ist wie unten dargestellt:

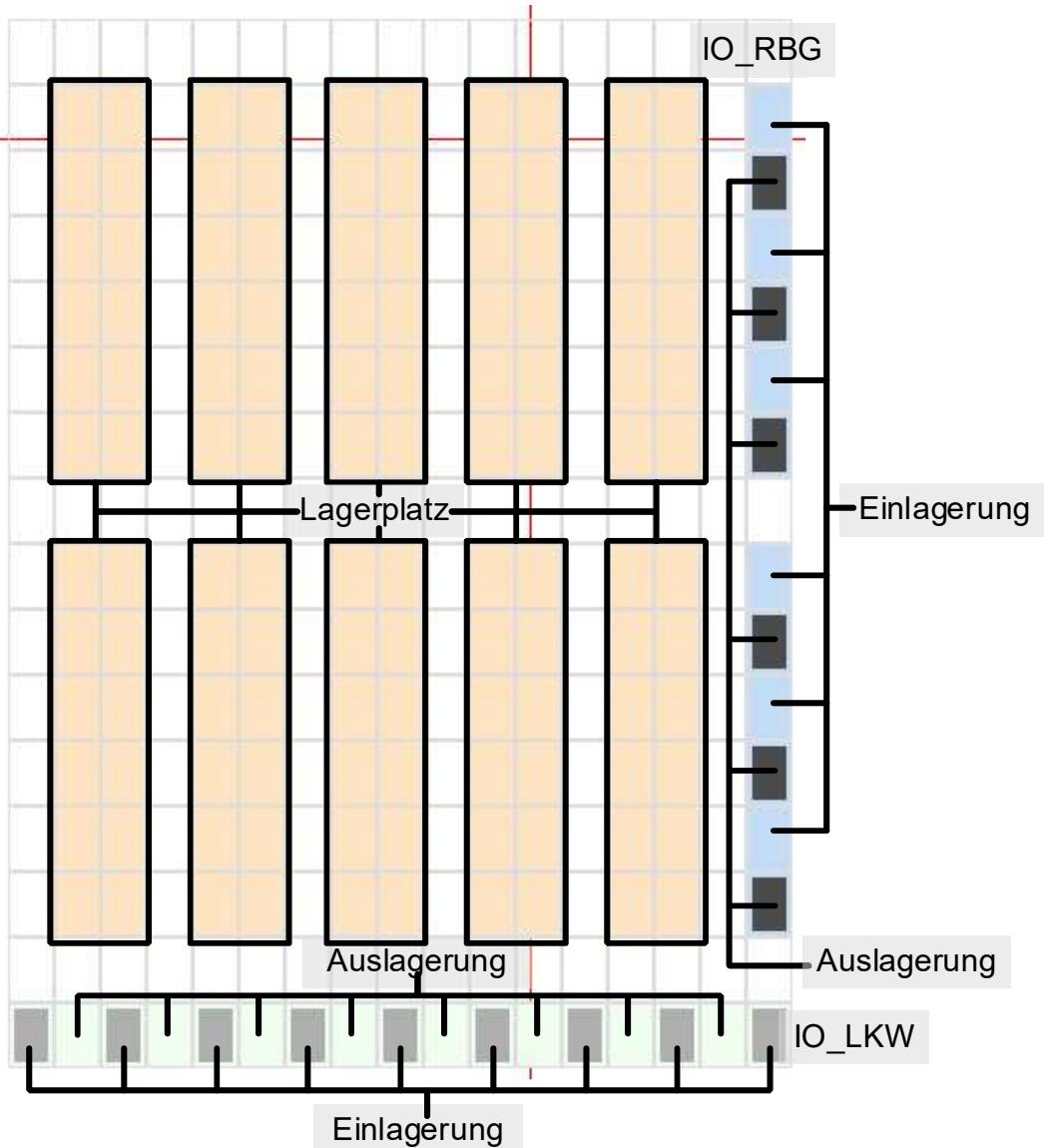


Abbildung 3-3: die Typen aller Knoten im Layout

Die Typen „Lagerplatz“ der Knoten werden beim Erstellen des Modells festgelegt. Wenn sich das Bild des Lagerplatzes setzen lassen, muss zuerst im gesamten Modell nach Knoten, wesen Typ „Lagerplatz“ ist, gesucht werden. Da es im gesamten OLPS in diesem Modell bei Initialisierung keine Palette gibt, sodass alle Lagerplatz auf den Zustand „nicht belegt“ gesetzt sind.

Die spezifische Logik der Layout-Einstellungsphase lautet wie folgt:

---

**Algorithmus der Layout-Einstellungsphase bei Initialisierung**


---

- 1 Für alle Knoten in der Tabelle „IO\_RBG“ schleifen
    - 2 Das Bild des Knotens als „IO\_RBG“ setzen
    - 3 Der reservierte Shuttle für den Knoten als void setzen
    - 4 Das Spielart des Knotens abwechselnd (oder halb/halb) als „Einlagerung“ oder „Auslagerung“ setzen
  - 5 Für alle Knoten in der Tabelle „IO\_LKW“ schleifen
    - 6 Das Bild des Knotens als „IO\_LKW“ setzen
    - 7 Der reservierte Shuttle für den Knoten als void setzen
    - 8 Das Spielart des Knotens abwechselnd (oder halb/halb) als „Einlagerung“ oder „Auslagerung“ setzen
  - 9 Das Sequenznummer als 1 setzen
  - 10 Für alle Objekten im Ebene schleifen
    - 11 Wenn die Objekt ein Knoten ist
      - 12 Wenn der Typ der Objekt „Lagerplatz“ ist
        - 13 Das Bild der Objekt als „Lagerplatz“ setzen
- 

Abbildung 3-4: Algorithmus der Layout-Einstellungsphase bei Initialisierung

Der Status der IO-Knoten wird in Tabellen "IO\_LKW" und "IO\_RBG" aufgezeichnet, und diese zwei Tabellen werden zu diesem Zeitpunkt ebenfalls initialisiert. Beiden Tabellen spielen später eine wichtige Rolle bei der Auftragsgenerierung, die danach im AuftragsModul beschrieben wird.

| Einlagerung |                                         |             |        |         |
|-------------|-----------------------------------------|-------------|--------|---------|
| object      | IO_RBG_Knoten                           | Spielart    | Inhalt | Shuttle |
| 1           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_2 | Einlagerung |        |         |
| 2           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_3 | Auslagerung |        |         |
| 3           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_4 | Einlagerung |        |         |
| 4           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_5 | Auslagerung |        |         |
| 5           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_6 | Einlagerung |        |         |

Abbildung 3-5: Struktur des Tabelle „IO\_RBG“

Da die Paletten zum IO\_LKW-Knoten die Anforderung der Sequenz haben, muss während der Initialisierung die ursprüngliche Sequenz angegeben werden. Die ursprüngliche Sequenznummer ist gleich wie die des ersten Auftrags zu diesem IO\_LKW-Knoten. Die Sequenznummer des ersten Auftrags wird auch im Abschnitt der Erzeugung des Auftrags ausführlich beschrieben wird.

| Einlagerung |                                         |             |          |          |          |           |
|-------------|-----------------------------------------|-------------|----------|----------|----------|-----------|
| string      | object                                  | string 1    | string 2 | string 3 | string 4 | integer 5 |
| 1           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_1_16 | Einlagerung |          |          |          |           |
| 2           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_2_16 | Auslagerung |          |          |          | 1         |
| 3           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_16 | Einlagerung |          |          |          |           |
| 4           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_4_16 | Auslagerung |          |          |          | 1         |
| 5           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_5_16 | Einlagerung |          |          |          |           |
| 6           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_6_16 | Auslagerung |          |          |          | 1         |

Abbildung 3-6: Struktur des Tabelle „IO\_LKW“

### 3.1.2 Erzeugung der Shuttles

In diesem Abschnitt wird nicht nur die Methode für die Erzeugung des Shuttles eingeführt, sondern die Attribute des Shuttles und die zugehörigen Zeitfenster während der Initialisierung des Shuttles gesetzt, was sich direkt auf die anfängliche Bewegung des Shuttles und die ursprüngliche Auftragszuweisung auswirkt.

Die Erzeugungsposition aller Shuttles in diesem Modell ist der Lagerplatz, weil der Lagerplatz außer dem IO-Knoten der einzige mögliche Start- oder Zielknoten ist (ausführlich wird im AuftragsModul beschrieben). Nachdem alle unbesetzten Lagerplätze gesammelt wurden, wird in diesem Modell ein Shuttle auf einem zufälligen Lagerplatz generiert. Eine temporäre Tabelle „Temp\_Lagerplaetze“ wird bei der Auswahl des unbesetzten Lagerplatzes verwendet. Die Tabelle wird wie unten gezeigt. Diese Tabelle wird für alle nachfolgenden Lagerplatzauswahlen verwendet.

| Lagerplaetze |                                         |          |           |
|--------------|-----------------------------------------|----------|-----------|
| string       | object                                  | string 1 | boolean 2 |
| 14           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_3  | LT       | aktiviert |
| 15           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_4  | LT       |           |
| 16           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_5  |          |           |
| 17           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_6  |          |           |
| 18           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_7  |          |           |
| 19           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_9  |          |           |
| 20           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_10 |          |           |
| 21           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_11 | LT       | Shuttle_7 |
| 22           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_12 |          |           |
| 23           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_13 |          |           |
| 24           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_14 |          |           |
| 25           | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_5_2  |          |           |

| Temp_Lagerplaetze |                                         |          |           |
|-------------------|-----------------------------------------|----------|-----------|
| string            | object                                  | string 1 | boolean 2 |
| 13                | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_5  |          |           |
| 14                | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_6  |          |           |
| 15                | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_7  |          |           |
| 16                | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_9  |          |           |
| 17                | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_10 |          |           |
| 18                | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_12 |          |           |
| 19                | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_13 |          |           |
| 20                | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_14 |          |           |
| 21                | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_5_2  |          |           |
| 22                | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_5_3  |          |           |
| 23                | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_5_4  |          |           |
| 24                | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_5_5  |          |           |

Abbildung 3-7: relevante Tabelle bei der Auswahl eines Lagerplatzes

Für ein Shuttle sind die wichtigen Attribute die Position, Ausrichtung, Name und das Objekt des Shuttles. Hier wird eine Tabelle "Shuttles" eingeführt, die den Namen des Shuttles und das entsprechende Objekt sowie den Status dieses Shuttles aufzeichnet.

Die Objekte von Shuttle ändern sich in diesem Modell, und die Gründe werden im LayoutModul erläutert. Die Tabelle „Shuttles“ sieht folgendermaßen aus:

| Shuttle_Name | Shuttle_Objekt                | Status |  |
|--------------|-------------------------------|--------|--|
| Shuttle_1    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:1680 |        |  |
| Shuttle_2    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:1700 |        |  |
| Shuttle_3    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_X:1695 |        |  |
| Shuttle_4    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:1695 |        |  |

Abbildung 3-8: Tabelle „Shuttles“ zum Aufzeichnen der Objekten von Shuttles

Außerdem muss ein Zeitfenster für das generierte Shuttle reserviert, den Zielknoten des Shuttles auf den aktuellen Speicherknoten gesetzt, die Route für das Shuttle geplant und den Knoten beansprucht werden. Die spezifische Logik lautet wie folgt:

---

#### Algorithmus der Erzeugung der Shuttles

---

- 1 Alle nicht belegte Lagerplätze aus der Tabelle „Lagerplaetze“ in die Tabelle „Temp\_Lagerplaetze“ kopieren
  - 2 Für i vom 1 bis die Anzahl der Shuttles schleifen
    - 3 Ein Lagerplatz aus der Tabelle „Temp\_Lagerplaetz“ zufällig wählen
    - 4 Der ausgewählte Lagerplatz aus der Tabelle entfernen
    - 5 Ein neuer Shuttle am gewählten Lagerplatz erzeugen
    - 6 Der Name und die Ausrichtung des Shuttles setzen
    - 7 Der Name und die Objekt in die Tabelle „Shuttles“ einfuegen
  - 8 Ein Zeitfenster  $[0, \infty)$  für Shuttle am Lagerplatz setzen
  - 9 Der Zielort für Shuttle setzen
  - 10 Eine Route vom Standort bis zum Zielort des Shuttles generieren
  - 11 Der beanspruchte Knoten für Shuttle setzen
  - 12 AuswertungsModul initialisieren
- 

Abbildung 3-9: Algorithmus der Erzeugung der Shuttles

Das AuswertungsModul wird hier auch initialisiert. Da dieses Bewertungsmodul keinen Einfluss auf den später beschriebenen Algorithmen hat, wird es in dieser Arbeit nicht im Detail beschrieben.

### 3.1.3 Erstellung der Aufträge-Tabelle

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Fähigkeit des Systems für die Verarbeitung der Aufträge. Daher muss sichergestellt werden, dass der Aufträge in der Auftragsbibliothek ausreichend sind. Während der Initialisierungsphase müssen auch ausreichende Aufträge vorbereitet sein. Die Mindestbestellmenge der Aufträge in der Auftragsbibliothek ist die Anzahl der Shuttles, sodass jedem Shuttle einen Auftrag bei Initialisierung zugewiesen werden kann. Die maximale Anzahl von Bestellungen hängt vom Layout des Modells ab. Da alle neuen Aufträge entweder vom IO\_LKW-Knoten zum IO\_RBG-Knoten oder vom IO\_RBG-Knoten zum IO\_LKW-Knoten sind, bestimmt die Anzahl der IO-Knoten die maximale Größe der Auftragsbibliothek im Ausgangszustand.

Aus dem obigen Layout können entnommen werden, dass die IO\_RBG-Knoten aus 6 Einlagerung-Knoten und 6 Auslagerung-Knoten bestehen, und die IO\_LKW-Knoten aus 9 Einlagerung-Knoten und 8 Auslagerung-Knoten bestehen. Daher gibt es höchstens 9 Aufträge vom IO\_LKW zum IO\_RBG und 6 Aufträge vom IO\_RBG zum IO\_LKW. Es gibt insgesamt 15 neuen Aufträge. In diesem Modell wird in der Initialisierungsphase die größte Auftragsbibliothek (mit 15 Aufträgen) erstellt. Die spezifische Logik ist wie unten gezeigt:

---

#### Algorithmus der Erzeugung der Aufträge bei Initialisierungsphase

---

- 1    Für i vom 1 bis 9 schleifen
  - 2       Ein Auftrag vom IO\_LKW zum IO\_RBG erzeugen: *generiere Auftraege LKW*
  - 3       Ein Auftrag vom IO\_RBG zum IO\_LKW erzeugen: *generiere Auftraege RBG*
- 

Abbildung 3-10: *Algorithmus der Erzeugung der Aufträge bei Initialisierungsphase*

Die spezifische Methode zur Auftragsgenerierung wird im folgenden AuftragsModul vorgestellt.

### 3.1.4 Auslösung der Bewegung von Shuttles

In diesem Abschnitt wird die initiale Bewegung des Shuttles vorgestellt. Die initiale Bewegung ist die Phase von der Erzeugung des Shuttles auf dem Lagerplatz bis zu der tatsächlichen Zuweisung des Auftrags.

Wenn das Shuttle generiert wird, wird der Sensor auf dem Standort des Shuttles aktiviert und die Methode „bei\_Ankunft\_Knoten“ ausgelöst. Entsprechend der Route bei der Erzeugung des Shuttles, können festgestellt werden, dass sich das Shuttle an seinem Zielknoten befindet und der Typ des Zielknotens Lagerplatz ist. über die Methode

„bei\_Aankunft\_Ziel“ aktiviert die Ankunfts methode die Methode „bei\_Aankunft\_Lagerplatz“. Die Logik von „bei\_Aankunft\_Lagerplatz“ während der Initialisierungsphase lautet wie folgt:

---

**Algorithmus der Methode „bei\_Aankunft\_Lagerplatz“ bei Initialisierungsphase**


---

- 1 Wenn die aktuelle Zeit 0 ist
- 2 Ein neuer Auftrag für Shuttle zuweisen: weise\_Auftrag\_zu\_vor\_Abfahrt\_Knoten
- 3 Die Methode „bei\_Aankunft\_Lagerplatz“ benden
- 4 : (im normalen BewegungsModul beschreiben)

Abbildung 3-11: Algorithmus der Methode „bei\_Aankunft\_Lagerplatz“ bei Initialisierungsphase

Normalerweise muss das Shuttle nach Erreichen des Zielknotens beladen oder entladen. Obwohl das Shuttle leer ist, ist kein Beladen oder Entladen während der Initialisierungsphase erforderlich, da es kein realer Auftrag im Shuttle gibt. Die Methode „bei\_Aankunft\_Lagerplatz“ bestimmt anhand der aktuellen Zeit, ob sich das Shuttle in der Bewegungsinitialisierungsphase befindet. In der Initialisierungsphase wird ein neuer Auftrag zum zugewiesen und dann direkt die Methode „vor\_Abfahrt\_Knoten“ aufgerufen. Bisher ist die Initialisierungsphase der Bewegung, und danach ist die normale Bewegung, die im nachfolgenden BewegungsModul ausführlich erläutert wird.

Die Logik der Bewegungsinitialisierungsphase ist wie folgt:

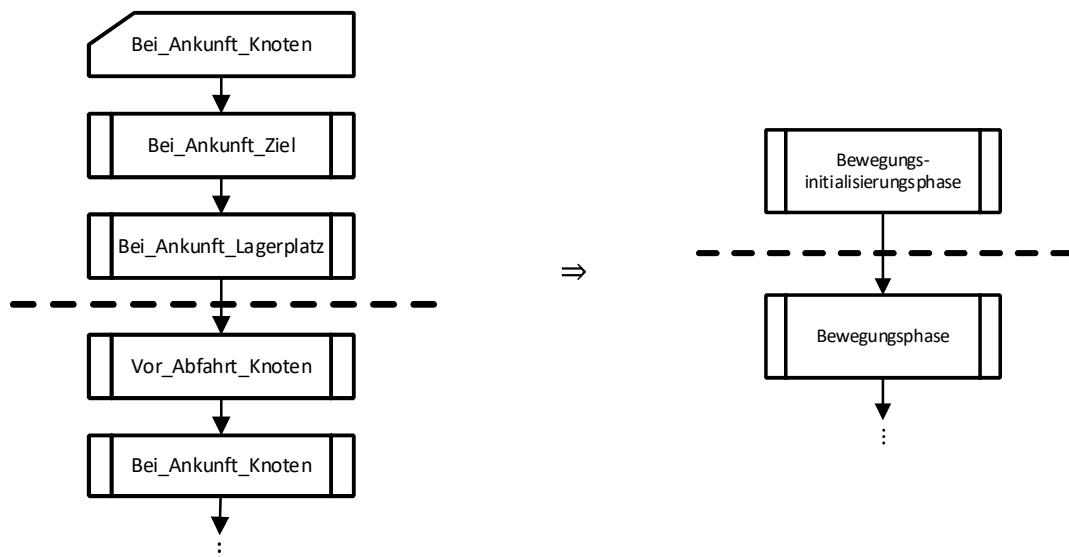


Abbildung 3-12: Flussdiagramm der Bewegungsinitialisierungsphase

Die Logik der gesamten Initialisierungsphase ist in der linken Abbildung unten dargestellt. Um diesen Teil in Zukunft nicht zu erläutern, wird das Initialisierungsphase hier wie folgt gekapselt:

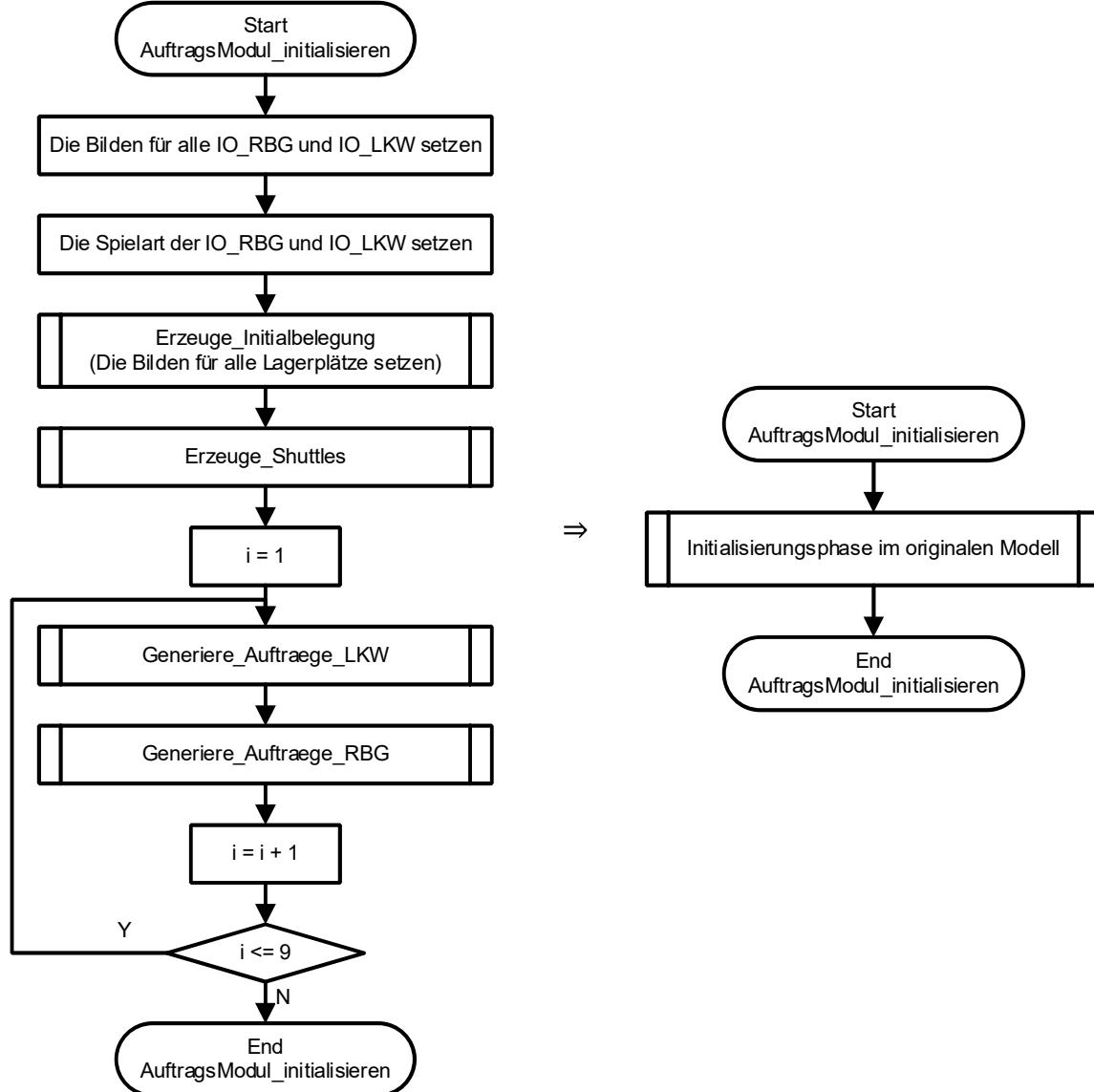


Abbildung 3-13: Flussdiagramm der Initialisierungsphase im originalen Modell

## 3.2 Layout-Modul

In diesem Abschnitt werden das Zusammensetzungsprinzip des gesamten Knotensystems, die Konfiguration des Shuttles und das Bewegungsprinzip des Shuttles zwischen den einzelnen Knoten detailliert beschrieben. Abschließend werden die Sensoren am Knoten vorgestellt, der für die Aktivierung der Methode zur Steuerung der Bewegung des Shuttles unerlässlich ist. Hier wird hauptsächlich die Position und Funktion des

Sensors beschrieben. Die Methode, die die Bewegung des Shuttles steuern, werden im Bewegungsmodul in Abschnitt 3.5 ausführlich beschrieben.

### 3.2.1 Der Aufbau und das Verbindungsverfahren des Knotens

#### Layout: Position und Typ des Knotens

Zunächst muss die Struktur des Layouts erläutert werden. Das Layout dieses Modells besteht aus Sub-modulen Knoten. Hier wird das Sub-modul „Knoten\_16\_4“ als Beispiel genommen. Die Zusammensetzung des Submoduls „Knoten“ ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

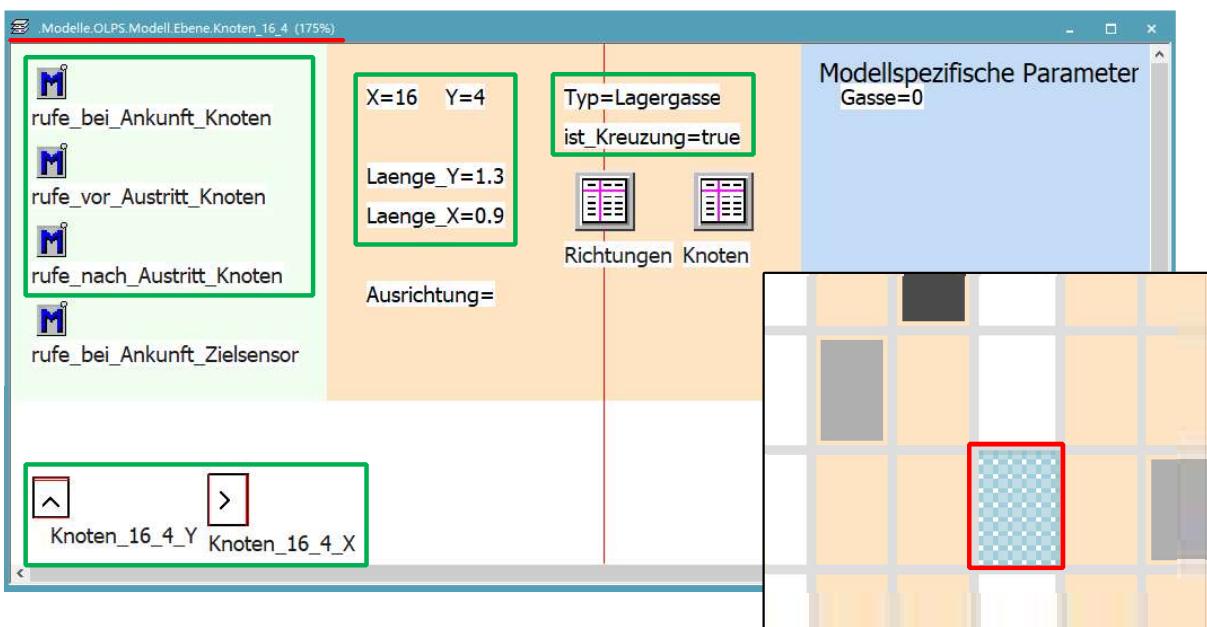


Abbildung 3-14: Die Zusammensetzung des Submoduls „Knoten“

Dieses Sub-modul enthält viele Objekte. In dieser Arbeit werden nur einige Objekte vorgestellt, die sich auf die nachfolgenden Algorithmen beziehen. Die Hauptobjekte sind in der folgenden Tabelle aufgelistet:

Tabelle 3-2: Die Hauptobjekte des Sub-moduls „Knoten“

| Objekt                    | Klasse   | Typ     | Beschreibung                                    |
|---------------------------|----------|---------|-------------------------------------------------|
| Knoten_[X]_[Y]_X          | Weg      | -       | Weg in X-Richtung                               |
| Knoten_[X]_[Y]_Y          | Weg      | -       | Weg in Y-Richtung                               |
| X                         | Variable | Integer | Die X-Koordinate des Knotens                    |
| Y                         | Variable | Integer | Die Y-Koordinate des Knotens                    |
| Laenge_X                  | Variable | Real    | Die Länge des Knotens in X-Richtung             |
| Laenge_Y                  | Variable | Real    | Die Länge des Knotens in Y-Richtung             |
| Typ                       | Variable | String  | Der Typ des Knotens                             |
| ist_Kreuzung              | Variable | Boolean | Ob Shuttle in beide Richtungen durchfahren kann |
| rufe_beim_Ankunft_Knoten  | Methode  | -       | Methode beim Ankunft des Shuttles am Knoten     |
| rufe_vor_Austritt_Knoten  | Methode  | -       | Methode vor Austritt des Shuttles aus Knoten    |
| rufe_nach_Austritt_Knoten | Methode  | -       | Methode nach Austritt des Shuttles aus Knoten   |

## Weg-Objekte

Im Sub-modul „Knoten“ ist die Hauptobjekte, an der sich das Shuttle bewegen kann, das Weg-Objekt in x- und die y-Richtung. In der obigen Abbildung sind es „Knoten\_16\_4\_X“ und „Knoten\_16\_4\_Y“. Die Hauptparameter des Weg-Objekts sind die Länge und Breite des Wegs, die Kapazität von Shuttles, und die Steuerung beim Verlassen des Wegs ausgeführt wird. Wie in der folgenden Abbildung gezeigt (in y-Richtung):

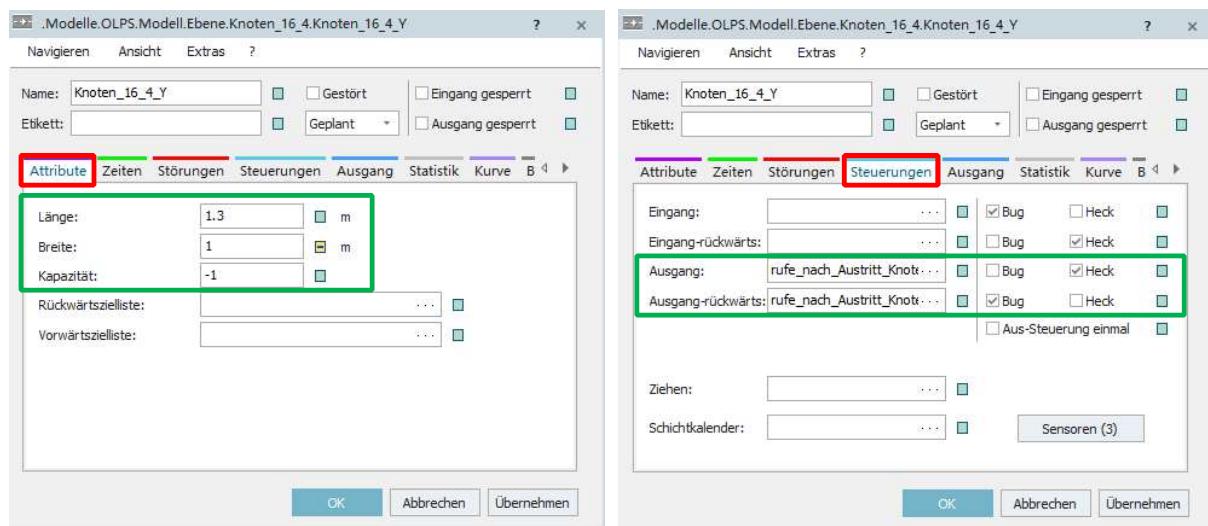


Abbildung 3-15: Die Hauptparameter des Weg-Objekts

Die Typen und möglichen Werte verschiedener Parameter im Weg-Objekt sind in der folgenden Tabelle aufgeführt

Tabelle 3-3: Die Typen und möglichen Werte verschiedener Parameter im Weg-Objekt

| Parameter   |                   | Ausrichtung               |                           |
|-------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|
|             |                   | X                         | Y                         |
| Attribute   | Länge (m)         | 0.9                       | 1.3                       |
|             | Breite (m)        | 1                         | 1                         |
|             | Kapazität         | -1 (inf)                  | -1 (inf)                  |
| Steuerungen | Ausgang           | rufe_nach_Austritt_Knoten | rufe_nach_Austritt_Knoten |
|             | Ausgang-rückwärts | rufe_nach_Austritt_Knoten | rufe_nach_Austritt_Knoten |

## Variable-Objekte

Das Variable-Objekt spiegelt hauptsächlich die Position, Größe und Typ der Knoten wider, was eine wichtige Grundlage für das nachfolgende Routing darstellt. Der Knoten an verschiedenen Positionen hat unterschiedliche x- und y-Werte und die Koordinaten werden gemäß dem folgenden Koordinatensystem erhalten. In der folgenden Abbildung wird Knoten\_16\_4 als Beispiel verwendet:

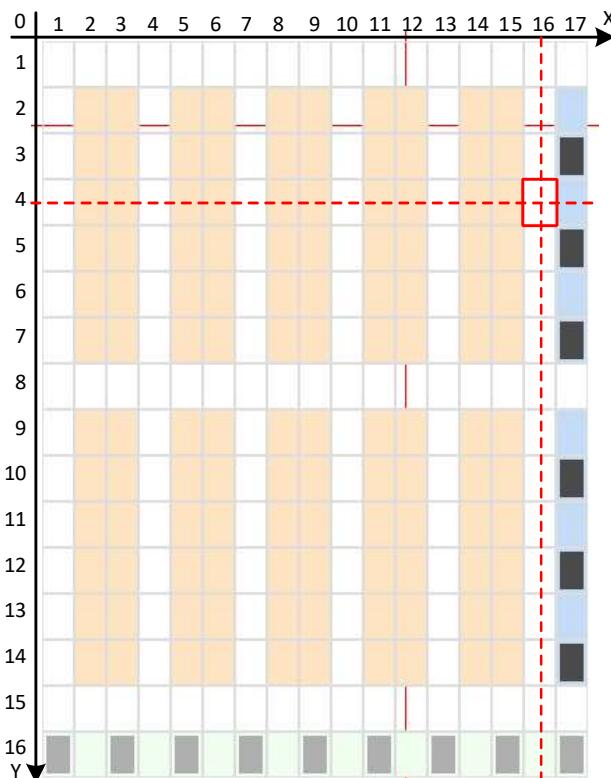


Abbildung 3-16: das Koordinatensystem für die Knoten

Die Knoten verschiedener Typen können unterschiedliche Größen und Parameter haben, wie in der folgenden Tabelle gezeigt

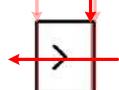
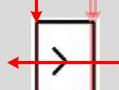
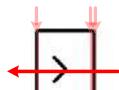
Tabelle 3-4: Größen und Parameter des Knotens

| Parameter    | Der Typ des Knotens |               |        |           |                       |
|--------------|---------------------|---------------|--------|-----------|-----------------------|
|              | Lagerplatz          | IO_RBG        | IO_LKW | Quergasse | Nicht Funktionsknoten |
| Laenge_X (m) | 0.9                 | 0.9           | 0.9    | 0.9       | 0.9                   |
| Laenge_Y (m) | 1.3                 | 1.3           | 1.3    | 1.3       | 1.3                   |
| ist_Kreuzung | true                | true (false?) | false  | true      | true                  |

### Methode-Objekte

Die Methode-Objekte werden zur Steuerung beim Ankunft und Verlassen des Knotens verwendet. Dies hängt mit dem Bewegungsmodus des gesamten Systems zusammen. Die detaillierte Verarbeitungsmethode wird im folgenden Bewegungsmodul beschrieben. In der folgenden Tabelle sind die Aktivierungsmethoden dieser drei Methoden aufgeführt:

Tabelle 3-5: Aktivierungsmethoden von drei Methoden zur Steuerung beim Ankunft und Verlassen des Knotens

| Methode                   | Auslöser                         | Darstellung des Auslösers                                                            | Zustand des Shuttles                                                                  |
|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| rufe_bei_Aankunft_Knoten  | Sensor in der Mittle des Knotens |  |  |
| rufe_vor_Austritt_Knoten  | Sensor am Ende des Knotens       |  |  |
| rufe_nach_Austritt_Knoten | Ausgang des Knotens              |  |  |

### 3.2.2 Die Konfiguration und Bewegung des Shuttles

Da sich jedes Shuttle in Tecnomatix Plant Simulation nur entlang der Längenrichtung bewegen kann, um die Bewegung in Breitenrichtung des Shuttles simulieren zu können, wird zwei Shuttle-Objekte in zwei Richtungen erstellt. Wenn das Shuttle die Bewegungsrichtung ändert, wechselt es zwischen zwei verschiedenen Shuttle-Objekten.

Die Informationen von Shuttle bestehen hauptsächlich aus zwei Teilen. Im Attribut werden die Größe, die maximale Geschwindigkeit sowie die maximale Beschleunigung und Verzögerung des Shuttles definiert, wie in der folgenden Abbildung dargestellt:

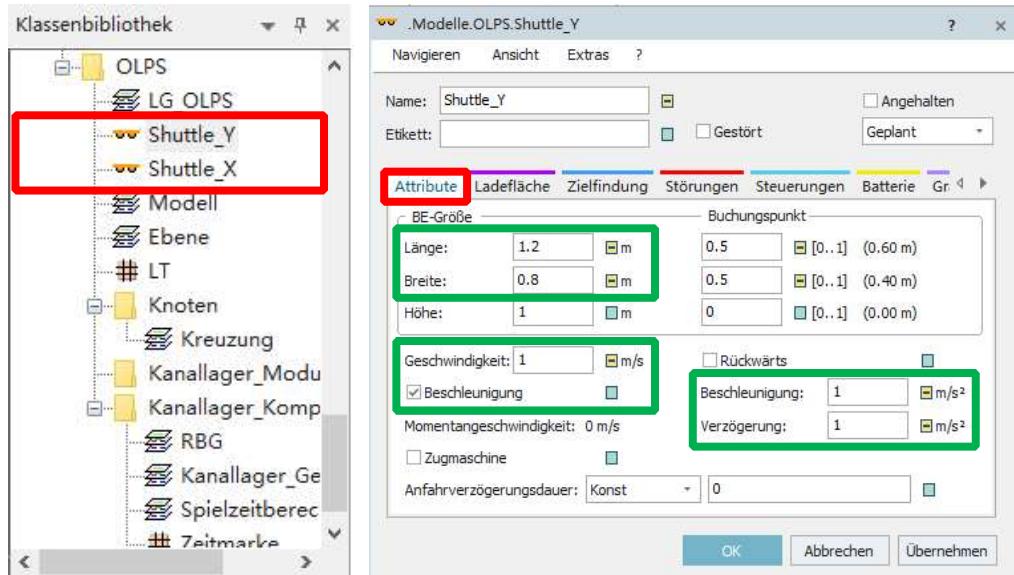


Abbildung 3-17: Die Parameter im Teil „Attribut“ des Shuttles

Die Größe des Shuttles soll für alle Shuttles gleich sein, aber je nach Bewegungsrichtung werden die Werte für Länge und Breite vertauscht. Die Daten sind wie folgt zusammengefasst:

Tabelle 3-6: Die Größe und die Bewegungsparameter des Shuttles

| Shuttle          | Parameter       | Wert               | Beschreibung                                           |
|------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Shuttle_X</b> | Länge           | 0.8 m              | Die Länge des Shuttles in X-Richtung                   |
|                  | Breite          | 0.8 m              | Jeder Wert kleiner als 1 m, keine praktische Bedeutung |
| <b>Shuttle_Y</b> | Länge           | 1.2 m              | Die Länge des Shuttles in Y-Richtung                   |
|                  | Breite          | 0.8 m              | Die Länge des Shuttles in X-Richtung                   |
| <b>alle</b>      | Geschwindigkeit | 1 m/s              | Die maximale Geschwindigkeit des Shuttles              |
|                  | Beschleunigung  | 1 m/s <sup>2</sup> | Die maximale Beschleunigung des Shuttles               |
|                  | Verzögerung     | 1 m/s <sup>2</sup> | Die maximale Verzögerung des Shuttles                  |

Wie aus den Daten in der obigen Tabelle ersichtlich ist, ist die Größe des Shuttles kleiner als die Größe von Knoten, was die Bedingungen für die Teilung des Layouts erfüllt. Entsprechend der Beziehung zwischen der Beschleunigung (Verzögerung) des Shuttles und der Höchstgeschwindigkeit können die für die Beschleunigung (Bremsen) des Shuttles erforderliche Entfernung ermittelt werden:

$$L_{beschleunigung} = L_{Verzögerung} = \frac{v^2}{2a} = \frac{1}{2}(m) < 2 \times \frac{L_{Knoten}}{2} \quad (3-1)$$

Es kann gefolgert werden, dass die durch die Beschleunigung oder Verzögerung des Shuttles verursachte zusätzliche Zeit nur das Zeitfenster eines Knotens vor und nach dem aktuellen Knoten des Shuttles beeinflusst, nicht jedoch das Zeitfenster des relativ weiter entfernten Knotens.

Darüber hinaus spielen die benutzerdefinierten Variablen von Shuttle eine wichtige Rolle bei dem folgenden Routing und bei der Bewegung des Shuttles. Die benutzerdefinierten Variablen von Shuttle werden unten angezeigt:

| Name                      | Wert       | Typ     |
|---------------------------|------------|---------|
| Ausrichtung               | X          | string  |
| beanspruchte_Knoten       |            | table   |
| BeiMarkieren              |            | method  |
| Distanz                   | 7.2        | real    |
| Freizugebende_Knoten      |            | table   |
| Laenge_X                  | 0          | real    |
| Laenge_Y                  | 0          | real    |
| neu_Auftrag               | false      | boolean |
| Route                     |            | table   |
| Segment                   |            | table   |
| Shuttle_verzoegert        | false      | boolean |
| Stat_akt_Zeitanteil       | Fahrt      | string  |
| Stat_akt_Zeitanteil_Start | 1:00:00... | time    |
| unterbrochen              | false      | boolean |
| Verdraengungsfahrt        | false      | boolean |
| Verzoegerungszeitpunkt    | 3603.6...  | real    |
| Ziele                     |            | table   |
| Ziele_gesichert           |            | table   |

Abbildung 3-18: Die benutzerdefinierten Variablen von Shuttle

Unter diesen sind die wichtigsten Variablen für das folgende Routingmodul und Bewegungsmodul in der folgenden Tabelle aufgeführt:

**Tabelle 3-7:** Die wichtigsten benutzerdefinierten Variablen von Shuttle für das folgende Routingmodul und Bewegungsmodul

| Relevante Modul       | Parameter              | Klasse  | Anwendungssituation             |
|-----------------------|------------------------|---------|---------------------------------|
| <b>BewegungsModul</b> | Route                  | Tabelle | Allgemeine Bewegung             |
|                       | Ausrichtung            | String  | Abbiegung                       |
|                       | Verzoegerungszeitpunkt | Real    | Verzögerungsphase               |
| <b>RoutingModul</b>   | Ziele                  | Tabelle | Routing                         |
|                       | Ausrichtung            | String  | Routing                         |
|                       | Route                  | Tabelle | Speichern der generierten Route |

Die Tabelle „Route“ enthält die Knoten in der Route und die auf diesen Knoten reservierten Zeitfenster. Die Tabelle „Route“ lautet wie folgt:

| object                                     | Start    | Ziel      | ZF_ID     | time 5    | time 6    | time 7 | time 8 | time 9 | time 10 | time 11   | time 12   | time 13       | time 14  | time 15 | time 16 | time 17 | time 18 | time 19 | time 20 | real 21 |
|--------------------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|--------|---------|-----------|-----------|---------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| string Knoten                              |          |           |           |           |           |        |        |        |         |           |           |               |          |         |         |         |         |         |         |         |
| 1 *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_13_9  | 475      | 1:25.1225 | 1:25.4425 |           |           |        |        |        |         | 1:27.3725 | 1:27.3825 |               | 1 X      |         |         |         |         |         |         |         |
| 2 *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_14_9  | 476      | 1:25.1225 | 1:26.5725 |           |           |        |        |        |         | 1:28.3725 | 1:28.3825 |               | 1 X      |         |         |         |         |         |         |         |
| 3 *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_15_9  | 477      | 1:26.5225 | 1:27.4725 |           |           |        |        |        |         | 1:29.4025 | 1:29.4125 |               | 1 X      |         |         |         |         |         |         |         |
| 4 *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_16_9  | 478      | 1:27.4225 | 1:28.3725 | 1:29.7225 | 1:31.7225 |        |        |        |         | 1:33.4725 | 1:33.4825 | 18... 35...   | 1 X true | rueck   |         |         | 5       | 6.50    |         |         |
| 5 *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_16_10 | 479      | 1:31.7225 | 1:32.0425 |           |           |        |        |        |         | 1:34.7225 | 1:34.7825 |               | 1 Y      |         |         |         |         |         |         |         |
| 6 *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_16_11 | 480      | 1:31.7225 | 1:33.5725 |           |           |        |        |        |         | 1:36.0725 | 1:36.0825 |               | 1 Y      |         |         |         |         |         |         |         |
| 7 *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_16_12 | 481      | 1:33.5225 | 1:34.8725 |           |           |        |        |        |         | 1:37.3725 | 1:37.3825 |               | 1 Y      |         |         |         |         |         |         |         |
| 8 *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_16_13 | 482      | 1:34.8225 | 1:36.1725 |           |           |        |        |        |         | 1:38.9025 | 1:38.9125 |               | 1 Y      |         |         |         |         |         |         |         |
| 9 *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_16_14 | 483      | 1:36.1225 | 1:37.4725 | 1:39.2225 | 1:41.2225 |        |        |        |         | 1:42.8025 | 1:42.8125 | 27... 31...   | 1 Y true | vor     |         |         | 1       | 0.90    |         |         |
| 10 *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_1_14 | true #84 | 1:41.2225 | 1:41.5425 | 1:43.1225 | -1.0000   |        |        |        |         | -1.0000   | -1.0000   | 31... 31... 2 | 1 X      |         |         |         |         |         |         |         |

Abbildung 3-19: Struktur der Tabelle „Route“ im Shuttle

Die Tabelle „Ziele“ enthält die Position des Zielknotens und die Eintrittsrichtung. Darüber hinaus muss der Ladenzustand des Shuttles vorliegen, um eine angemessene Route planen zu können. Die Tabelle „Ziele“ lautet wie folgt:

| object                                     | Ziel | Ausrichtung | Ausrichtun... | weiteres_Ziel | Verweilda... | Ladezust... | Sequenznum... |
|--------------------------------------------|------|-------------|---------------|---------------|--------------|-------------|---------------|
| 1 *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_14 | X    |             |               |               | -1.00        | leer        |               |
| 2                                          |      |             |               |               |              |             |               |
| 3                                          |      |             |               |               |              |             |               |
| 4                                          |      |             |               |               |              |             |               |

Abbildung 3-20: Struktur der Tabelle „Ziele“ im Shuttle

### 3.2.3 Sensoren an den Knoten

Es gibt 3 Sensoren auf dem Weg jedes Knotens, und ihre Positionen und Einstellungen sind wie folgt:

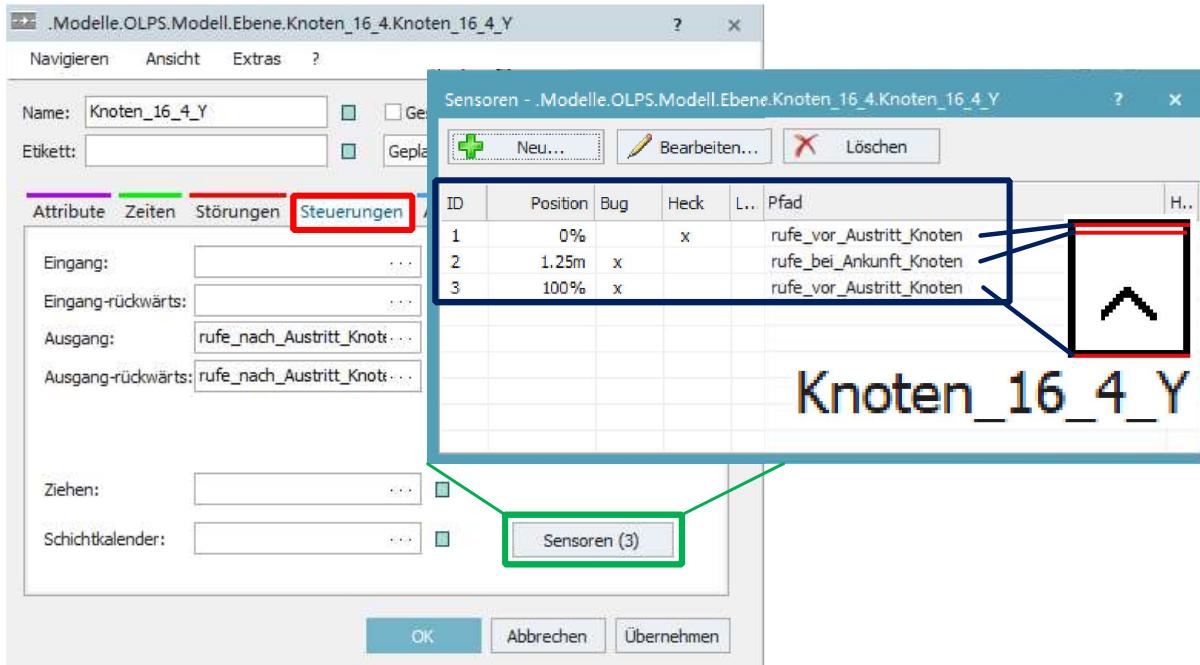


Abbildung 3-21: Positionen und Einstellungen der Sensoren auf dem Weg jedes Knotens

Die beiden Sensoren davor und danach werden verwendet, um zu erkennen, ob das Shuttle den Knoten verlassen wird. Diese beiden Sensoren erfassen jeweils den Shuttle, der vorwärts oder den Knoten rückwärts verlässt. Wenn der entsprechende Sensor erkennt, dass das Shuttle den Knoten verlassen wird, führt er die Methode „vor\_Austritt\_Knoten“ aus, damit das Shuttle zum nächsten Knoten auf seiner Route umlagert.

Der mittlere Sensor erkennt, ob das Shuttle die Mitte des Knotens erreicht. Wenn das Shuttle die Mitte des Knotens erreicht, wird die Methode „bei\_Ankunft\_Knoten“ für das Shuttle ausgeführt. Der spezifische Inhalt der Methode "bei\_Ankunft\_Knoten" wird im folgenden Bewegungsmodul vorgestellt.

## 3.3 Auftrags-Modul

### 3.3.1 Auslösezeit für die Zuweisung des Auftrags

Zuerst wird der Ausführungszeitpunkt der Auftragszuweisung eingeführt. Die Auftragsbearbeitungsmethode kann entsprechend dem aktuellen Standort und dem Ladenstatus des Shuttles in vier Kategorien unterteilt werden, nämlich für das beladene Shuttle

am Lagerplatz, für das leere Shuttle am Lagerplatz, für das beladene Shuttle am IO-Knoten, für das leere Shuttle am IO-Knoten.

### **1. Auftragsbearbeitungsmethode für das beladene Shuttle am IO-Knoten**

Wenn ein beladenes Shuttle sich am IO-Knoten, muss den Standort des Shuttles entweder Auslagerung-Knoten von IO\_RBG oder die Einlagerung-Knoten von IO\_LKW sein. Dies bedeutet, dass das Shuttle an diesem IO-Knoten entladen werden muss, und diesen Auftrag abschließen.

---

#### **Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das beladene Shuttle am IO-Knoten**

---

- |   |                                                                                                                                |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | <b>Auslöser:</b> das beladene Shuttle ihrer Zielknoten, wessen Typ IO-Knoten ist, erreicht<br>das Shuttle die Palette entladen |
| 2 | Ein Auftrag aus der Auftragsbibliothek auswählen: <i>weis_Auftrag_zu</i>                                                       |
- 

*Abbildung 3-22: Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das beladene Shuttle am IO-Knoten*

Shuttle benötigt zu diesem Zeitpunkt einen neuen Auftrag. Durch die Methode „*weis\_Auftrag\_zu*“ wählt Shuttle einen neuen Auftrag aus den nicht vergebene Aufträge aus der Tabelle „Auftraege“ aus.

### **2. Auftragsbearbeitungsmethode für das leere Shuttle am IO-Knoten**

Wenn das leere Shuttle sich am IO-Knoten befindet, bedeutet dies, dass das Shuttle die Palette auf dem IO-Knoten zum Lagerplatz senden wird. Bei diesem Modell wird die Lagerplatz zufällig ausgewählte, sodass das Shuttle die Position des Lagerplatzes nicht im Voraus wissen kann.

Außerdem erreichte der Shuttle nur den Startort des Auftrags und die Palette an den Lagerplatz versendet. Das bedeutet, dass das Shuttle nur einen Teil des Auftrags abgeschlossen, nicht den gesamten Auftrag. Wenn das Shuttle den Startort des Auftrags erreicht, wird neben der zufälligen Auswahl des Lagerplatzes und dem Löschen des aktuellen Auftrags auch ein neuer Auftrag vom ausgewählten Lagerplatz zum Zielknoten des Auftrags benötigt.

Derzeit ist der ausgewählte Lagerplatz jedoch nicht vorrätig. Wenn zu diesem Zeitpunkt ein neuer Auftrag erstellt wird, nimmt möglicherweise anderer Shuttle dieser neue Auftrag und erreicht diesen Lagerplatz, bevor das Shuttle, das entsprechende Palette transportiert, ankommt. Um diese Situation zu vermeiden, werden neue Auftrag generiert, wenn der beladene Shuttle am Lagerplatz ankommt.

Der entsprechende Code wird in Methode „bei\_Aankunft\_IO\_LKW“ und „bei\_Aankunft\_IO\_RB“ geschrieben. Die detaillierte Logik lautet wie folgt:

---

#### **Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das leere Shuttle am IO-Knoten**

---

- |   |                                                                                         |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <b>Auslöser:</b> das leere Shuttle ihrer Zielknoten, wessen Typ IO-Knoten ist, erreicht |
| 1 | das Shuttle die Palette laden                                                           |
| 2 | Eine nicht besitzt Lagerplatz auswählen                                                 |
| 3 | Die ausgewählte Lagerplatz als das Ziel des Shuttles setzen                             |
| 4 | Den entsprechende Auftrag aus der Tabelle „Auftraege“ löschen                           |
- 

Abbildung 3-23: *Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das leere Shuttle am IO-Knoten*

Da der zugewiesene Auftrag aus der Auftragsbibliothek gelöscht wird, müssen die Informationen über den Zielknoten des Auftrags vor dem Löschen gespeichert werden. In das Modell in dieser Arbeit werden die Informationen über den Zielknoten des Auftrags in der generierten Palette gespeichert. Wenn die Palette am Lagerplatz ankommt, wird ein neuer Auftrag basierend auf den in der Palette gespeichert Informationen von Zielknoten generiert.

### **3. Auftragsbearbeitungsmethode für das beladene Shuttle am Lagerplatz**

Wenn das Shuttle beladen und der Zielknoten des Shuttles ein Lagerplatz ist, wird das Shuttle am diesen Lagerplatz entladen. Dann wird der Auftrag des Shuttles nach der Entladung abgeschlossen, sodass zu diesem Zeitpunkt einen neuen Auftrag erforderlich ist. Durch Ausführung der Methode „weis\_Auftrag\_zu“ erhält das Shuttle einen nicht zugewiesenen Auftrag aus der Tabelle „Auftraege“.

---

#### **Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das beladene Shuttle am Lagerplatz**

---

- |   |                                                                                                                                 |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <b>Auslöser:</b> das beladene Shuttle ihrer Zielknoten, wessen Typ Lagerplatz ist, erreicht                                     |
| 1 | Einen neue Auftrag vom aktuellen Lagerplatz bis zum entsprechenden Zielknoten anhand der Informationen in der Palette erstellen |
| 2 | das Shuttle die Palette entladen                                                                                                |
| 3 | Ein Auftrag aus der Auftragsbibliothek auswählen: <u>weis_Auftrag_zu</u>                                                        |
| 4 | Reservierte Shuttleinformationen aus der Tabelle „Lagerplaetze“ löschen                                                         |
- 

Abbildung 3-24: *Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das beladene Shuttle am Lagerplatz*

Da sich zu diesem Zeitpunkt bereits eine Palette auf dem Lagerplatz befinden, ist es erforderlich, anhand der Informationen auf der Palette einen neuen Auftrag von dem aktuellen Lagerplatz zum entsprechenden Zielknoten zu generieren.

#### 4. Auftragsbearbeitungsmethode für das leere Shuttle am Lagerplatz

Gemäß den Auftragszuordnungsregeln dieses Modells, wenn Shuttle den Auftrag vom Lagerplatz zum IO-Knoten empfängt, wird in der Auftragsbibliothek angegeben, zu welchem Shuttle diesen Auftrag gehört. Danach wird die Route für das Shuttle vom aktuellen Knoten zum Startknoten des Auftrags (Lagerplatz) geplant. Obwohl dieser Auftrag noch nicht abgeschlossen ist und sich noch in der Auftragsbibliothek befindet, ist dieser Auftrag keinen nicht zugewiesenen Auftrag, sondern bereits vergeben.

Wenn sich ein leeres Shuttle am Lagerplatz befindet, muss dies Shuttle die Platte am Lagerplatz laden und dann zum entsprechenden IO-Knoten senden. Daher wird der Auftrag zu diesem Zeitpunkt entsprechend dem Startort (der aktuelle Lagerplatz) direkt aus der Auftragsbibliothek ausgewählt. Da der Zielort des Platte am aktuellen Lagerplatz eindeutig ist, ist dieser entsprechenden Auftrag auch eindeutig. Das heißt, dass der Shuttle den zugewiesenen Auftrag erledigen werden. Die Logik wird wie folgt gezeigt:

---

##### **Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das leere Shuttle am Lagerplatz**

---

- |   |                                                                                          |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <b>Auslöser:</b> das leere Shuttle ihrer Zielknoten, wessen Typ Lagerplatz ist, erreicht |
| 1 | Den Zielknoten anhand des aktuellen Standort aus der zugewiesene Aufträge finden         |
| 2 | das Shuttle die Palette laden                                                            |
| 3 | Zielknoten des Shuttles setzen                                                           |
| 4 | Den entsprechende zugewiesene Auftrag aus Tabelle „Aufträge“ löschen                     |
- 

Abbildung 3-25: Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das leere Shuttle am Lagerplatz

Zusammenfassend, wenn das Shuttle ihrer Zielknoten erreicht, wird nach dem Typ des Zielknotens und des Ladenzustands des Shuttles die entsprechende Auftragsbearbeitungsmethode ausgewählt. Die spezifische Ausführungslogik wird im Bewegungsmodul vorgestellt.

Tabelle 3-8: verschiedene Auftragsbearbeitungsmethode nach dem Typ des Zielknotens und des Ladenzustands des Shuttles

| Auftragsbearbeitungs-Methode |      | Typ des Zielknotens      |                      |                      |
|------------------------------|------|--------------------------|----------------------|----------------------|
| Ladenzustand des Shuttles    |      | Lagerplatz               | IO_LKW               | IO_RBG               |
| beladen                      | leer | Neuer Auftrag            | Neuer Auftrag        | Neuer Auftrag        |
|                              |      | Entsprechender IO-Knoten | Zufällige Lagerplatz | Zufällige Lagerplatz |

### 3.3.2 Ergänzungsmethode von Auftragsbibliothek

Die Auftragsbibliothek wird hauptsächlich durch die Methoden „generiere\_Auftraege\_RB“ und „generiere\_Auftraege\_LKW“ ergänzt. Die beiden Methoden werden von den Timern „Generator\_Auftraege\_RB\_IO“ und „Generator\_Auftraege\_LKW\_IO“ alle 5 Sekunden ab dem Zeitpunkt 0 aktiviert. Darüber hinaus werden einige Aufträge von Puffer zu IO-Knoten beim Ankunft des Shuttles am Lagerplatz erstellt.

Tabelle 3-9: die Auftragsgenerierungsmethode verschiedener Typen der Aufträge

| Auftragsgenerierungsmethode |                             | Startort            |                         |        |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------|--------|
| Zielort                     | Auftragsgenerierungsmethode | IO_RB_G_Auslagerung | IO_LKW_Einlagerung      | Puffer |
| IO_RB_Einlagerung           |                             | -                   | generiere_Auftraege_LKW | ✓      |
| IO_LKW_Auslagerung          | generiere_Auftraege_RB      | -                   | -                       | ✓      |

Als nächstes werden die beiden Methoden detailliert beschrieben und die maximale Anzahl und Zusammensetzung von Aufträgen in der Auftragsbibliothek erläutert.

#### 1. Auftrag vom IO\_LKW zum IO\_RB

Mit der Methode „generiere\_Auftraege\_LKW“ werden Aufträge vom IO\_LKW-Knoten zum IO\_RB-Knoten generiert. Für diesen Typ von Aufträgen gibt es keine Anforderung an Sequenz. In dieser Arbeit werden diese Aufträge als Aufträge für Einlagerung genannt.

In der Realität platziert LKW die Palette auf dem Einlagerung-Knoten von IO\_LKW, und dann muss das System ein Shuttle zuweisen, damit die Palette auf diesem Knoten zum Regalsystem transportiert wird. Zuerst werden alle nicht belegte Einlagerung-Knoten von IO\_LKW aus der Tabelle „IO\_LKW“ in die temporären Tabelle „Temp\_IO\_LKW“ eingefügt. Dann wird einen beliebigen Knoten in der Tabelle „Temp\_IO\_LKW“ als Startknoten des Auftrags ausgewählt.

The screenshot displays two tables side-by-side, illustrating the transfer of data from one table to another.

**Top Table (IO\_LKW):**

|   | object                                  | string 1    | string 2    | string 3 | string 4 | integer 5     |
|---|-----------------------------------------|-------------|-------------|----------|----------|---------------|
| 0 | string IO_LKW_Knoten                    | Spielart    | Inhalt      | Status   | Shuttle  | Sequenznummer |
| 1 | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_1_16 | Einlagerung | Palette_345 |          |          |               |
| 2 | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_2_16 | Auslagerung |             |          |          | 16            |
| 3 | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_16 | Einlagerung | Palette_350 |          |          |               |
| 4 | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_4_16 | Auslagerung |             |          |          | 16            |
| 5 | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_5_16 | Einlagerung |             |          |          |               |
| 6 | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_6_16 | Auslagerung |             |          |          | 15            |
| 7 | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_7_16 | Einlagerung | Palette_347 |          |          |               |
| 8 | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_8_16 | Auslagerung |             |          |          | 15            |

**Bottom Table (Temp\_IO\_LKW):**

|   | object                                  | string 1    | string 2 | string 3 | string 4 | integer 5     |
|---|-----------------------------------------|-------------|----------|----------|----------|---------------|
| 0 | string IO_LKW_Knoten                    | Spielart    | Inhalt   | Status   | Shuttle  | Sequenznummer |
| 1 | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_5_16 | Einlagerung |          |          |          |               |
| 2 |                                         |             |          |          |          |               |
| 3 |                                         |             |          |          |          |               |
| 4 |                                         |             |          |          |          |               |
| 5 |                                         |             |          |          |          |               |
| 6 |                                         |             |          |          |          |               |
| 7 |                                         |             |          |          |          |               |
| 8 |                                         |             |          |          |          |               |

Abbildung 3-26: alle nicht belegte Einlagerung-Knoten von IO\_LKW in die Tabelle „Temp\_IO\_LKW“ eingefügen

Es gibt keine Anforderungen für Einlagerung-Knoten von IO\_RBG, die der Palette akzeptieren. Daher wird nur ein Einlagerung-Knoten von IO\_RBG als Zielknoten zufällig ausgewählt. Die spezifische Logik ist wie unten gezeigt

---

#### Algorithmus der Methode „generiere\_Auftraege\_LKW“

---

- Auslöser:** Initialisierung oder Timer
- 1 Alle nicht belegte Einlagerung-Knoten von IO\_LKW in die Tabelle „Temp\_IO\_LKW“ sammeln
  - 2 Ein nicht belegte Einlagerung-Knoten von IO\_LKW zufällig auswählen
  - 3 Ein Einlagerung-Knoten von IO\_RBG zufällig auswählen
  - 4 Der neuer Auftrag in die Auftragsbibliothek einfügen
  - 5 Eine neue Palette am gewählte IO\_LKW-Knoten platzieren
  - 6 Die globale Palette-Nummer aktualisieren
- 

Abbildung 3-27: Algorithmus der Methode „generiere\_Auftraege\_LKW“

Nach der Auswahl von Startknoten und den Zielknoten des Auftrags können die Auftrag generiert werden. in die Auftragsbibliothek werden der Startort, der Zielort, der Typ und den Zeitstempel des neuen Auftrags eingegeben. Danach ändert sich das Bild des entsprechenden IO\_LKW-Knotens und lässt sich der neuen Palette mit neuer Palette-Nummer in der Tabelle „IO\_LKW“ einfügen. Zum Schluss aktualisiert sich die globale Palette-Nummer.

## 2. Auftrag vom IO\_RBG zum IO\_LKW

Mit der Methode „generiere\_Auftraege\_RBG“ werden Aufträge vom IO\_RBG-Knoten zum IO\_LKW-Knoten generiert. In dieser Arbeit werden diese Aufträge als Aufträge für Auslagerung genannt. Die Grundlogik ähnelt wie die der Methode „generiere\_Auftraege\_LKW“.

The figure consists of two screenshots of software windows. The top window is titled ".Modelle.OLPS.Modell.AuftragsModul.IO\_RBG" and contains a table labeled "Einlagerung". The bottom window is titled ".Modelle.OLPS.Modell.AuftragsModul.Temp\_IO\_RBG" and contains a table labeled "Auslagerung". An arrow points from the bottom window up to the top window, indicating the direction of data transfer.

|        | object                                  | string      | string      | string  |
|--------|-----------------------------------------|-------------|-------------|---------|
|        | 0                                       | 1           | 2           | 3       |
| string | IO_RBG_Knoten                           | Spielart    | Inhalt      | Shuttle |
| 1      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_2 | Einlagerung |             |         |
| 2      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_3 | Auslagerung |             |         |
| 3      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_4 | Einlagerung |             |         |
| 4      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_5 | Auslagerung | Palette_343 |         |
| 5      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_6 | Einlagerung |             |         |
| 6      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_7 | Auslagerung | Palette_349 |         |

|        | object                                  | string      | string | string  |
|--------|-----------------------------------------|-------------|--------|---------|
|        | 0                                       | 1           | 2      | 3       |
| string | IO_RBG_Knoten                           | Spielart    | Inhalt | Shuttle |
| 1      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_3 | Auslagerung |        |         |
| 2      |                                         |             |        |         |
| 3      |                                         |             |        |         |
| 4      |                                         |             |        |         |
| 5      |                                         |             |        |         |

Abbildung 3-28: alle nicht belegte Auslagerung-Knoten von IO\_RBG in die Tabelle „Temp\_IO\_RB“ eingefügen

Es ist zu beachten, dass die Aufträge für Auslagerung Sequenzanforderungen haben, sodass die Sequenz bei der Erzeugung des Auftrags berücksichtigt werden muss. Die Logik lautet wie folgt:

---

**Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das leere Shuttle am Lagerplatz**


---

- Auslöser:** Initialisierung oder Timer
- 1 Alle nicht belegte Auslagerung-Knoten von IO\_RBG in die Tabelle „Temp\_IO\_RBG“ sammeln
  - 2 Ein nicht belegte Auslagerung-Knoten von IO\_RBG zufällig auswählen
  - 3 Ein Auslagerung-Knoten von IO\_LKW zufällig auswählen
  - 4 Der neuer Auftrag mit der Sequenz in die Auftragsbibliothek einfügen
  - 5 Die Sequenz für diese IO\_LKW-Knoten aktualisieren
  - 6 Eine neue Palette am gewählte IO\_LKW-Knoten platzieren
  - 7 Die globale Palette-Nummer aktualisieren
- 

Abbildung 3-29: Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das leere Shuttle am Lagerplatz

Die Tabelle „Sequenznummern“ enthält die maximale Sequenz der für IO\_LKW generierten Aufträge. Jedes Mal, wenn ein Auftrag für Auslagerung generiert wird, wird der Sequenzwert auf dem entsprechenden IO\_LKW-Knoten aktualisiert. Hierbei ist zu beachten, dass die Sequenz der vom IO\_LKW-Knoten benötigten Auftrag in der Tabelle „IO\_LKW“ und die maximale Sequenznummer der generierten Aufträge in der Tabelle „Sequenznummern“ aufgezeichnet wird. Die Tabelle „Sequenznummern“ sieht wie folgend aus:

| Modelle.OLPS.Modell.AuftragsModul.IO_LKW |                                         |             |             |        |         |
|------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------|-------------|--------|---------|
|                                          | object                                  | string      | string      | string | integer |
|                                          | IO_LKW_Knoten                           | Spielart    | Inhalt      | Sta... | Shuttle |
| 1                                        | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_1_16 | Einlagerung | Palette_365 |        | 13      |
| 2                                        | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_2_16 | Auslagerung |             |        |         |
| 3                                        | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_16 | Einlagerung | Palette_367 |        |         |
| 4                                        | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_4_16 | Auslagerung |             |        | 10      |

Sequenznummer in „IO\_LKW“ ≤ Sequenznummer in „Sequenznummern“

| Modelle...AuftragsModul.Sequenznummern |         |
|----------------------------------------|---------|
|                                        | integer |
| 1                                      | 1       |
| 2                                      |         |
| 3                                      | 14      |
| 4                                      |         |
| 5                                      | 12      |

Abbildung 3-30: die maximale Sequenznummer der generierten Aufträge in der Tabelle „Sequenznummern“

Wenn das Shuttle die Palette am IO-Knoten beladen und den Knoten verlassen, gibt es keinen Inhalt und kein Shuttle am IO-Knoten. Dies Knoten ist dann einen freien IO-Knoten. Ein solcher freie Knoten kann als Startknoten des Auftrags erneut ausgewählt

werden. Daher kann ein neuer Auftrag erstellt werden. Die spezifische Implementierung wird im nachfolgenden BewegungsModul ausführlich beschrieben.

### **3. Auftrag vom Puffer zum IO-Knoten**

Aus der obigen Analyse lässt sich erfahren, dass es in der Auftragsbibliothek maximal 9 Einlagerungsaufträge und 6 Auslagerungsaufträge gibt. Die Anzahl der Aufträge bei der Simulation darf jedoch nicht kleiner oder gleich 15 sein, da nach Ankunft des beladenen Shuttles am Lagerplatz der ursprüngliche Auftrag gelöscht und ein neuer Auftrag vom Puffer zum IO-Knoten erstellt wird. Dies wurde in der obigen Auslösemethode der Auftragszuweisung ausführlich beschrieben und wird hier nicht noch einmal erörtert.

#### **3.3.3 Zuweisung der Aufträge**

Hier wird die ausführliche Methode der Auftragszuweisung im Originalen Modell und den relevanten Tabellen vorgestellt. Jeden Auftrag in der Auftragsbibliothek enthalten folgende Informationen:

*Tabelle 3-10: Informationen für einen Auftrag*

| Variablen            | Beschreibung                                                    |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Startort</b>      | IO-Knoten oder Lagerplatz                                       |
| <b>Zielort</b>       | IO-Knoten oder Lagerplatz                                       |
| <b>Typ</b>           | Ein-/Auslagerung_Startort.Typ_Zielort.Typ                       |
| <b>Zeitstempel</b>   | Der Zeitpunkt, zu dem der Auftrag erstellt wird                 |
| <b>Sequenznummer</b> | Wenn Zielort.Typ=IO_LKW, Sequenznummer>0, sonst Sequenznummer=0 |
| <b>Shuttle</b>       | Der Name des Shuttles, der den Auftrag erhalten hat             |

Die Informationen des Auftrags enthält nur die Position aber keine Eintrittsrichtung des Knotens, aber gemäß der Knotenposition können festgestellt werden, dass sowohl der Lagerplatzknoten als auch der IO\_RBG-Knoten nur den Shuttle aus der X-Richtung betreten lassen, während der IO\_LKW-Knoten nur den Shuttle aus dem Y-Richtung. Im Allgemeinen sind die Start- und Zielort eines Auftrags entweder Lagerplatz oder IO-Knoten. Nach dem Typ des Knotens kann die Eintrittsrichtung des Knotens bekannt sein.

Gemäß der obigen Diskussion des Zeitpunkts der Zuweisung neues Auftrags können festgestellt werden, dass der neue Auftrag erst dann zugewiesen wird, wenn der beladene Shuttle seinen Auftrag abschließt. Für neuen Auftrag muss das Shuttle beim Startknoten des Auftrags die Palette laden, und dann beim Zielknoten der Bestellung die Palette entladen. In diesem Modell muss sich das Shuttle zuerst zum Startknoten

des Auftrags bewegen. Daher muss eine Route für leere Shuttle nach dem Zuweisen eines neuen Auftrags geplant werden. Der Ladenzustand des Shuttles wird als „leer“ gesetzt.

---

#### Algorithmus der Methode „weis\_Auftrag\_zu“ im originalen Modell

---

- Auslöser:** ein leeres Shuttle am Zielknoten und einen neuen Auftrag benötigen
- 1 den ersten nicht zugewiesenen Auftrag in der Auftragsbibliothek auswählen
  - 2 Der Startort des Auftrags als Ziel der Shuttles setzen
  - 3 Wenn der Typ des Startorts des Auftrags IO\_LKW ist
    - 4 Die Ausrichtung des Startort „Y“ setzen
  - 5 sonst
    - 6 Die Ausrichtung des Startort „X“ setzen
  - 7 Der Ladenzustand des Shuttles „leer“ setzen
  - 8 Wenn der Typ des Startknotens „Lagerplatz“ ist
    - 9 der Lagerplatz für das Shuttle reservieren
- 

Abbildung 3-31: Algorithmus der Methode „weis\_Auftrag\_zu“ im originalen Modell

Wenn das Shuttle einen neuen Auftrag bekommt, wird in der Auftragsbibliothek angegeben, zu welchem Shuttle den Auftrag gehört. Auf diese Weise können leicht festgestellt werden, welche Aufträge zugewiesen und welche nicht zugewiesen werden. Gemäß der obigen Diskussion des Zeitpunkts für die Auftragszuweisung werden der Auftrag nur für dem leeren Shuttle aus der Auftragsbibliothek ausgewählt, sodass nicht alle Shuttles, sondern nur der leere Shuttle in der Auftragsbibliothek reserviert werden. Die Auftragsbibliothek sieht folgendermaßen aus:

| object | Startort                                 | Zielort                                  | Typ                       | Zeitstempel | Sequenznum... | Shuttle    |
|--------|------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------|-------------|---------------|------------|
| 1      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_12 | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_10_16 | Auslagerung_IO_RBG_IO_LKW | 57:15.0000  | 22            | Shuttle_2  |
| 2      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_16  | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_6  | Einlagerung_IO_LKW_IO_RBG | 57:20.0000  |               | Shuttle_5  |
| 3      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_7  | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_4_16  | Auslagerung_IO_RBG_IO_LKW | 57:25.0000  | 17            | Shuttle_12 |
| 4      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_14_3  | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_8_16  | Auslagerung_Puffer_IO_LKW | 57:34.8405  | 15            | Shuttle_8  |
| 5      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_3_11  | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_10_16 | Auslagerung_Puffer_IO_LKW | 59:56.5809  | 21            | Shuttle_7  |
| 6      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_11_5  | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_13 | Auslagerung_Puffer_IO_RBG | 57:37.6619  | 0             |            |
| 7      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_15_16 | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_4  | Einlagerung_IO_LKW_IO_RBG | 57:40.0000  |               |            |
| 8      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_6_11  | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_9  | Auslagerung_Puffer_IO_RBG | 57:48.6153  | 0             |            |
| 9      | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_5_16  | *.Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_11 | Einlagerung_IO_LKW_IO_RBG | 57:55.0000  |               |            |

Abbildung 3-32: Struktur der Tabelle „Auftraege“

In den nachfolgenden globalen Optimierungsmethoden wird häufig die ursprüngliche Auftragszuweisungsmethode verwendet. Um diesen Teil in Zukunft nicht zu erläutern, wird der ursprüngliche Code hier wie folgt gekapselt:

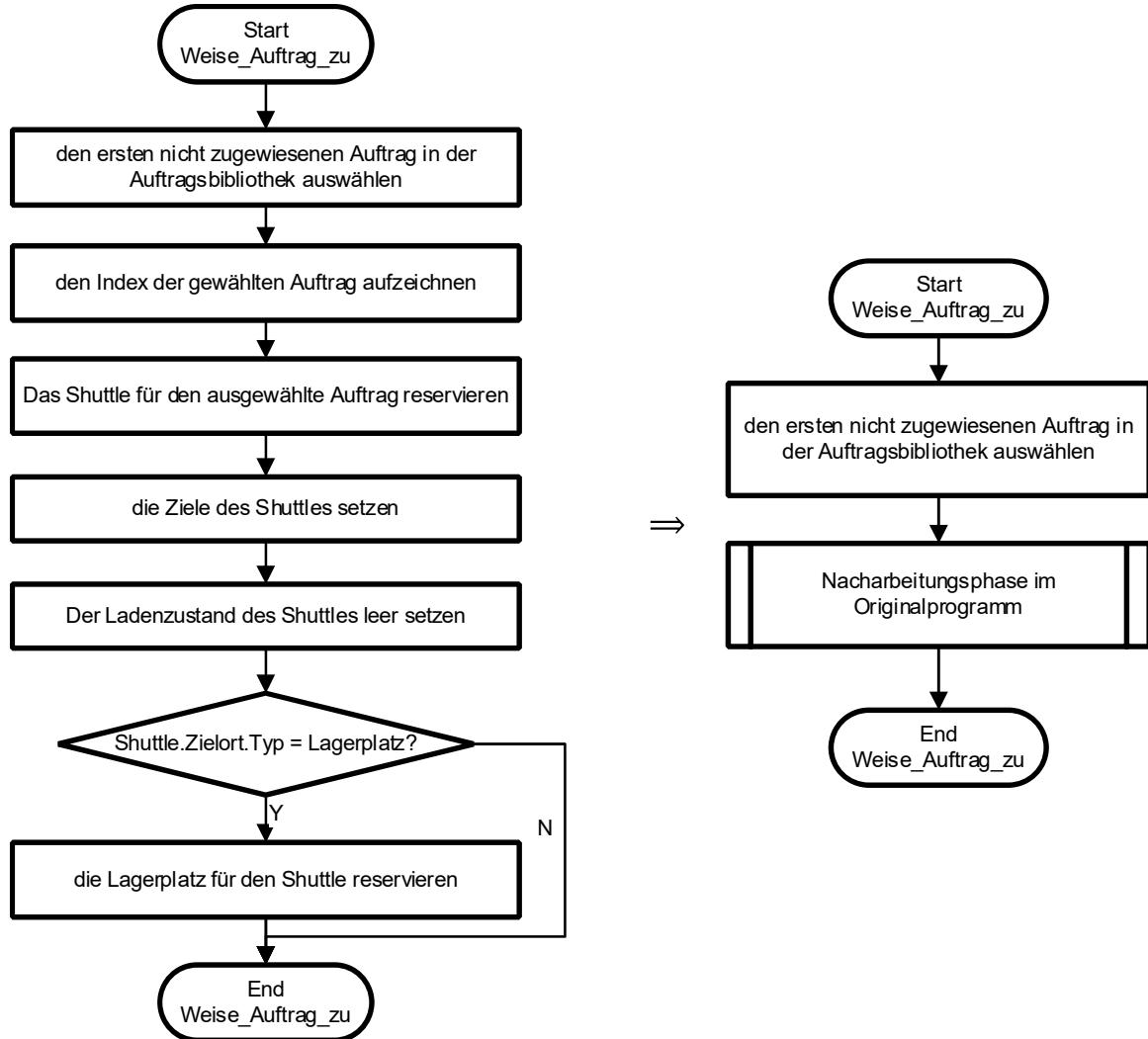


Abbildung 3-33: Flussdiagramm der Methode „weis\_Auftrag\_zu“ im originalen Modell

## 3.4 Routingmodul

Das Routingmodul besteht hauptsächlich aus den Methoden und Tabellen in der folgenden Abbildung:

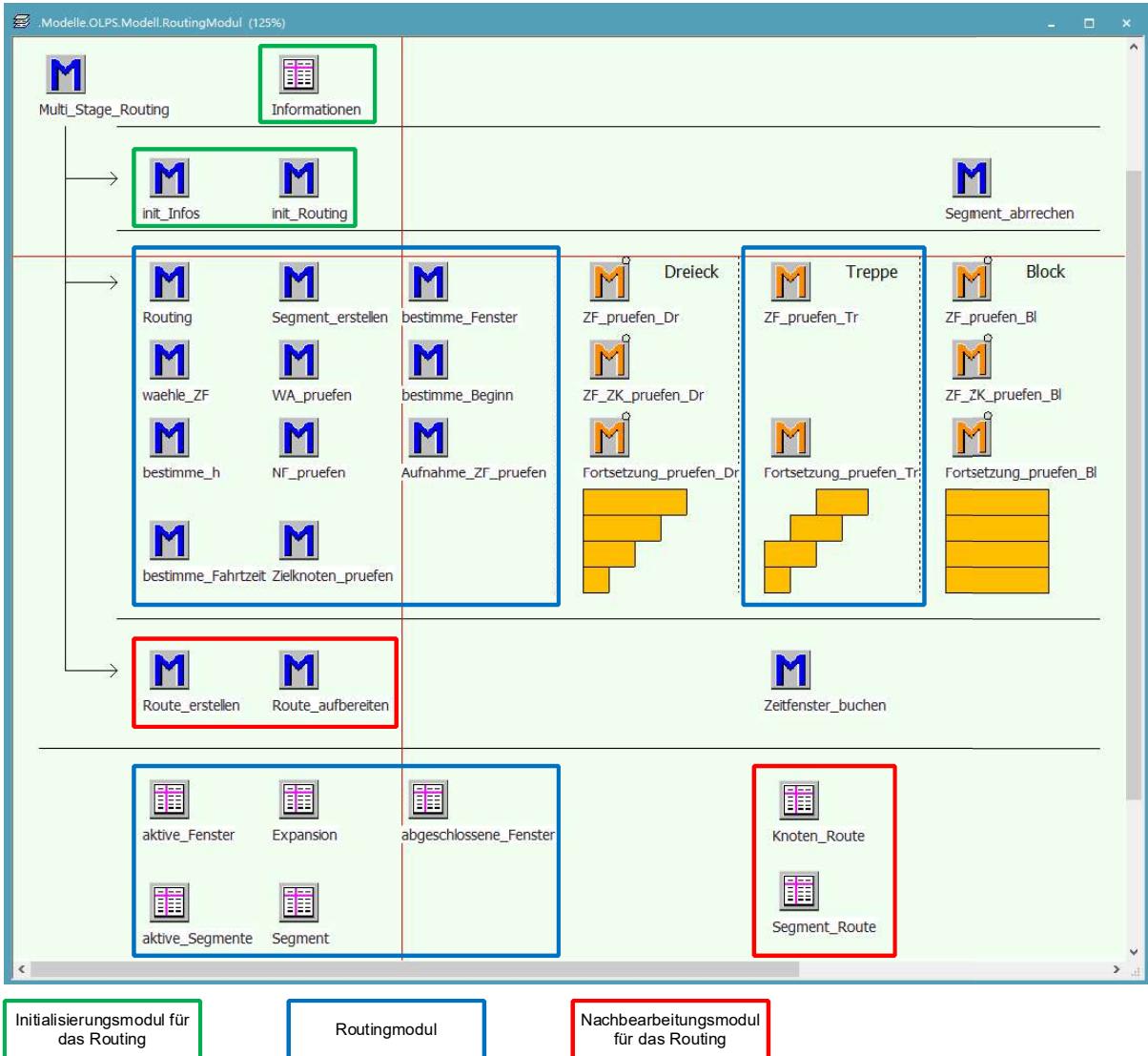


Abbildung 3-34: Relevante Methoden und Tabellen im Routingmodul

Diese Methoden und Tabellen sind hauptsächlich in drei Sub-module unterteilt: Initialisierungsmodul, Routingmodul und Nachbearbeitungsmodul. Die Verbindung zwischen diesen Modulen wird durch die Methode „Multi\_Stage\_Routing“ realisiert, deren Logik ist wie folgt:

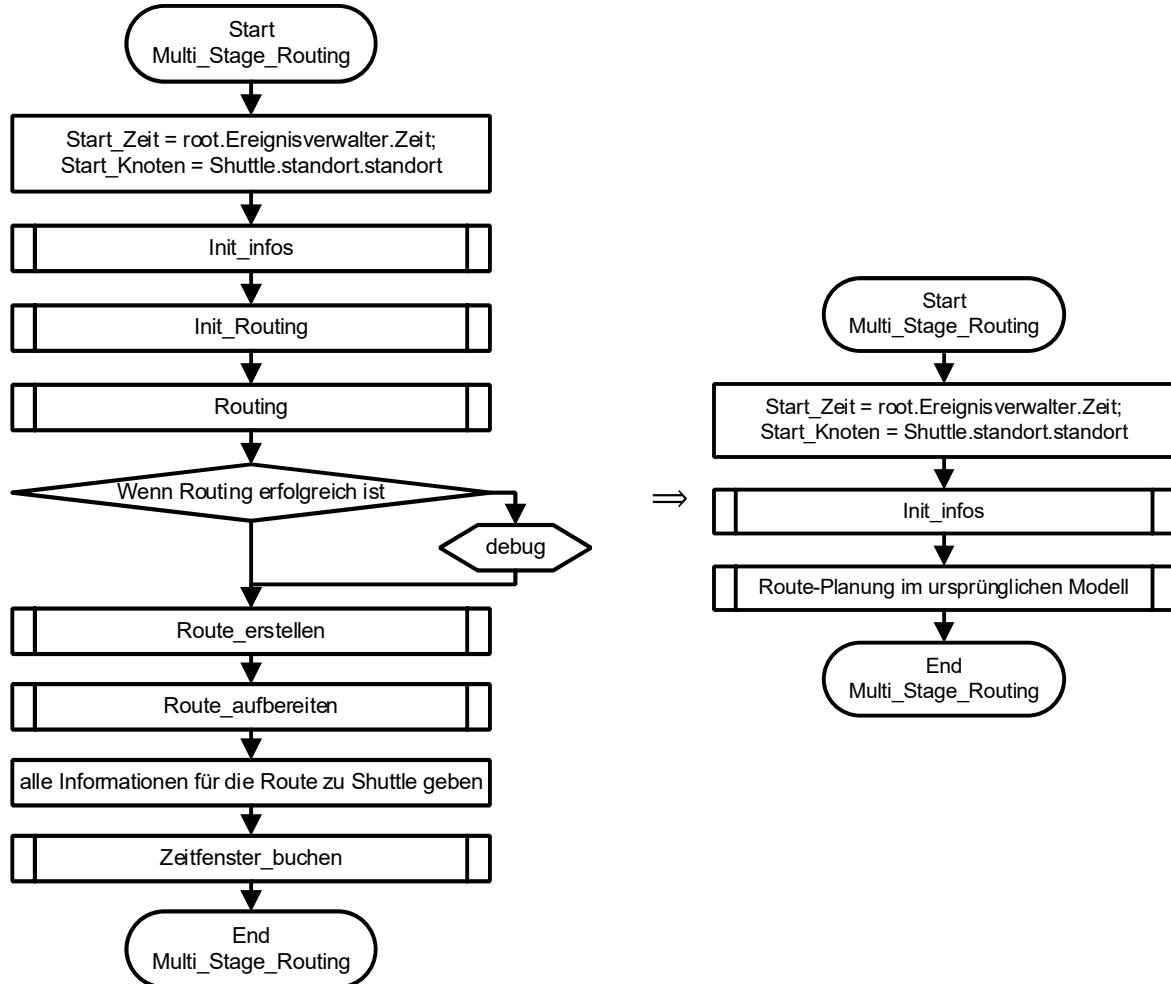


Abbildung 3-35: Flussdiagramm der Methode „Multi\_Stage\_Routing“ im originalen Modell

Als nächstes wird die spezifische Implementierung jedes Sub-moduls detaillierter vor-  
gestellt.

### 3.4.1 Initialisierungsmodul für das Routing

Das Initialisierungsmodul für das Routing besteht aus zwei Methoden, nämlich „init\_Infos“ und „init\_Routing“.

Die Hauptfunktion der Methode „init\_Infos“ besteht darin, die Informationen des Auf-  
trags auf dem Shuttle zu sammeln, um der Zielknoten und die zugehörigen Parameter  
zu klären. Diese Daten werden wie folgt in der Tabelle „Informationen“ gespeichert:

| time       | object                      | object                                    | string                                    | object      | string | boolean | integer | object  | table   | object  | real      | time        | string   |
|------------|-----------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|-------------|----------|
| Start_Zeit | Ebene                       | Start_Knoten                              | A...                                      | Ziel_Knoten | Au...  | Au...   | Sequ... | weit... | Ziel... | Ziel... | Verwei... | Minimale... | Ladez... |
| 1:26,7991  | *,Modelle.OLPS.Modell.Ebene | *,Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_17_3 X | *,Modelle.OLPS.Modell.Ebene.Knoten_11_3 Y |             |        |         |         |         |         |         | -1.00     | 13.4000     | beladen  |
| 2          |                             |                                           |                                           |             |        |         |         |         |         |         |           |             |          |
| 3          |                             |                                           |                                           |             |        |         |         |         |         |         |           |             |          |
| 4          |                             |                                           |                                           |             |        |         |         |         |         |         |           |             |          |

Abbildung 3-36: Struktur der Tabelle „Informationen“ im Routingmodul

Das nachfolgende Routing basiert auf den Informationen in der Tabelle, sodass kein spezifisches Shuttle und Layout mehr erforderlich ist. Dadurch das Routingmodul von andere Module getrennt und die Robustheit des Gesamtsystems erhöht wird.

Die Hauptfunktion der Methode „init\_Routing“ besteht darin, den ersten aktiven Knoten und das Zeitfenster auf diesem Knoten zu bestimmen. Der aktive Knoten ist ein Konzept des A\*-Algorithmus und gibt den nächsten Knoten an, der expandiert werden muss. Im Initialisierungsmodul gibt es nur einen aktiven Knoten, nämlich den Standort des aktuellen Shuttles.

### 3.4.2 Routingmodul

Das Pfadplanungsmodul übernimmt den CA\*-Algorithmus und führt die Beschleunigung und Verzögerung des Shuttles ein. Die spezifische Implementierungsmethode wird in dieser Arbeit nicht im Detail beschrieben. In diesem Abschnitt werden hauptsächlich einige Einschränkungen für das Routingmodul des ursprünglichen Modells für das Routing in Bewegung vorgeschlagen.

#### **Einschränkung 1: Das Routing kann nur durchgeführt werden, wenn die Geschwindigkeit des Shuttles null ist.**

Der Routingalgorithmus des ursprünglichen Modells bestimmte das Zeitfenster basierend auf der Entfernung zwischen der aktuellen Position des Shuttles und einem bestimmten Knoten und berücksichtigte die Beschleunigung und Verzögerung des Shuttles. Die spezifische Implementierungsmethode wird in der Methode „bestimme\_Fahrtzeit“ gefunden. Die Berechnungsmethode im ursprünglichen Modell geht jedoch davon aus, dass die Geschwindigkeit des Shuttles 0 ist. Wenn das Shuttle also eine Geschwindigkeit hat, kann der Routingalgorithmus des ursprünglichen Modells nicht verwendet werden.

Damit für das Shuttle in Bewegung ein Routingalgorithmus ausgeführt werden kann, muss die Methode zur Berechnung des Zeitfensters geändert werden. Für das Shuttle in Bewegung muss jedoch nur die Bestimmungsmethode der Zeitfenster in dem ersten

Segment der Route geändert werden, weil dessen Anfangsgeschwindigkeit nicht 0 ist, sodass die Berechnungsmethode aller anderen Routen nicht geändert werden muss.

Darüber hinaus kann das Zeitfenster des ersten Segments der Route durch andere Shuttles beeinflusst werden, und eine Änderung der Berechnungsmethode allein ist möglicherweise nicht ausreichend. Im Folgenden wird ein stabilerer Routingalgorithmus für Shuttles in Bewegung vorgeschlagen.

### **Einschränkung 2: Das Shuttle muss sich in der Mitte des aktuellen Knotens befinden**

Der Routingalgorithmus des ursprünglichen Modells muss bei der Berechnung des Zeitfensters jedes Segments die Entfernung von einem bestimmten Knoten bis der aktuellen Standort des Shuttles berechnen. Dies wird anhand der Koordinaten dieser Knoten und der Länge in dieser Richtung bestimmt. Daher muss sich das Shuttle beim Routing in der Mitte des Knotens befinden.

Wenn eine Route für ein Shuttle in Bewegung geplant werden, befindet sich der Shuttle zum Zeitpunkt des Routings wahrscheinlich nicht in der Mitte eines bestimmten Knotens, wodurch die Berechnung der Entfernung ungenau wird. Das Folgende ist eine Methode, mit der die Position des Shuttles in Bewegung und die Entfernung zum anderen Knoten genau berechnet werden kann.

### **Einschränkung 3: Beim Routingalgorithmus im ursprünglichen Modell wird ein unendliches Zeitfenster am Zielknoten reserviert**

Beim Routingalgorithmus des Originalmodells wird ein unendliches Zeitfenster am Zielknoten festgelegt. Da ist während der Pfadplanung nicht bekannt, wie sich das Shuttle bewegt, nachdem es den Zielknoten erreicht hat, wird es nur angegeben, dass das Shuttle immer am Zielknoten hält. Wenn mehrere Shuttles die Aufträge zu demselben Zielknoten erhalten, kann daher nur der früheste Shuttle, der den Auftrag erhalten hat, die Route erfolgreich planen, und andere Shuttles können die Route nicht finden.

Dies zeigt auch, dass der Routingalgorithmus des ursprünglichen Modells kein anderes Shuttle erfordert, um den Zielknoten des Shuttles als Zielknoten zu verwenden. Es soll sichergestellt werden, dass es auf dem Zielknoten dieses Shuttles kein unendliches reserviertes Zeitfenster gibt.

### 3.4.3 Nachbearbeitungsmodul für das Routing

Im Nachbearbeitungsmodul werden die endgültige Route und das entsprechende Zeitfenster basierend auf dem Ergebnis des Routingmoduls durch das rückwärts Verfahren erhalten. Die spezifische Implementierungsmethode befindet sich in der Methode „Route\_erstellen“, die hier nicht im Detail beschrieben wird. Die Methode „Route\_Aufbereiten“ bestimmt den Knoten, an dem die Bewegungsrichtung des Shuttles geändert werden muss.

Das Ergebnis wird schließlich in der Tabelle „Knoten\_Route“ gespeichert. Wie unten gezeigt:

| Start  |             |       |         |          |             |         |         |               |            |        |      |         |       |        |         |       |         |         |        |
|--------|-------------|-------|---------|----------|-------------|---------|---------|---------------|------------|--------|------|---------|-------|--------|---------|-------|---------|---------|--------|
|        | boole; bool | integ | time    | time     | time        | time    | time    | time          | time       | time   | time | integer | strin | boole; | string  | table | integer | integer | real   |
| string | Start       | Ziel  | Z...    | resv_... | Eintritt... | Ankunft | Abfahrt | Austritt_Ende | resv_ZF... | g      | f    | Stage   | A...  | Ric... | Fahr... | Se... | Weg...  | Se...   | Dis... |
| 1      | true        | 44    | 0.0000  |          | 0.0000      | 0.0000  | 1.9800  | 1.9900        | 0.0...     | 13.... | 1    | Y       |       | vor    |         |       | 1       | 1.30    |        |
| 2      |             | 45    | 0.0000  | 0.3200   | 2.3000      | 4.5900  | 5.9400  | 5.9500        | 2.3...     | 18.... | 1    | Y       | true  | vor    |         |       | 4       | 3.60    |        |
| 3      |             | 46    | 4.5900  | 4.9100   |             |         | 6.8400  | 6.8500        |            |        | 1    | X       |       | vor    |         |       |         |         |        |
| 4      |             | 47    | 4.5900  | 6.0400   |             |         | 7.7400  | 7.7500        |            |        | 1    | X       |       | vor    |         |       |         |         |        |
| 5      |             | 48    | 5.9900  | 6.9400   |             |         | 8.8700  | 8.8800        |            |        | 1    | X       |       | vor    |         |       |         |         |        |
| 6      |             | 49    | 6.8900  | 7.8400   | 9.1900      | 13.4600 | 15.4400 | 15.4500       | 9.1...     | 19.... | 1    | X       | true  | rueck  |         |       | 1       | 1.30    |        |
| 7      |             | 50    | 13.4600 | 13.7800  | 15.7600     | 15.7600 | 17.7400 | 17.7500       | 15....     | 21.... | 1    | Y       |       | rueck  |         |       | 1       | 1.30    |        |
| 8      |             | 51    | 15.7600 | 16.0800  | 18.0600     | 20.0600 | 21.6400 | 21.6500       | 18....     | 21.... | 1    | Y       | true  | vor    |         |       | 1       | 0.90    |        |
| 9      | true        | 52    | 20.0600 | 20.3800  | 21.9600     | -1.0000 | -1.0000 | -1.0000       | 21....     | 21.... | 2    | X       |       |        |         |       |         |         |        |
| 10     |             |       |         |          |             |         |         |               |            |        |      |         |       |        |         |       |         |         |        |
| 11     |             |       |         |          |             |         |         |               |            |        |      |         |       |        |         |       |         |         |        |

Abbildung 3-37: Struktur der Tabelle „Knoten\_Route“ im Routingmodul

Die Tabelle „Knoten\_Route“ wird am Ende des Routingmoduls an die Tabelle „Route“ im Shuttle übergeben, und dann bewegt sich das Shuttle gemäß den Daten in der Tabelle „Route“.

## 3.5 Bewegungsmodul

Das Bewegungsmodul befindet sich in diesem Modell im Modul „Ebene“. Wie unten gezeigt:



Abbildung 3-38: Relevante Methode und Tabelle im Bewegungsmodul im originalen Modell

Das Merkmal dieses Moduls ist sein einzigartiger Auslösemechanismus. Gemäß der oben in Abschnitt 3.2.3 erwähnten Sensoranordnung kann davon ausgegangen werden, dass die Hauptfunktionen des Bewegungsmoduls aus zwei Hauptteilen bestehen, nämlich Methodengruppe bei der Ankunft des Knotens und Methodengruppe beim Austritt des Knotens. Es gibt auch einige Hilfsmethoden, wie die Methode für das Bremsen des Shuttles, die von anderen Methoden gesteuert und zeitlich ausgelöst werden. Im Folgenden werden diese Bewegungsmethodengruppen im Detail analysiert.

### 3.5.1 Methodengruppe bei der Ankunft des Knotens

#### Methode „bei\_Ankunft\_Knoten“

Methode „bei\_Ankunft\_Knoten“ ist der wichtigste Teil der Bewegungsfunktion. Die Logik ist unten gezeigt:

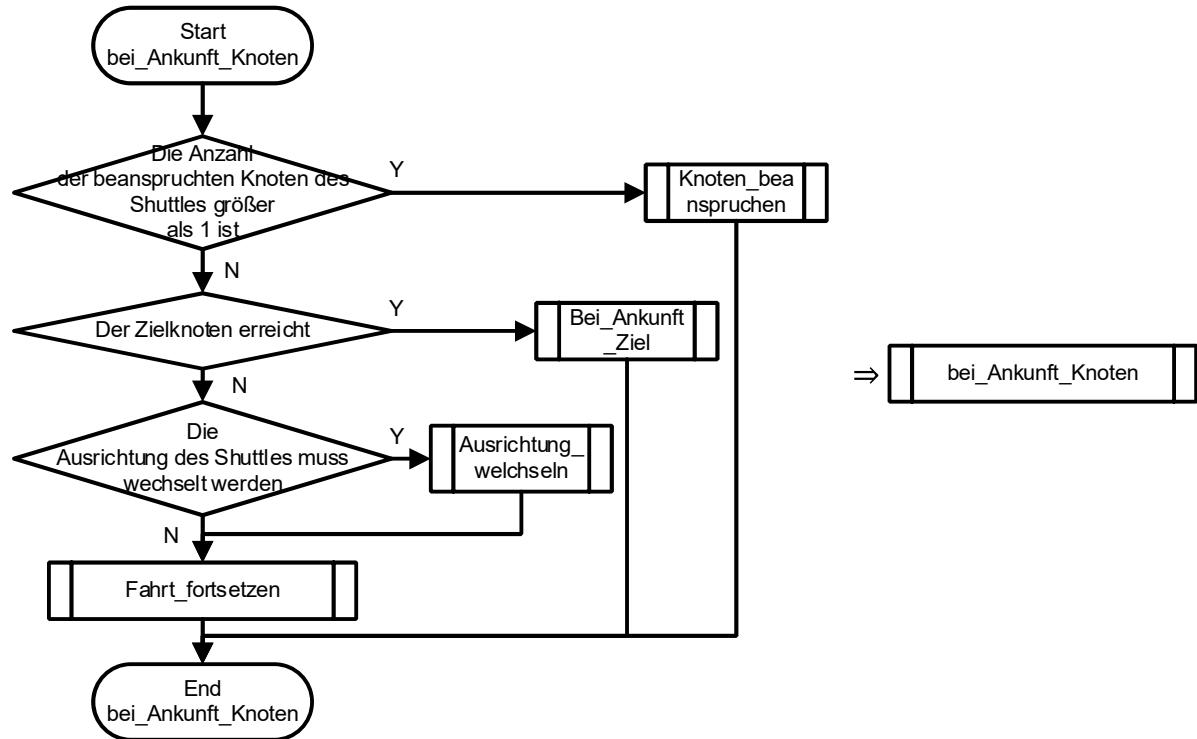


Abbildung 3-39: Flussdiagramm der Methode „bei\_Ankunft\_Knoten“

In dieser Methode wird festgelegt, ob das Shuttle den Zielpunkt erreicht, ob die Ausrichtung geändert werden muss und ob es sich weiter vorwärtsbewegen soll. Dies ist also auch der schwierigste Teil aller Bewegungsmethoden, aber ein tiefes Verständnis dieser Methodengruppe ist für die nachfolgende Programmierung unerlässlich.

Die erste Entscheidung war, ob Shuttle sich auf der Fahrt zum nächste Knoten befindet. Die Grundlage für die Beurteilung ist die Anzahl der vom Shuttle beanspruchten Knoten. Da die Größe des Shuttles der Größe von Knoten ähnlich ist, beansprucht Shuttle zu diesem Zeitpunkt zwei Knoten, wenn er sich weiterbewegt. Wenn das Shuttle zwei oder mehr Knoten beansprucht, muss das Shuttle den nächsten Knoten auf dem Pfad beanspruchen, der von Methode „Knoten\_beanspruchen“ ausgeführt wird.

### Bei Ankunft des Zielknotens

Wenn das Shuttle seinen Zielknoten erreicht, führt es je nach Typ des Zielknotens verschiedene Operationen aus, wie in der folgenden Abbildung dargestellt:

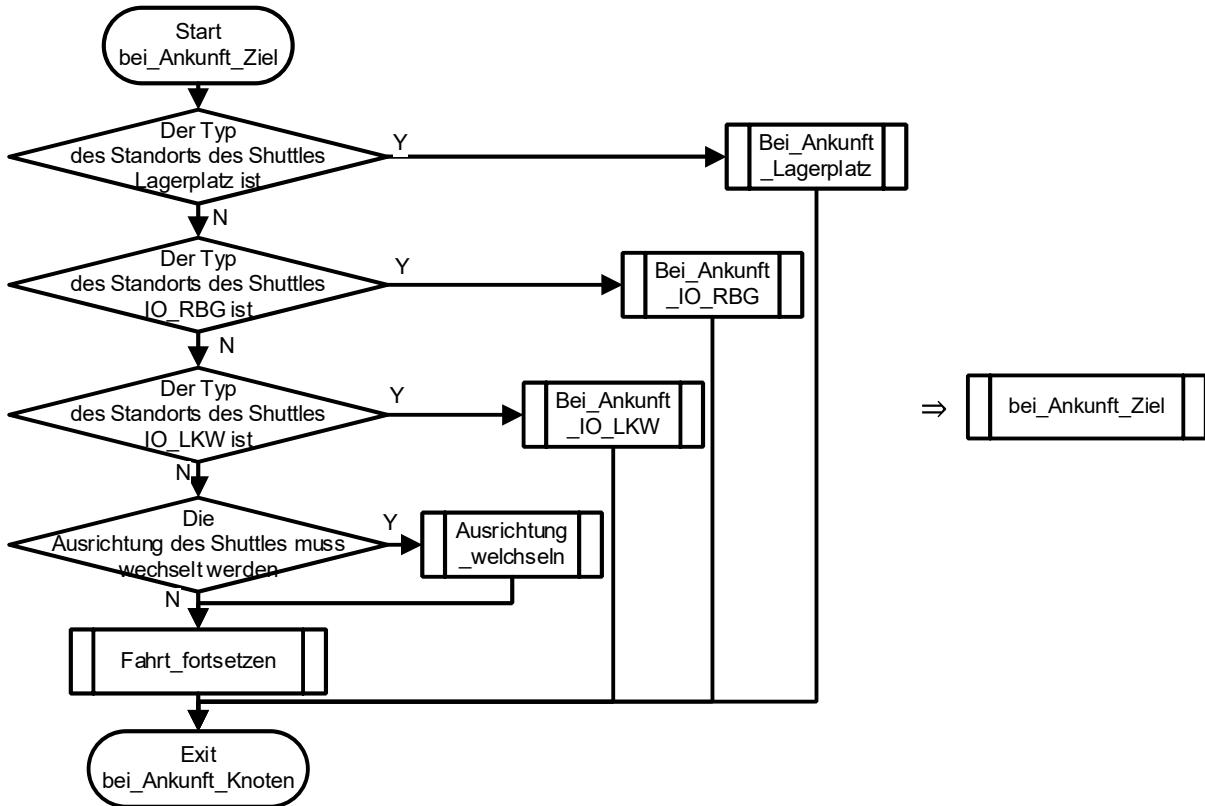


Abbildung 3-40: Flussdiagramm der Methode „bei\_Aankunft\_Ziel“

Je nachdem, ob der Standort ein IO-Knoten oder ein Lagerplatz ist, kann in zwei verschiedene Methoden unterteilt werden:

### 1. Methoden „bei\_Aankunft\_IO\_LKW“ und „bei\_Aankunft\_IO\_RBG“

Wenn das leere Shuttle den IO-Knoten erreicht, wird die Palette für das Shuttle geladen und dann zufällig einen Lagerplatz als Zielknoten des Shuttles auswählen. Shuttle liefert die erhaltene Palette an den ausgewählten Lagerplatz.

Wenn das beladene Shuttle den IO-Knoten erreicht, wird die Palette für das Shuttle entladen. Dann wird ein neuer Auftrag aus der Auftragsbibliothek für den Shuttle ausgewählt.

### 2. Methode „bei\_Aankunft\_Lagerplatz“

Wenn das leere Shuttle den Lagerplatz erreicht, wird die Palette auf den Speicherknoten für das Shuttle geladen. Dann wird gemäß dem Zielknoten der Palette an den entsprechenden IO-Knoten geliefert.

Wenn das beladene Shuttle den Lagerplatz erreicht, wird die gelieferte Palette auf den Lagerplatz gelegt. Dann wird ein neuer Auftrag aus der Auftragsbibliothek für den Shuttle ausgewählt.

### **Wechseln der Ausrichtung des Shuttles: Methode „Ausrichtung\_wechseln“**

Wenn keine der oben genannten Urteile zutrifft, wird sich das Shuttle gemäß seiner Route bewegen. Bevor das Shuttle weiter vorwärtsfährt, entscheidet es anhand der Informationen auf der Route, ob es abbiegen soll. Wenn ein Wechseln der Ausrichtung erforderlich ist, wird die Methode „Ausrichtung\_wechseln“ ausgeführt. Schließlich wird die Methode „Fahrt\_fortsetzen“ ausgeführt.

Weil sich das Shuttle in der Tecnomatix Plant Simulation nicht in zwei vertikale Richtungen bewegen kann. Um die Bewegung des Shuttles in x- und y-Richtung zu simulieren, ist es daher erforderlich, ein Shuttle mit den gleichen Eigenschaften auf dem Weg in die andere Richtung zu erzeugen, um die Bewegung in die andere Richtung zu realisieren.

In der Methode „Ausrichtung\_wechseln“ werden alle relevanten Parameter im Shuttle übergeben. Wenn neue Parameter in den Shuttle eingefügt werden, müssen diese Parameter auch durch diese Methode übergeben.

### **3.5.2 Methodengrupp bei dem Austritt des Knotens**

Die Methodengrupp bei dem Austritt des Knotens besteht hauptsächlich aus den folgenden drei Methoden.

#### **Methode „vor\_Austritt\_Knoten“**

Wie oben erwähnt, wird beim Verlassen des aktuellen Knotens die Methode „vor\_Austritt\_Knoten“ ausgelöst, um das Shuttle zum nächsten Knoten zu übertragen. Dies liegt daran, dass die Knoten in diesem Modell miteinander nicht verbunden sind. Wenn sich das Shuttle zum Rand des Wegs bewegt, da es keinen nachfolgenden Weg gibt, zwingt das Programm das Shuttle zum Anhalten. Um dies zu vermeiden, lassen sich das Shuttle zum nächsten Knoten fahren, wenn das Shuttle den Rand des Wegs erreicht.

### **Methode „nach\_Austritt\_Knoten“ und Methode „gebe\_verlassenen\_Knoten\_frei“**

Die Methode „nach\_Austritt\_Knoten“ wird von Weg ausgelöst, wenn das Shuttle den Knoten vollständig verlässt. Der Zweck besteht darin, das Zeitfenster auf dem vorherigen Knoten und der beanspruchten Knoten zu löschen. Dies zeigt, dass das Shuttle die Belegung des vorherigen Knotens vollständig aufgegeben hat und das wartende Shuttle dann den Knoten betreten kann.

Die Hauptfunktion der Methode „gebe\_verlassenen\_Knoten\_frei“ besteht darin, dass das Shuttle die Belegung des vollständig verlassenen Knotens aufgibt und das Recht aktiviert, das nächste wartende Shuttle zu verwenden.

#### **3.5.3 Methode für das Bremsen des Shuttles**

Wenn das Shuttle anfängt, sich entlang eines bestimmten Segment zu bewegt, werden die Aktivierungszeit der Methode „Shuttle\_verzoegern“ für Bremsen und der Parameter „Verzoegerzeitpunkt“ des Shuttles entsprechend der Länge des Segments eingestellt. Wenn die Methode „Shuttle\_verzoegern“ aktiviert ist, wird die aktuelle Simulationszeit mit dem Parameter „Verzoegerzeitpunkt“ im Shuttle verglichen. Wenn die beiden Werte gleich sind, wird die Zielgeschwindigkeit des Shuttles auf 0 gesetzt, so dass das Shuttle von diesem Moment an bis zum Anhalten langsamer wird.

Wenn das ursprüngliche Shuttle bei Aktivierung der Methode „Shuttle\_verzoegern“ verschwunden ist, z.B. wenn die ursprüngliche Route geändert wird, funktioniert die Methode „Shuttle\_verzoegern“ nicht.

## 4 Optimierung bei der Zuweisung des Auftrags

---

Bei dieser Methode wird beim Zuweisen einen neuen Auftrag für den Shuttle, die gerade einen Auftrag abgeschlossen hat, eine geeignetere Aufgabe aus der Aufträge-Tabelle ausgewählt. In dieser Arbeit gibt es drei Hauptkriterien für die Auswahl von Aufträgen:

- Zeit-Kriterium: den Zeitstempel, die Aufgabe erstellt wurde,
- Abstand-Kriterium: den Abstand zwischen dem Startknoten des Auftrags und der aktuelle Standort des Shuttles
- Sequenz-Kriterium: sowie die Sequenz der Aufträge.

Diese drei Kriterien haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Wahrscheinlichkeit für die Auswahl von Aufträgen. Im Folgenden werden diese Kriterien kombiniert und die Gewichte dieser drei Parameter geändert, um zu analysieren, welche Kombination unter dem aktuellen Modell die maximale Anzahl von Auslagerung und Einlagerung erzielen kann.

### 4.1 Auswahlkriterien der Aufträge

#### 4.1.1 Abstand -Kriterium: den Abstand zwischen dem Startknoten des Auftrags und der aktuelle Standort des Shuttles

Wenn in diesem Modell jeder Shuttle einer neuen Aufgabe zugewiesen sind, wird die Route vom aktuellen Standort des Shuttles zum Startort des Auftrags automatisch geplant, sodass sich das Shuttle weiterbewegt. Nachdem das Shuttle die Palette am Startpunkt der Aufgabe geladen oder entladen hat, wird die Route vom Startort zum Zielort des Auftrags geplant. Da der Abstand zwischen dem Startort und dem Zielort für jeden Auftrag festgelegt wird, kann nur den Auftrag gefunden werden, deren Startort dem aktuellen Standort des Shuttles am nächsten liegt.

Der Abstand zwischen dem Startort des Auftrags und dem aktuellen Standort des Shuttles kann durch viele verschiedene Methode ausgedrückt werden:

- 1) Lineare Abstand basierend auf dem aktuellen Standort des Shuttles und dem Startort des Auftrags;

$$\begin{cases} \Delta X = \text{Shuttle.standort.X} - \text{Auftrag.Startort.X} \\ \Delta Y = \text{Shuttle.standort.Y} - \text{Auftrag.Startort.Y} \end{cases} \quad (4-1)$$

$$Wert = \text{Lineare Entfernung} = \sqrt{(\Delta X L_X)^2 + (\Delta Y L_Y)^2} \quad (4-2)$$

- 2) Rechteckige / Manhattan Abstand basierend auf dem aktuellen Standort des Shuttles und dem Startort des Auftrags;

$$Wert = \text{Manhattan Entfernung} = |\Delta X| L_X + |\Delta Y| L_Y \quad (4-3)$$

- 3) die Zeit, die benötigt wird, um die Startort der Auftrag so schnell wie möglich zu erreichen, entsprechend der aktuellen Standort des Shuttles und dem Startort der Auftrag, dem aktuellen Layout sowie den Bewegungseigenschaften des Shuttles ohne Berücksichtigung der Einfluss anderer Shuttles;

$$Wert = \text{MinmaleFahrtzeit}[\text{Shuttle.standort}, \text{Auftrag.Startort}] \quad (4-4)$$

- 4) die Zeit, die benötigt wird, um die Startort der Auftrag so schnell wie möglich zu erreichen, entsprechend der aktuellen Standort des Shuttles und dem Startort der Auftrag, dem aktuellen Layout sowie den Bewegungseigenschaften des Shuttles unter Berücksichtigung der Einfluss anderer Shuttles;

*Routing(Shuttle.standort, Auftrag.Startort) → Route: Tabelle*

$$Wert = \text{Route}["\text{Ankunftzeit}", \text{Route.ydim}] \quad (4-5)$$

Die rechnerische Komplexität von Option 1) – 3) ist ähnlich. Im Vergleich zu Option 1) werden Option 2) und 3) nicht nur der Abstand zwischen zwei Knoten ausgedrückt, sondern auch die tatsächliche Pfadlänge basiert auf dem Layout, sodass die tatsächliche Bewegungsentfernung zwischen zwei Knoten besser wiedergegeben werden kann. Im Vergleich zu Option 2) berücksichtigt Option 3) auch den Zeitverbrauch, der durch die Richtungsänderung verursacht wird, sodass Option 3) genauer ist. In dieser Arbeit wird die Option 3) als Vertreter dieser Methodenreihe übernommen.

Obwohl Option 4) bei der Berechnung der Fahrtzeit vom aktuellen Standort des Shuttles zum Startort jeder Auftrag auch die Bewegung anderer Shuttles berücksichtigt wird, muss die Routing-Methode jedes Mal durchgeführt werden. Die Anzahl der Durchführung von Routing-Methode hängt linear von der Größe der Auftrag-Tabelle ab. Da die

Routing-Methode ein relativ kompliziertes Programm ist, verbrauchen mehrere Ausführungen mehr Rechenressourcen, sodass die Suchgeschwindigkeit dieser Option langsamer ist. Da andere aktuelle Shuttles berücksichtigt werden, ist der Startort der ausgewählte Auftrag nicht unbedingt physisch dem aktuellen Standort am nächsten.

Die Merkmale der oben genannten Optionen können in die folgenden Tabellen unterteilt werden:

*Tabelle 4-1: Vier Darstellungsoptionen des Abstands*

|                                                    | Option 1 | Option 2 | Option 3 | Option 4  |
|----------------------------------------------------|----------|----------|----------|-----------|
| rechnerische Komplexität                           | Niedrig  | Niedrig  | Niedrig  | Sehr hoch |
| Berücksichtigung der Layout                        | ✗        | ✓        | ✓        | ✓         |
| Berücksichtigung der Zeit für<br>Richtungsänderung | ✗        | ✗        | ✓        | ✓         |
| Berücksichtigung anderer<br>Shuttles               | ✗        | ✗        | ✗        | ✓         |
| Genauigkeit                                        | Niedrig  | Mittel   | Hoch     | Sehr hoch |

Das Abstand-Kriterium führt dazu, dass einige Aufträge, die ursprünglich später erstellt wurden, eine höhere Priorität haben, was zu einigen schlechten Situationen führt. Beispielsweise wurde ein früh erstellter Auftrag nicht ausgeführt, da ihr Startort relativ weit entfernt ist. Einerseits erfüllt dies nicht die First-In-First-Out-Anforderungen, und andererseits kann es andere Probleme verursachen, z. B. ein globaler Deadlock aufgrund des Sequenzfehlers. Es wird daher empfohlen, Das Abstand-Kriterium in Kombination mit anderen Kriterien zu verwenden, um solche Probleme zu vermeiden.

#### 4.1.2 Sequenz-Kriterium: die Sequenz der Aufträge

Das Ziel der Einführung der Sequenz vom Auftrag als Bewertungskriterium besteht darin, das Problem beim Transport zum LKW-Knoten zu lösen, dass die Palette in der richtigen Sequenz ankommen muss. Als das Shuttle anhand des Abstand-Kriteriums einen Auftrag zur Lieferung von Palette an der LKW-Knoten zugewiesen wurde, wusste das Shuttle zu diesem Zeitpunkt nicht, ob die empfangene Auftrag die richtige Sequenz hatte. Wenn der Startort des Auftrags mit der richtigen Sequenz genau an einem entfernten Knoten liegt, übernehmen möglicherweise alle Shuttles diesen Auftrag nicht, sondern den Auftrag mit der falschen Sequenz.

Wenn das Shuttle jedoch einen Auftrag mit der falschen Sequenz hat, plant der Shuttle nach der Ankunft des Startorts des Auftrags keine Route zur Zielort, sondern muss auf dem Auftrag mit der richtigen Sequenz warten. Erst nachdem der Auftrag mit richtige

Sequenz abgeschlossen hatte, plant der Shuttle die Route und bewegt sich. Da kein Shuttle den Auftrag mit der richtigen Sequenz hat, werden alle an das LKW-Knoten gesendeten Shuttles am Startort des Auftrags angehalten, was zu einem globalen Deadlock führt.

Um das Problem des globalen Deadlocks zu vermeiden, ist es notwendig, Aufträge mit falscher Sequenz eine geringe Bevorzugung zu geben, damit diese Aufträge bei der Auswahl so weit wie möglich für das Shuttle ausgewählt werden. Dies kann auf zwei Methoden erreicht werden:

- 1) Ignorieren die Aufträge mit der falschen Sequenz bei der Auswahl.

Wenn die Anzahl der Aufträge in der Auftrag-Tabelle ausreichend ist, diese Methode kann die Zeit für den Beurteilungsprozess der Aufträge effektiv reduzieren; wenn jedoch die Aufträge nicht ausreichen, befindet sich das Shuttle in einem Ruhezustand, da er nicht weiß, dass noch Aufträge zu erledigen sind, was die Effizienz des gesamten Systems verringert. Das Ignorieren dieser Aufträge mit falschen Sequenz bedeutet auch, dass die Priorität dieser Aufträge bei Auswahl am niedrigsten ist, was die Wahrscheinlichkeit der Auswahl dieser Aufträge erheblich verringert und die Anzahl der abgeschlossenen Aufträge mit der Anforderung der Sequenz verringert, wenn die Aufträge, die nicht von der Sequenz abhängig sind, ebenfalls in der Auftragstabelle sind.

$$Wert[i] = \begin{cases} Wert[i] & , \text{wenn } Auftrag[i].\text{Sequenz.}false \\ Wert[i] & , \text{wenn } Auftrag[i].\text{Sequenz.}true \\ Auftrag[i].\text{entfernen} & \text{und } Auftrag[i].\text{Sequenz.}richtig \\ & , \text{wenn } Auftrag[i].\text{Sequenz.}true \\ & \text{und } Auftrag[i].\text{Sequenz.}falsch \end{cases} \quad (4-6)$$

- 2) Diese Aufträge mit der falschen Sequenz werden bei der Auswahl nicht ignoriert.

Stattdessen wird ein zusätzlicher virtueller Abstand oder eine zusätzliche virtuelle Zeit bei der Auswertung dieser Aufträge hinzugefügt, wodurch die Möglichkeit der Auswahl dieser Aufträge verringert wird. Im Vergleich zur Methode 1 entspricht diese Methode eher den tatsächlichen Anforderungen.

$$Wert[i] = \begin{cases} Wert[i] & , \text{wenn } Auftrag[i].\text{Sequenz.}false \\ Wert[i] + \Delta t[i] & , \text{wenn } Auftrag[i].\text{Sequenz.}true \end{cases} \quad (4-7)$$

Basierend auf dem Abstand-Kriterium wird in dieser Arbeit zusätzlich der virtuelle Abstand oder die virtuelle Zeit aufgrund der falschen Sequenz für die Aufträge mit der

Anforderung der Sequenz hinzugefügt, sodass die „Werte“ von den Aufträgen mit der falschen Sequenz relativ größer sind, um zu vermeiden, dass diese Aufträge zu früh ausgewählt werden.

In dieser Arbeit werden zwei Methoden zur Bestimmung der zusätzlicher virtueller Zeit gegeben:

- 1) Virtuelle Zeit durch „Big M“-Prinzip

$$\Delta t[i] = (Auftrag[i].Sequenz - benötigeSequenz(Auftrag[i].Zielort)) \times Simulation.Ende \quad (4-8)$$

- 2) Virtuelle Zeit durch Durchschnitt-Prinzip

$$Ausführungsintervall[i] = \frac{Simulation.Zeit}{benötigeSequenz(Auftrag[i].Zielort) - 1} \quad (4-9)$$

$$\Delta t[i] = (Auftrag[i].Sequenz - benötigeSequenz(Auftrag[i].Zielort)) \times Ausführungsintervall[i] \quad (4-10)$$

Es ist zu beachten, dass die benötigte Sequenz und die erforderliche Sequenz für den LKW-Knoten unterschiedlich sein können. Die erforderliche Sequenz wird am LKW-Knoten berechnet und spiegelt die Sequenz der Aufträge wider, die vom aktuellen LKW-Knoten benötigt werden. Für die Bestimmung der benötigten Sequenz werden in dieser Arbeit zwei Berechnungsmethoden verwendet:

- 1) benötigte Sequenz = erforderliche Sequenz für den LKW-Knoten

Dies führt dazu, dass bei jeder Auftragsauswahl im Allgemeinen nur der Auftrag mit derselben Sequenz wie der erforderliche Sequenz für den LKW-Knoten ausgewählt werden können. Erst wenn der Auftrag mit der richtigen Sequenz abgeschlossen ist, kann der Auftrag mit der nächsten richtigen Sequenz ausgewählt. Wenn die Bestellung mit der richtigen Bestellung von anderer Shuttle abgeholt, aber noch nicht abgeschlossen wird, werden andere Aufträge, deren Zielort dies LKW-Knoten ist, bei der Auswahl der Aufträge fast ignoriert.

$$benötigeSequenz(Auftrag[i].Zielort) = Auftrag[i].Zielort.Sequenz \quad (4-11)$$

- 2) benötigte Sequenz = erforderliche Sequenz für den LKW-Knoten + Anzahl der vergebenen aber nicht abgeschlossenen Aufträge

Diese Methode berücksichtigt, dass es unter den Aufträgen, die von anderen Shuttles abgeholt aber noch nicht abgeschlossen sind, möglicherweise Auftrag mit derselben Sequenz wie der LKW-Zielknoten des jeweiligen Auftrags gibt. Daher müssen Sie die Auswahlmöglichkeit dieser Aufträge beim Zuweisen nicht verringern, auch wenn die Sequenz dieser Aufträge von der benötigte Sequenz abweicht. Diese Aufträge werden genauso wahrscheinlich ausgewählt wie andere reguläre Aufträge.

$$\begin{aligned}
 & \text{benötigteSequenz}(\text{Auftrag}[i].\text{Zielort}) \\
 & = \text{Auftrag}[i].\text{Zielort.Sequenz} \\
 & + \text{vergebeneAufträge}(\text{Auftrag}[i].\text{Zielort}).\text{Anzahl}
 \end{aligned} \tag{4-12}$$

Im Vergleich zu Methode 1) erhöht Methode 2) die Wahrscheinlichkeit, dass Aufträge mit falschen Sequenz gemäß den Ergebnissen früherer Systemoperationen ausgewählt werden. Außerdem verringert mit der Anwendung der Methode 2) den Bevorzugungsunterschied zwischen Aufträgen mit und ohne die Anforderung von Sequenz und erhöht dadurch die Anzahl der abgeschlossenen Aufträge mit Sequenz-Anforderung. Dies bringt die Anzahl der beiden abgeschlossenen Aufträge näher.

Die oben genannte Methode können in die folgenden Tabellen unterteilt werden:

Tabelle 4-2: Fünf Schätzung-Optionen der zusätzlicher Zeit

|                                                         | Option 1 | Option 2 | Option 3 | Option 4 | Option 5 |
|---------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Ignorieren alle Aufträge mit falscher Sequenz           | √        | ✗        | ✗        | ✗        | ✗        |
| Große M-Methode                                         | -        | √        | -        | √        | -        |
| Berücksichtigen durchschnittliches Ausführungsintervall | -        | -        | √        | -        | √        |
| Berücksichtigen vergebene Aufträge                      | -        | ✗        | ✗        | √        | √        |

Durch die Einführung des Sequenz-Kriteriums in das Abstand-Kriterium kann für die individuelle Optimierung beim Auftragsauswahl der durch die Sequenz verursachte globale Deadlock effektiv vermieden werden.

Jedoch tritt ein Problem bei Verwendung der Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles häufig auf. Obwohl der Wert des Auftrags mit der richtigen Sequenz

niedriger als der der anderen Aufträge ist, wird für jedes Shuttle dies Auftrag möglicherweise nicht derzeit zum leeren Shuttle, sondern zum andere Shuttle zugewiesen. Wenn anderes Shuttle ein neuer Auftrag braucht, wählen sie möglicherweise nicht den Auftrag mit der Anforderung von Sequenz aufgrund der Aktualisierung der Auftragsbibliothek aus. Dies führt dazu, dass der Auftrag mit der richtigen Sequenz nicht ausgewählt werden, was zu einer Verringerung der Anzahl abgeschlossener Aufträge mit der Anforderung der Sequenz. Als nächstes wird ein Zeitkriterium eingeführt, um dieses Problem zu lösen.

#### 4.1.3 Zeit-Kriterium: den Zeitstempel, die Aufgabe erstellt wurde

Das Ziel der Einführung des Zeitkriteriums besteht darin, einerseits die zuvor erstellten Aufträge zuerst auszuführen, um sogenannte FIFO-Kriterium möglich zu erfüllen, andererseits im Rahmen der „Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles“ die Möglichkeit des globalen Deadlocks zu verringern.

Dies ist ein relativ einfach zu implementierendes Kriterium. Bei der Berechnung wird nur einfach die Erstellungszeit eines Auftrags hinzugefügt. Es wird daher empfohlen, bei Verwendung jedes Kriteriums ein Zeit-Kriterium hinzuzufügen, damit die FIFO-Anforderungen der Auftragsabwicklung mit sehr geringem Anstieg des Rechenaufwands erfüllt werden können.

$$Wert[i] = Wert[i] + Auftrag[i].Zeitstempel \quad (4-13)$$

Beachten Sie, dass das Zeit-Kriterium das Problem des globalen Deadlocks aufgrund von Sequenzfehlern nicht logisch lösen kann.

Da es 4 Abstand-Kriterium, 5 Sequenz-Kriterien und 1 Zeit-Kriterium gibt, ist die Anzahl der Kombinationen aller Kriterien gleich

$$\begin{aligned} n &= (\text{Abstandkriterium. Anzahl} + 1) \times (\text{Sequenzkriterium. Anzahl} + 1) \\ &\quad \times (\text{Zeitkriterium. Anzahl} + 1) = (4 + 1) \times (5 + 1) \times (1 + 1) = 60 \end{aligned}$$

Wenn Sie mit all diesen Kombinationen experimentieren, ist die Anzahl der Experimente zu groß. Bestimmte Kombinationen können durch Analyse ausgeschlossen werden. Daher wählt jede der folgenden Verfahren nur einige Kombination aus.

## 4.2 Individuelle Optimierung

Individuelle Optimierung bedeutet, dass, wenn das Shuttle den aktuellen Auftrag abschließt und eine neue Auftrag benötigt, alle Aufträge in der Aufträge-Tabelle zu diesem Zeitpunkt gefiltert werden und die meisten geeignete Auftrag für dem Shuttle gemäß den oben beschriebenen Kriterien ausgewählt wird. Die Kombination der drei Kriterien ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 4-3: Kombination der drei Kriterien für Individuelle Optimierung

| Plan-Index | Abstand -Kriterium |          | Sequenz-Kriterium |          |          |          | Zeit-Kriterium |
|------------|--------------------|----------|-------------------|----------|----------|----------|----------------|
|            | Option 3           | Option 4 | Option 2          | Option 3 | Option 4 | Option 5 |                |
| 1          | X                  | X        | X                 | X        | X        | X        | ✓              |
| 2          | ✓                  | -        | X                 | X        | X        | X        | X              |
| 3          | ✓                  | -        | X                 | X        | X        | X        | ✓              |
| 4          | ✓                  | -        | ✓                 | -        | -        | -        | X              |
| 5          | ✓                  | -        | -                 | ✓        | -        | -        | X              |
| 6          | ✓                  | -        | -                 | -        | ✓        | -        | X              |
| 7          | ✓                  | -        | -                 | -        | -        | ✓        | X              |
| 8          | ✓                  | -        | ✓                 | -        | -        | -        | ✓              |
| 9          | ✓                  | -        | -                 | ✓        | -        | -        | ✓              |
| 10         | ✓                  | -        | -                 | -        | ✓        | -        | ✓              |
| 11         | ✓                  | -        | -                 | -        | -        | ✓        | ✓              |
| 12         | -                  | ✓        | X                 | X        | X        | X        | X              |
| 13         | -                  | ✓        | X                 | X        | X        | X        | ✓              |
| 14         | -                  | ✓        | ✓                 | -        | -        | -        | X              |
| 15         | -                  | ✓        | -                 | ✓        | -        | -        | X              |
| 16         | -                  | ✓        | -                 | -        | ✓        | -        | X              |
| 17         | -                  | ✓        | -                 | -        | -        | ✓        | X              |
| 18         | -                  | ✓        | ✓                 | -        | -        | -        | ✓              |
| 19         | -                  | ✓        | -                 | ✓        | -        | -        | ✓              |
| 20         | -                  | ✓        | -                 | -        | ✓        | -        | ✓              |
| 21         | -                  | ✓        | -                 | -        | -        | ✓        | ✓              |
| 22         | X                  | X        | ✓                 | -        | -        | -        | X              |
| 23         | X                  | X        | -                 | ✓        | -        | -        | X              |
| 24         | X                  | X        | -                 | -        | ✓        | -        | X              |
| 25         | X                  | X        | -                 | -        | -        | ✓        | X              |
| 26         | X                  | X        | ✓                 | -        | -        | -        | ✓              |
| 27         | X                  | X        | -                 | ✓        | -        | -        | ✓              |
| 28         | X                  | X        | -                 | -        | ✓        | -        | ✓              |
| 29         | X                  | X        | -                 | -        | -        | ✓        | ✓              |

Da der Auftrag nur ausgewählt wird, wenn der Shuttle ein neuer Auftrag benötigt, muss nur der Code in der Methode „weise\_Auftrag\_zu“ geändert werden. Basierend auf der oben genannten Kombination der Kriterien wird das Flussdiagramm der Methode „weise\_Auftrag\_zu“ unten gezeigt.

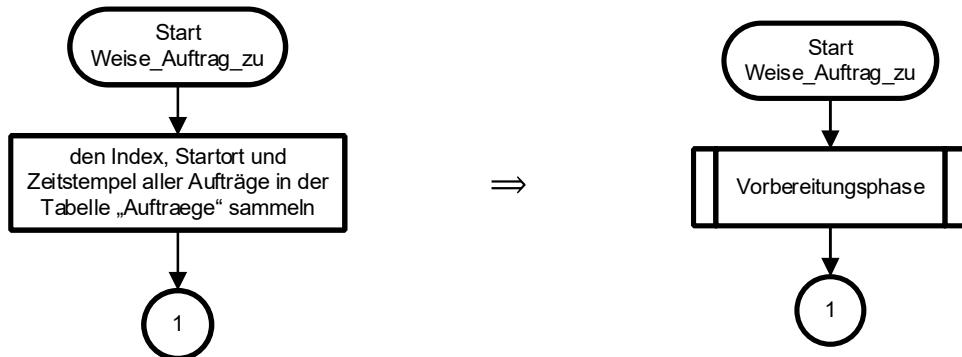


Abbildung 4-1: Flussdiagramm des Vorbereitungsphase bei Individuale Optimierung

In der Vorbereitungsphase werden alle nicht vergebene Aufträgen aus die Auftragsbibliothek durchgesucht. Die Informationen von Aufträge schließen hauptsächlich den Index, die Startort und den Zeitpunkt ein, zu dem der Auftrag erstellt wurde. Obwohl einige Informationen bei der Beurteilung durch einiger Kriterien nicht erforderlich sind, ist das Sammeln dieser Informationen nicht viel Berechnung erforderlich, sodass sie unter allen Optionen extrahiert werden.

| Modelle.OLPS.Modell.AuftragsModul.Auftraege_wählen |         |                 |          |                |               |      |         |
|----------------------------------------------------|---------|-----------------|----------|----------------|---------------|------|---------|
| 27                                                 | integer | real            | string   | string         | real          | real |         |
| string                                             | Index   | Zeitstempel_num | Startort | akt_ort        | Distanz       | Wert |         |
|                                                    | 1       | 27              | 3596.58  | Knoten_3_11_X  | Knoten_3_11_X | 0.00 | 3425.32 |
|                                                    | 2       | 5               | 3457.66  | Knoten_11_5_X  | Knoten_3_11_X | 0.00 | 3457.66 |
|                                                    | 3       | 6               | 3460.00  | Knoten_15_16_Y | Knoten_3_11_X | 0.00 | 3460.00 |
|                                                    | 4       | 7               | 3468.62  | Knoten_6_11_X  | Knoten_3_11_X | 0.00 | 3468.62 |
|                                                    | 5       | 8               | 3475.00  | Knoten_5_16_Y  | Knoten_3_11_X | 0.00 | 3475.00 |
|                                                    | 6       | 9               | 3490.00  | Knoten_13_16_Y | Knoten_3_11_X | 0.00 | 3490.00 |

Auftragsdaten aus Tabelle „Aufträge“ Zu berechnender Wert

Abbildung 4-2: Berechnungstabelle für Individuale Optimierung

Im Zeitstempelkriterium gibt es zwei Fälle, je nachdem, ob die Zeitstempel für die Auftragserstellung erforderlich ist (siehe unten):

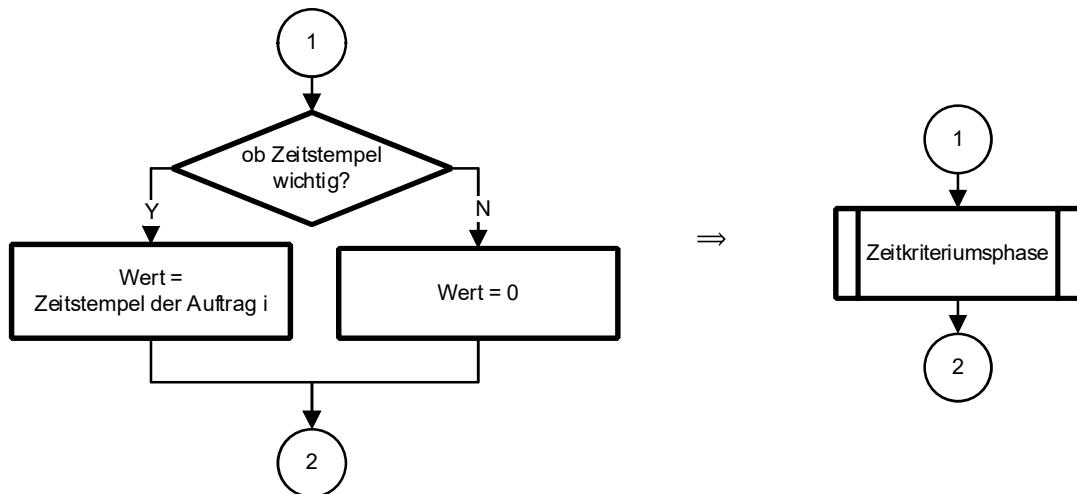


Abbildung 4-3: Flussdiagramm des Phase für Zeit-Kriterium bei Individuale Optimierung

Unter dem Abstand-Kriterium kann bei Verwendung der „Minimaler Fahrzeit“ die vorberechnete Länge der Route ermittelt werden, d.h. die Länge kann einfach in der Tabelle anhand der aktuellen Standort des Shuttles und der Startort des Auftrags nachgeschlagen werden.

| Modelle.OLPS.Modell.LayoutModul.Minimale_Fahrzeit |               |              |              |              |              |               |               |          |
|---------------------------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|----------|
|                                                   | string 0      | time 231     | time 232     | time 233     | time 234     | time 235      | time 236      | time 237 |
| 318                                               | Knoten_8_7_Y  | Knoten_8_8_X | Knoten_8_8_Y | Knoten_8_9_X | Knoten_8_9_Y | Knoten_8_10_X | Knoten_8_10_Y |          |
| 319                                               | Knoten_11_4_Y | 16.6000      | 16.9000      | 18.9000      | 19.2000      | 21.2000       | 21.5000       | 23.5000  |
| 320                                               | Knoten_11_5_X | 12.3000      | 16.6000      | 14.6000      | 18.9000      | 16.9000       | 21.2000       | 19.2000  |
| 321                                               | Knoten_11_5_Y | 14.3000      | 14.6000      | 16.6000      | 16.9000      | 18.9000       | 19.2000       | 21.2000  |
| 322                                               | Knoten_11_6_X | 10.0000      | 14.3000      | 12.3000      | 16.6000      | 14.6000       | 18.9000       | 16.9000  |
| 322                                               | Knoten_11_6_Y | 12.0000      | 12.3000      | 14.3000      | 14.6000      | 16.6000       | 16.9000       | 18.9000  |
| 323                                               | Knoten_11_7_X | 7.7000       | 12.0000      | 10.0000      | 14.3000      | 12.3000       | 16.6000       | 14.6000  |
| 324                                               | Knoten_11_7_Y | 9.7000       | 10.0000      | 12.0000      | 12.3000      | 14.3000       | 14.6000       | 16.6000  |
| 325                                               | Knoten_11_8_X | 10.0000      | 5.7000       | 7.7000       | 12.0000      | 10.0000       | 14.3000       | 12.3000  |

Abbildung 4-4: Die minimale Fahrzeit nach der Position und Ausrichtung des Knoten aus der Tabelle „Minimale\_Fahrzeit“

Wenn Sie jedoch eine auf Routing-basierte Kriterium verwenden, können die im ursprünglichen Modell definierte Funktion „Multi-Agent-Routing“ nicht verwendet werden, da diese Funktion ein Zeitfenster für die generierte Route reserviert und die dem Shuttle zuweist. Dies ist während der Zuweisung von Aufträgen nicht erforderlich und führt zu dem Fehler bei dem Routing, wenn die Funktion „Multi-Agent-Routing“ mehrmals durchgeführt wird. Das spezifische Flussdiagramm des Abstand-Kriteriums ist wie unten gezeigt

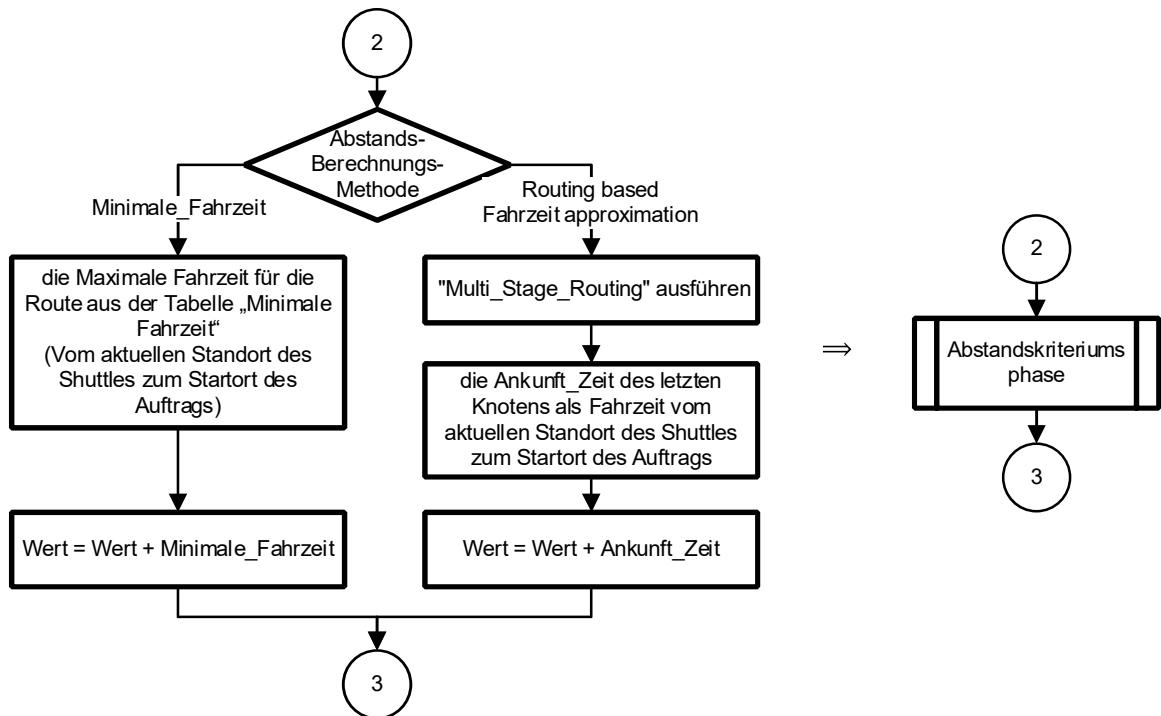


Abbildung 4-5: Flussdiagramm des Phase für Abstand-kriterium bei Individuale Optimierung

Aus obergenannten Grund wird hier eine neue Funktion „Multi\_Stage\_Routing\_Test“ erstellt, die dem ursprünglichen Funktion „Multi-Agent-Routing“ ähnelt, und den Code für das reservierte Zeitfenster und die Route zum Shuttle gelöscht. Die erstellte Route wird in der Tabelle „Knoten\_Route“ gespeichert. Die Ankunftszeit des Zielknotens ist als den „Abstand“ vom Startort zum Zielort Route definiert. Die Logik der Funktion „Multi\_Stage\_Routing\_Test“ kann sich auf den folgenden Algorithmus beziehen:

---

#### Algorithmus für die Funktion „Multi\_Stage\_Routing\_Test“

---

- |   |                                                                                                         |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <b>Input:</b> Shuttle, Startzeit, Ziel                                                                  |
| 1 | Startknoten, Zielknoten und Ladenzustand des Shuttles sowie Startzeit aufzeichnen:<br><i>init_Infos</i> |
| 2 | Routing-relevante Tabelle initialisieren: <i>init_Routing</i>                                           |
| 3 | <i>Routing</i>                                                                                          |
| 4 | Wenn Routing nicht erfolgreich ist                                                                      |
| 5 | └ 2 x Simulationsendzeit zurückgeben                                                                    |
| 6 | Daten in der Tabelle „Knoten_Route“ berechnen: <i>Route_erdstellen</i>                                  |
| 7 | Die Ankunftszeit des letzten Knoten in der Tabelle „Knoten_Route“ zurückgeben                           |
- 

Abbildung 4-6: Algorithmus für die Funktion „Multi\_Stage\_Routing\_Test“

Im Modul von Sequenz-Kriterium werden zunächst der Koeffizient der virtuellen Zeit für Aufträge mit der falschen Sequenz nach dem „Big M“- oder dem Durchschnittsprinzip berechnet. Dann werden die Berechnungsmethoden in zwei Kategorien je nachdem, ob die zuvor zugewiesenen Aufträge berücksichtigt werden sollen, unterteilt. Es gibt also fünf Optionen beim Sequenz-Kriterium.

Die benötigte Sequenz kann aus der Tabelle „IO\_LKW“ gelesen werden, da nur der Knoten „IO\_LKW“ die Anforderung der Sequenz in diesem Modell hat. Die Sequenz wird bei der Erstellung des Auftrags generiert, und kann aus der Tabelle "Auftraege" gelesen werden.

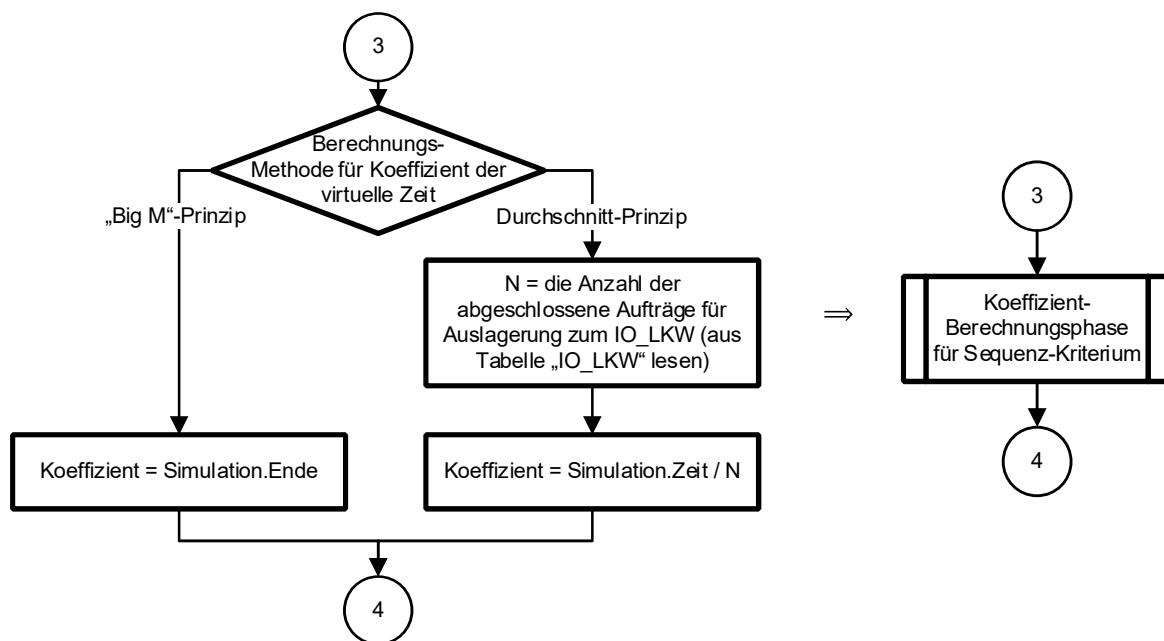


Abbildung 4-7: Flussdiagramm des Phase für Koeffizient-Berechnungsphase für Sequenz-Kriterium bei Individuale Optimierung

Wenn die zugewiesenen Aufträge berücksichtigt werden, müssen die Berechnungs-Sequenz von nicht vergebene Aufträge anpassen. Da alle vorherigen Aufträge, die an den IO-Knoten gesendet werden, vorübergehend in den ersten vielen Zeilen der Tabelle „Auftraege“ gespeichert werden, müssen den zugewiesenen Aufträgen mit demselben Zielort „IO\_LKW“ und mit geringere Sequenz als die Sequenz des aktuell untersuchten Auftrags in der Tabelle „Auftraege“ finden. Für jeden zugewiesenen Auftrag, die die obigen Anforderungen erfüllt, wird die Berechnungs-Sequenz der aktuell untersuchte Auftrag um eins verringert.

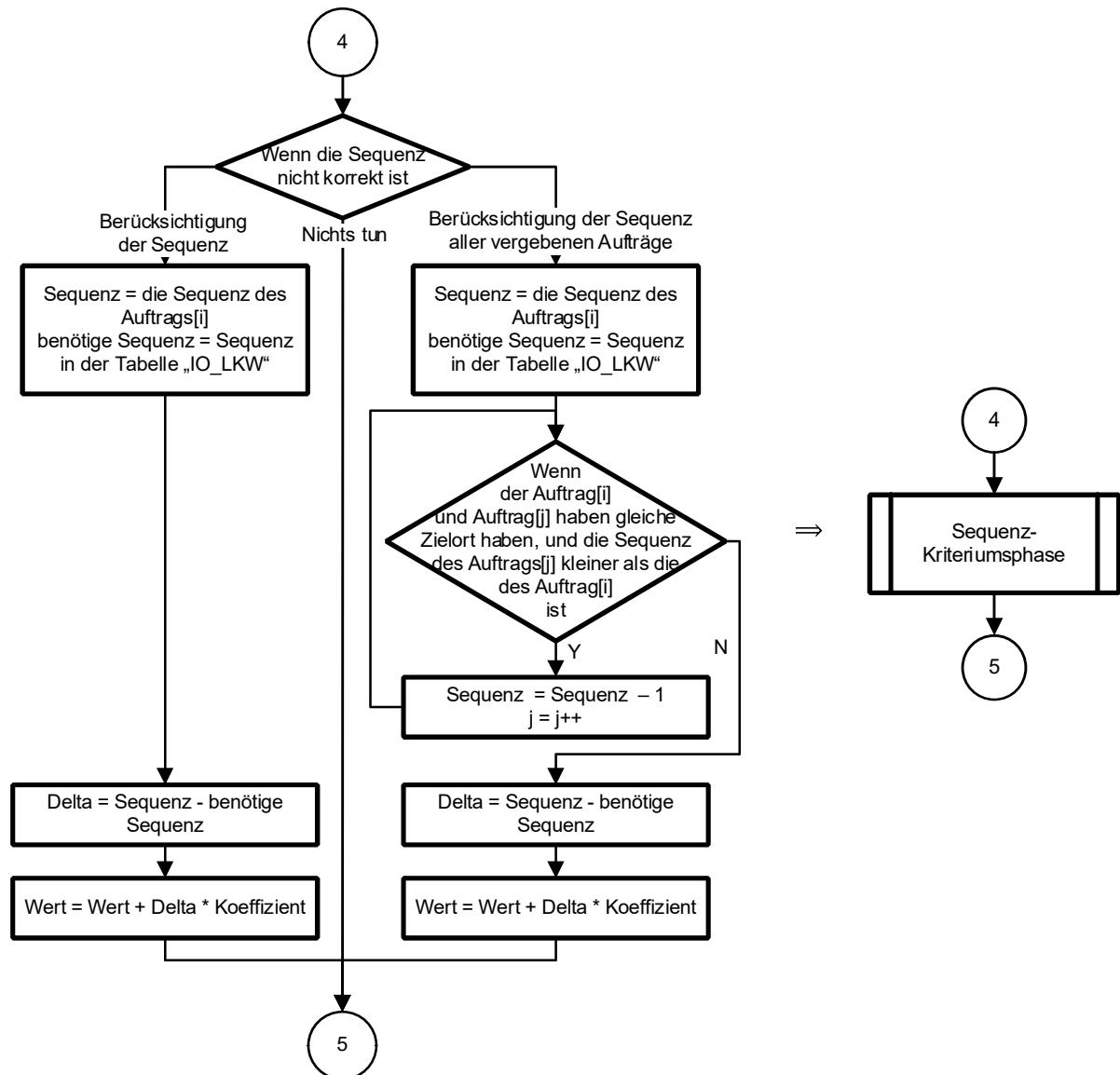


Abbildung 4-8: Flussdiagramm des Phase für Sequenz-Kriterium bei Individuale Optimierung

Während der Nachbearbeitungsphase wird zuerst der Auftrag mit dem geringsten Wert ausgewählt, und der ausgewählte Auftrag wird in die erste Zeile der nicht zugewiesenen Aufträge in der Auftragsbibliothek verschoben. Der Zweck besteht darin, die anschließende die Komplexität der Suche von nicht zugewiesenen Aufträgen zu verringern, und der Neu hinzugefügter Code relativ konsistent mit der ursprünglichen Methode sein kann.

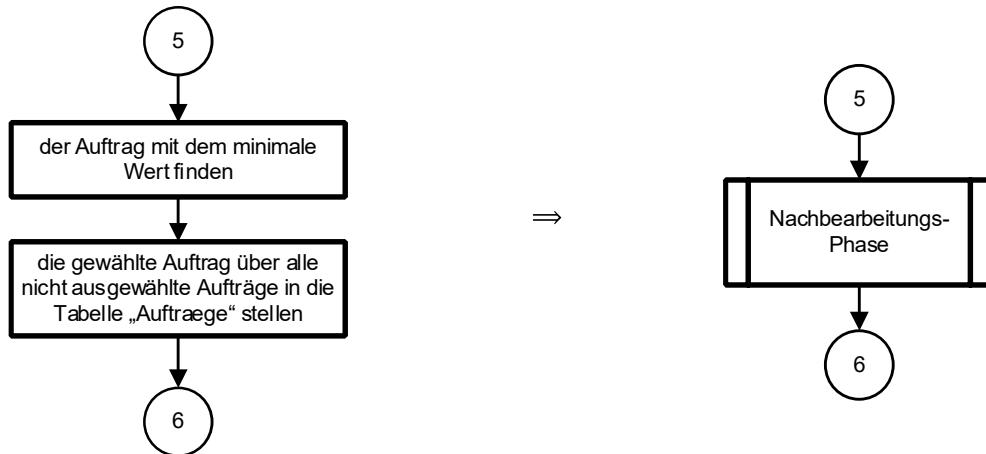


Abbildung 4-9: Flussdiagramm des Nachbearbeitungsphase bei Individuale Optimierung

Das Gesamtflussdiagramm der Methode "weis\_Auftrag\_zu" bei Individuale Optimierung ist wie unten dargestellt.

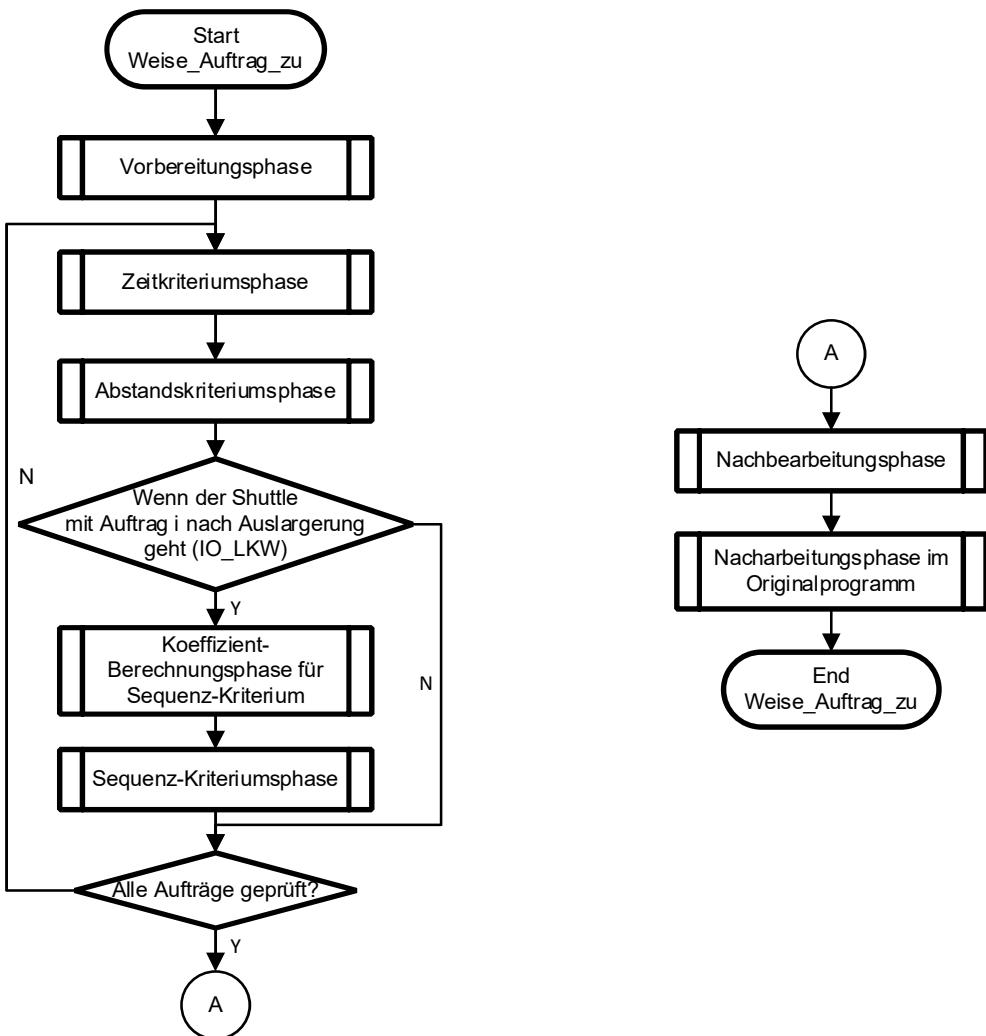


Abbildung 4-10: Gesamtflussdiagramm der Methode "weis\_Auftrag\_zu" bei Individuale Optimierung

Die Ergebnisse verschiedener Kombinationen der oben genannten Kriterien werden in Kapitel 6 vorgestellt.

## 4.3 Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

### 4.3.1 Heuristische Methode zur Suche der besten Kombination

Zunächst wird vorgestellt, wie die am besten geeignete Kombination aus einer Reihe von Startknoten und Zielknoten ausgewählt wird, damit die für alle Routen erforderliche Gesamtzeit am geringsten ist. Im Allgemeinen können Aufzählungsmethoden, lineare Programmiermethoden usw. verwendet werden, aber diese Methoden erfordern eine lange Zeit und einen großen Rechenaufwand. In dieser Arbeit wird ein heuristischer Algorithmus eingeführt, mit dem in kürzester Zeit mit weniger Rechenaufwand relative optimale Ergebnisse erzielt werden sollen [Sho-1970].

Zuerst muss eine Berechnungstabelle erstellen werden. Die Zeilenkoordinaten der Tabelle sind die Startknoten, und die Spaltenkoordinaten der Tabelle sind die Zielknoten.

*Tabelle 4-4: Berechnungstabelle für Suche der optimalen Kombination bei der Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles*

| Startort \ Zielort | Zielort 1     | Zielort 2     | ... | Zielort m-1     | Zielort m     | $\Delta x(i)$   |
|--------------------|---------------|---------------|-----|-----------------|---------------|-----------------|
| Startort 1         | $a_{1,1}$     | $a_{2,1}$     | ... | $a_{m-1,1}$     | $a_{m,1}$     | $\Delta x(1)$   |
| Startort 2         | $a_{1,2}$     | $a_{2,2}$     | ... | $a_{m-1,2}$     | $a_{m,2}$     | $\Delta x(2)$   |
| :                  | :             | :             | :   | :               | :             | :               |
| Startort n-1       | $a_{1,n-1}$   | $a_{2,n-1}$   | ... | $a_{m-1,n-1}$   | $a_{m,n-1}$   | $\Delta x(n-1)$ |
| Startort n         | $a_{1,n}$     | $a_{2,n}$     | ... | $a_{m-1,n}$     | $a_{m,n}$     | $\Delta x(n)$   |
| $\Delta y(j)$      | $\Delta y(1)$ | $\Delta y(2)$ | ... | $\Delta y(m-1)$ | $\Delta y(m)$ |                 |

$\Delta x(i)$  repräsentiert die Differenz zwischen den Maximal- und Minimalwerten in der i-ten Zeile,  $\Delta y(j)$  repräsentiert die Differenz zwischen den Maximal- und Minimalwerten in der j-ten Spalte. Diese Differenz kann durch die folgende Formel berechnet werden:

$$\Delta x(i) = \max_p a_{p,i} - \min_p a_{p,i} \quad (4-14)$$

$$\Delta y(j) = \max_q a_{j,q} - \min_q a_{j,q} \quad (4-15)$$

Nachdem alle Differenzen berechnet wurden, ist das Berechnungsformular vorbereitet. Als Nächstes können beste Kombination gemäß dem folgenden Algorithmus erhalten werden:

---

**Algorithmus der Suche von relative optimale Kombination durch heuristische Methode**

---

|    |                                                                              |
|----|------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | <b>Input:</b> Berechnungstabelle                                             |
| 2  | Schleifen                                                                    |
| 3  | Maximale $\Delta x_{\max}$ und die entsprechende Zeile $i_{\max}$ finden     |
| 4  | Maximale $\Delta y_{\max}$ und die entsprechende Spalte $j_{\max}$ finden    |
| 5  | Wenn $\Delta x_{\max} = -1$ oder $\Delta y_{\max} = -1$                      |
| 6  | Schleife beenden                                                             |
| 7  | Wenn $\Delta x_{\max}$ grösser als $\Delta y_{\max}$ ist                     |
| 8  | $p = i_{\max}$                                                               |
| 9  | Minimale $a_{q,p}$ in der Zeile $p$ und die entsprechende Spalte $q$ finden  |
| 10 | Sonst wenn $\Delta x_{\max}$ kleiner als $\Delta y_{\max}$ ist               |
| 11 | $q = j_{\max}$                                                               |
| 12 | Minimale $a_{q,p}$ in der Spalte $q$ und die entsprechende Zeile $p$ finden  |
| 13 | Das Shuttle $s$ , wesen Standort gleich Startort $p$ ist, finden             |
| 14 | Den Auftrag, wesen Startort gleich Zielort $q$ ist, zum Shuttle $s$ vergeben |
| 15 | Den ausgewählte Shuttle und Auftrag in die Tabelle „Verteilung“ einspeichern |
|    | $\Delta x(p) = -1, \Delta y(q) = -1$                                         |

---

Abbildung 4-11: *Algorithmus der Suche von relative optimale Kombination durch heuristische Methode*

Jeder Zyklus im Algorithmus wählt die Zeile oder Spalte mit der größten Differenz und dann das kleinste Element unter den ausgewählten Zeilen oder Spalten aus. Die relativ optimale Kombination basiert auf die Zeilen- und Spaltenindex aller ausgewählten Elemente. Da der Differenz unter den Elementen in der ausgewählten Zeile oder Spalte am größten ist, kann möglicherweise eine viel größere Zahl ausgewählt werden, wenn zuerst andere Zeilen oder Spalten ausgewählt werden, was dazu führen kann, dass die Optimalität des gesamten Systems erheblich abnimmt. Wenn zuerst die Zeile oder Spalte mit der größten Differenz ausgewählt werden, tritt eine ähnliche Situation auf, wenn Sie danach andere Zeilen und Spalten auswählen. Da der Unterschied zwischen diesen Zeilen oder Spalten jedoch gering ist, ist die Abweichung von Optimalität noch akzeptabel.

#### 4.3.2 Auftragsauswahlalgorithmus bei Initialisierung

In der Initialisierungsphase des ursprünglichen Modells wird die Auftragszuweisung für jeden Shuttle im BewegungsModul durchgeführt. Die Auftragszuweisung des Shuttles

ist daher voneinander unabhängig. Bei der Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles muss bei der Auftragszuweisung der Status anderer Shuttles berücksichtigt werden. Da der Zustand jedes Shuttles während der Initialisierungsphase bekannt ist und gleichzeitig neue Aufträge erforderlich sind, ist es am besten geeignet, Aufträge allen Shuttles einheitlich zuzuweisen. Die Logik der Initialisierungsphase in diesem Algorithmus ist wie folgt:

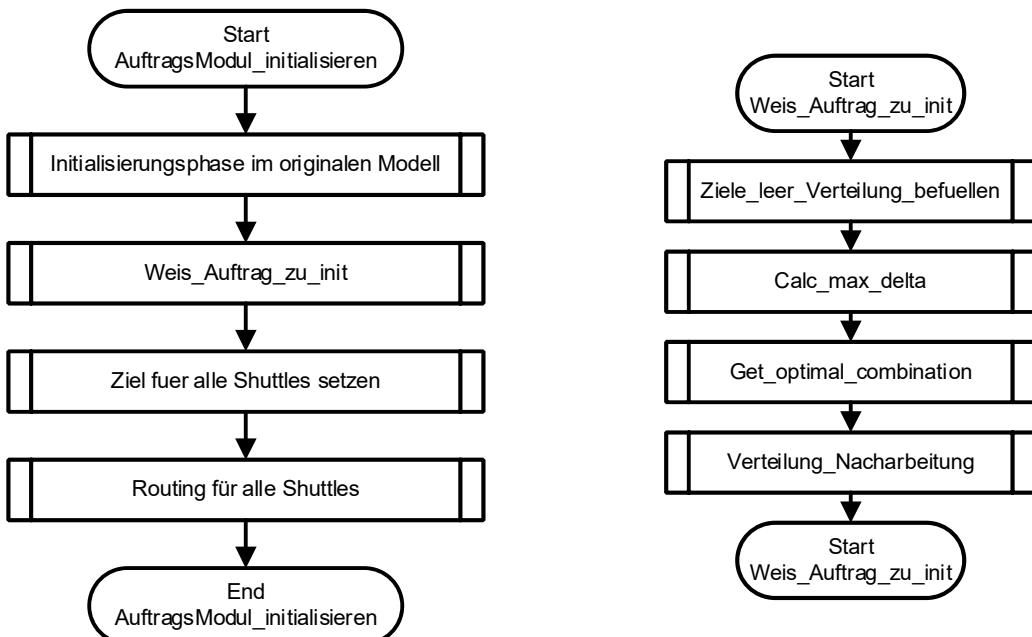
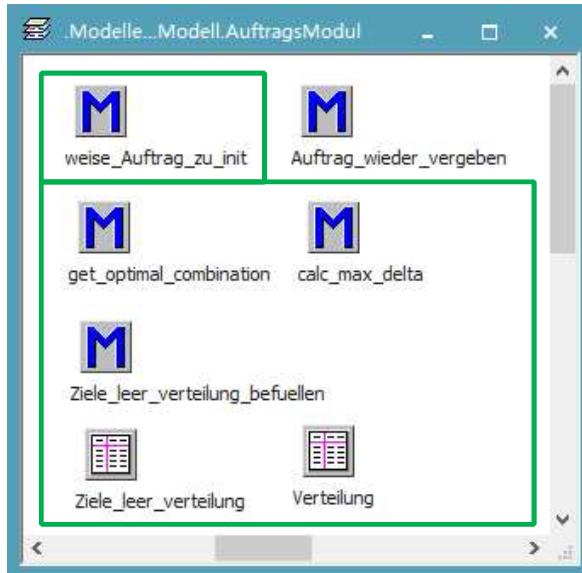


Abbildung 4-12: Änderung in der Methode „AuftragsModul\_initialisieren“ und der Flussdiagramm der Methode „wiese\_Auftrag\_zu\_init“

Bei diesem Algorithmus wird ein initiales Auftragszuweisungsmodul nach dem ursprünglichen Initialisierungsmodul hinzugefügt. Dieses initiale Auftrags-Zuweisungs-Modul besteht aus zwei Funktionen: dem besten Kombinationssuchmodul „weis\_Auftrag\_zu\_init“ und dem Auftragseinstellungsmodul für Shuttles.

Das beste Kombinationssuchmodul sieht wie folgende aus:



Relevante Methode:

- weise\_Auftrag\_zu\_init
- Ziele\_leer\_verteilung\_befuellen
- calc\_max\_delta
- get\_optimal\_combination

Relevante Tabelle:

- Ziele\_leer\_verteilung
- Verteilung

Abbildung 4-13: Relevante Methode und Tabelle für die Zuweisung der Aufträge bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

Das beste Kombinationssuchmodul wird durch die Methode „“ implementiert, und kann in vier Sub-Teile unterteilt werden: Initialisierung der Berechnungstabelle durch „Ziele\_leer\_Verteilung\_befuellen“, Differenzberechnung durch „calc\_max\_delta“, optimale Kombinationssuche durch „get\_optimal\_combination“ und Nachbearbeitungsphase.

Da sich die Initialisierung der Berechnungstabelle in der Initialisierungsphase und in der normalen Simulationsphase unterscheidet, wird sie in der Initialisierungsphase und der normalen Simulationsphase erklärt.

Da sich in der Nachbearbeitungsphase die Anforderungen für die Initialisierungsphase von denen für die normale Simulationsphase unterscheiden, müssen sie auch in ihren jeweiligen Phasen separat interpretiert werden. Die spezifischen Anforderungen werden nachstehend ausführlich beschrieben.

Die anderen zwei Teile spielen in der Initialisierungsphase und in der normalen Simulationsphase die gleiche Rolle, daher werden sie nur hier vorgestellt.

### **Methode: Ziele\_leer\_verteilung\_befuellen**

Bei der Suche der besten Kombination ist die Initialisierung der Berechnungstabelle das erste und wichtigste Schritt. Weil alle Shuttles zu Zeitpunkt 0 einen Auftrag erfordert und keine Geschwindigkeiten haben, ist die Zeilenindex der Berechnungstabelle

der Standort des Shuttles Knoten. Da das Shuttle in der Initialisierungsphase zum Startort des empfangenen Auftrags fahren wird, ist die Spaltenindex der Berechnungstabelle der Startort aller Aufträge.

Als nächstes werden die Werte in der Tabelle gemäß den drei oben beschriebenen Kriterien und den Bedingungen bei der Initialisierungsphase berechnet. Da bei der Initialisierungsphase die Erstellungszeit aller Aufträge 0 ist, ist zu diesem Zeitpunkt das Zeitkriterium sinnlos, und daher wird während der Initialisierungsphase kein Zeitkriterium verwendet.

Während der Initialisierungsphase werden nur die Abstands- und Sequenz-Kriterien verwendet. Die Kombination der drei (zwei) Kriterien ist wie folgt:

*Tabelle 4-5: Kombination der drei Kriterien für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles bei Initialisierungsphase*

| Plan Index | Abstand -Kriterium |          |          | Sequenz-Kriterium |          |   |
|------------|--------------------|----------|----------|-------------------|----------|---|
|            | Option 3           | Option 2 | Option 3 | Option 4          | Option 5 |   |
| 1          | X                  | X        | X        | X                 | X        | X |
| 2          | ✓                  | ✓        | -        | -                 | -        | - |
| 3          | ✓                  | -        | ✓        | -                 | -        | - |
| 4          | ✓                  | -        | -        | ✓                 | -        | - |
| 5          | ✓                  | -        | -        | -                 | -        | ✓ |
| 6          | X                  | ✓        | -        | -                 | -        | - |
| 7          | X                  | -        | ✓        | -                 | -        | - |
| 8          | X                  | -        | -        | ✓                 | -        | - |
| 9          | X                  | -        | -        | -                 | -        | ✓ |

Da in der Berechnungstabelle viele Werte zu berechnen sind, ist die Verwendung der Routing-basierte Methode unter dem Abstandskriterium sehr zeitaufwändig und verbraucht viele Rechenressourcen. Daher wird hier nur das Abstandskriterium mit der Tabelle „Minimale\_Fahrzeit“ (Option 3) verwendet.

Die spezifische Logik von „Ziele\_leer\_verteilung\_befuellen“ ist wie unten dargestellt:

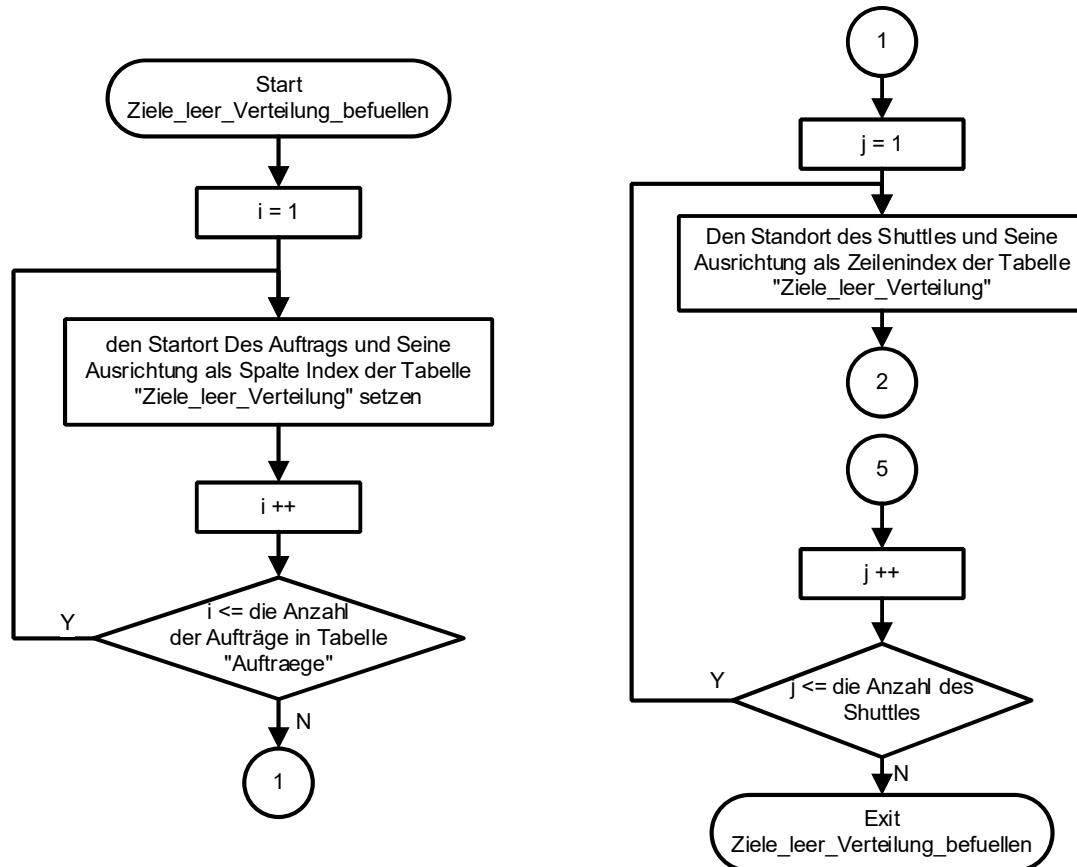


Abbildung 4-14: Flussdiagramm der Methode „Ziele\_leer\_Verteilung\_befuellen“ bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

Die Berechnung jedes Wertes in der Tabelle kann unter Verwendung von oben bereits beschriebenen Abstands-Kriteriums-Modul und Sequenz-Kriteriums-Modul wie folgt durchgeführt werden:

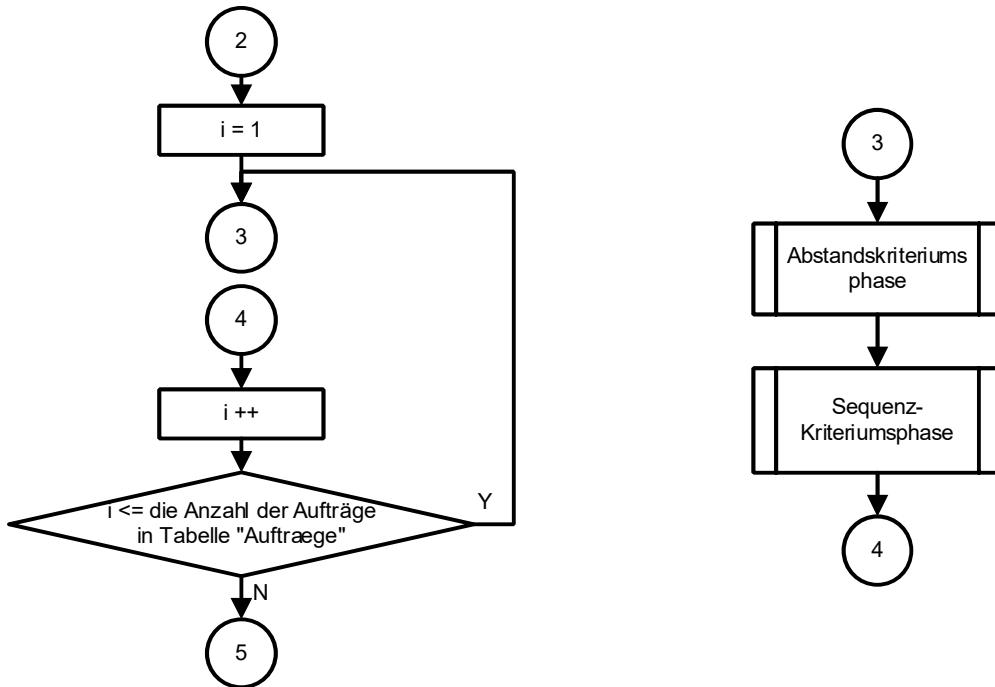


Abbildung 4-15: Flussdiagramm des Berechnungsphase anhand zweier Kriterien bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

### Methode: calc\_max\_delta

Die Methode „calc\_max\_delta“ ähnelt einer Nachbearbeitungsfunktion der Berechnungstabelle und berechnet die maximale Differenz jeder Zeile und jeder Spalte in der Berechnungstabelle. Die Suche von Maximal- und Minimalwerte wird in diesem Modell durch Einzelvergleichsmethode ausgeführt. Die Suche kann auch mithilfe der mit Tecnomatix gelieferten Funktionen erreicht werden. Die Logik in diesem Modell lautet wie folgt:

---

#### Algorithmus von Suche des von Maximal- und Minimalwerte aus eine Reihe von Werte

---

|   |                                                                          |
|---|--------------------------------------------------------------------------|
|   | <b>Input:</b> eine Reihe von Werte                                       |
| 1 | max = -1, min = 999999999999999                                          |
| 2 | alle Shuttles im Zusammenhang mit dieser Kollision finden und gruppieren |
| 3 | Für alle Werte in der Reihe schleifen                                    |
| 4 | Wenn Wert[i] < min                                                       |
| 5 | min = Wert[i]                                                            |
| 6 | Wenn Wert[i] > max                                                       |
| 7 | max = Wert[i]                                                            |

---

Abbildung 4-16: Algorithmus von Suche des von Maximal- und Minimalwerte aus eine Reihe von Werte

Da alle Werte in diesem Modell größer als 0 sind, wird max = -1 wählen und min = inf (hier 999999999999999 als Big-M wählen) zu Beginn gewählt.

Die Differenz zwischen den Maximal- und Minimalwerten ist die maximale Differenz für die Zeile oder Spalte. Die spezifische Berechnungslogik lautet wie folgt:

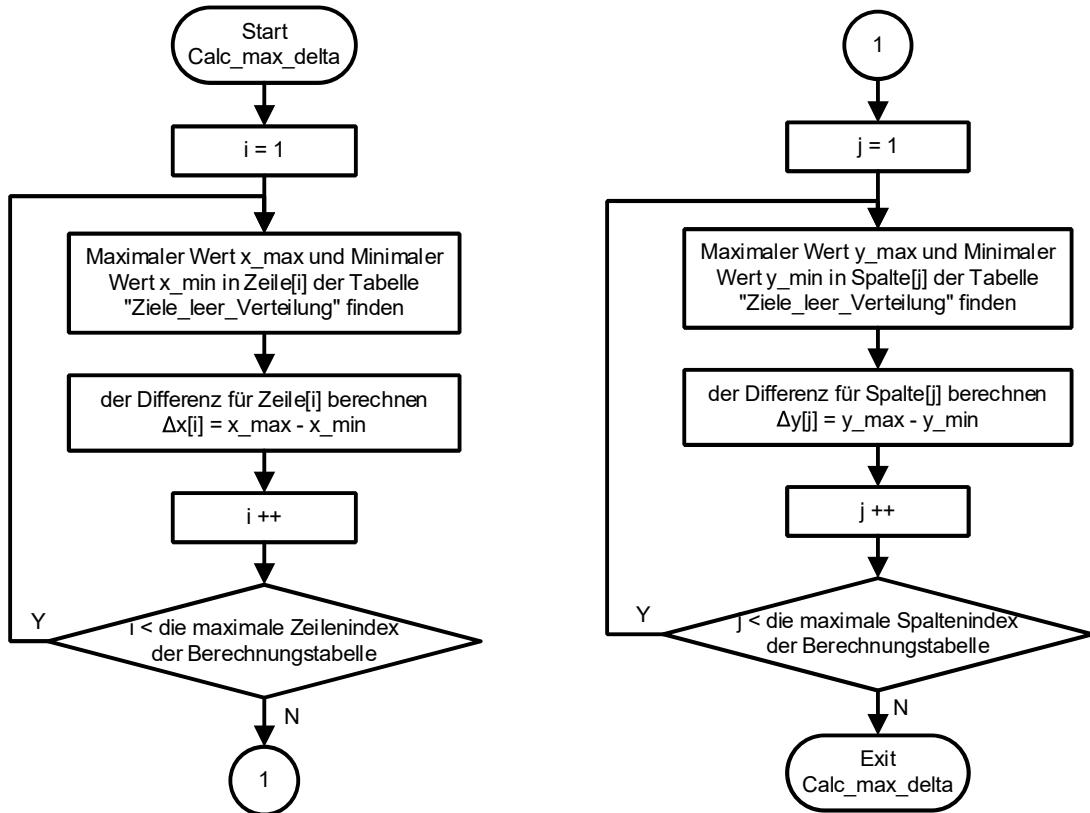


Abbildung 4-17: Flussdiagramm der Methode „calc\_max\_delta“

Die berechnete maximale Differenz wird in die letzte Zeile oder die letzte Spalte der Berechnungstabelle eingefügt. Bisher ist die Initialisierung des Berechnungsformulars abgeschlossen und das Ergebnis lautet wie folgt:

|                     | string 0       | time 10       | time 11        | time 12       | time 13        | time 14       | time 15        | time 16 | time 17 |
|---------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------|---------|
| string StandortZiel |                | Knoten_17_5_X | Knoten_17_16_Y | Knoten_17_7_X | Knoten_11_16_Y | Knoten_7_16_Y | Knoten_13_16_Y | delta   |         |
| 2                   | Knoten_14_6_Y  | 10.0000       | 32.7000        | 10.0000       | 32.7000        | 40.3000       | 28.9000        | 41.7000 |         |
| 3                   | Knoten_12_4_Y  | 13.8000       | 41.1000        | 18.4000       | 33.5000        | 41.1000       | 33.5000        | 38.7000 |         |
| 4                   | Knoten_12_9_Y  | 20.7000       | 29.6000        | 16.1000       | 22.0000        | 29.6000       | 22.0000        | 27.2000 |         |
| 5                   | Knoten_12_7_Y  | 16.1000       | 34.2000        | 11.5000       | 26.6000        | 34.2000       | 26.6000        | 34.1000 |         |
| 6                   | Knoten_2_5_Y   | 30.5000       | 57.8000        | 35.1000       | 46.4000        | 38.8000       | 50.2000        | 27.3000 |         |
| 7                   | Knoten_8_2_Y   | 26.0000       | 53.3000        | 30.6000       | 41.9000        | 38.1000       | 45.7000        | 31.9000 |         |
| 8                   | Knoten_6_6_Y   | 25.2000       | 47.9000        | 25.2000       | 36.5000        | 28.9000       | 40.3000        | 22.7000 |         |
| 9                   | Knoten_14_10_Y | 19.2000       | 23.5000        | 14.6000       | 23.5000        | 31.1000       | 19.7000        | 34.8000 |         |
| 10                  | Knoten_11_11_Y | 27.2000       | 26.9000        | 22.6000       | 11.5000        | 23.1000       | 19.3000        | 23.0000 |         |
| 11                  | Knoten_12_6_Y  | 13.8000       | 36.5000        | 13.8000       | 28.9000        | 36.5000       | 28.9000        | 34.1000 |         |
| 12                  | Knoten_6_5_Y   | 22.9000       | 50.2000        | 27.5000       | 38.8000        | 31.2000       | 42.6000        | 27.3000 |         |
| 13                  | delta          | 20.5000       | 41.2000        | 25.1000       | 34.9000        | 18.0000       | 37.4000        |         |         |

Abbildung 4-18: Struktur der Tabelle „Ziele\_leer\_verteilung“

**Methode: get\_optimal\_combination**

Diese Methode sucht die beste Kombination basierend auf der Berechnungstabelle und speichert die Kombination in der Tabelle „Verteilung“. Die Logik lautet wie folgt:

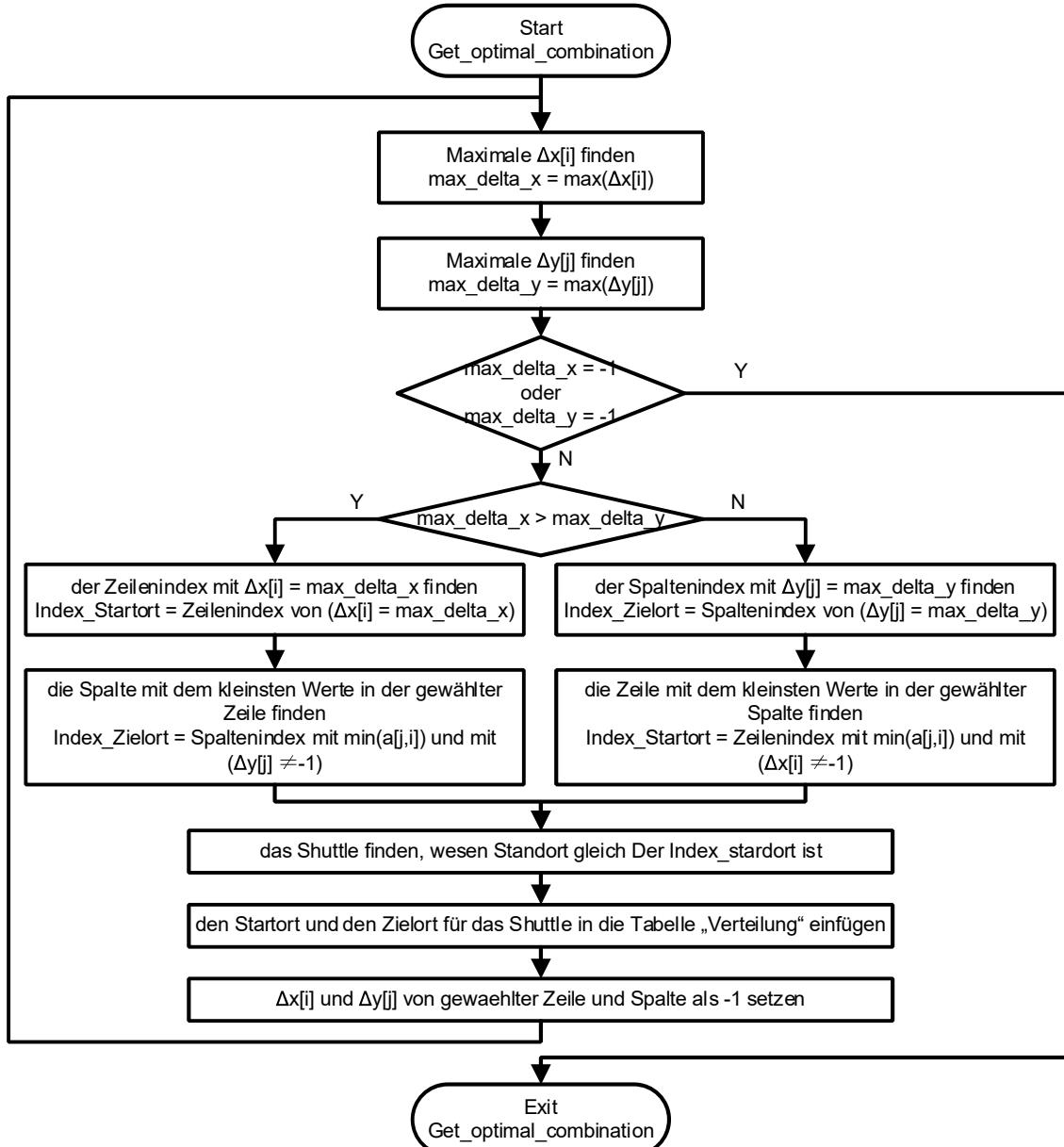


Abbildung 4-19: Flussdiagramm der Methode „get\_optimal\_combination“

Am Ende jedes Zyklus wird der Differenz-Wert der diesmal gefundenen Zeilen und Spalten auf -1 gesetzt. Dies dient dazu, die ausgewählten Zeilen und Spalten im nächsten Zyklus zu ignorieren. Da alle Differenz in der Tabelle größer als 0 sein sollten und nach dem Algorithmus der Maximale Wert der Differenz gesucht wird, wird die Zeile und die Spalte mit dem Differenz-Wert -1 ausgewählt, nur wenn die alle anderen Werte -1 sind. Bei der Auswahl des kleinsten Elements in einer Zeile oder Spalte werden die ausgewählten Spalten oder Zeilen mit dem Differenz-Wert -1 ausgefiltert.

Wenn die ausgewählte maximale Differenz -1 beträgt, bedeutet dies, dass kein Shuttle einen neueren Auftrag benötigt oder alle Aufträge in der Auftragsbibliothek zugewiesen

werden. Da dieses Modell erfordert, dass die Anzahl der Aufträge in der Auftragsbibliothek immer genügend ist, d.h. die Anzahl der Aufträge in der Bestellbibliothek im Allgemeinen größer als die Anzahl der Shuttles ist, ist die Bedingung für das Verlassen der Schleife normalerweise, dass alle Shuttles einen Auftrag haben.

Die ausgewählte Kombination wird in der Tabelle „Verteilung“ gespeichert. Die Tabelle enthält hauptsächlich den Namen und das Objekt des Shuttles, den Standort des Shuttles und den Startort des Auftrags. Die Tabelle „Verteilung“ ist wie unten gezeigt.

| *.Modelle.OLPS.Modell.AuftragsModul.Verteilung |              |                            |                |                |             |            |        |
|------------------------------------------------|--------------|----------------------------|----------------|----------------|-------------|------------|--------|
| *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:1                     |              |                            |                |                |             |            |        |
|                                                | string 0     | object 1                   | string 2       | string 3       | string 4    | boolean 5  | real 6 |
| string                                         | Shuttle_Name | Shuttle                    | Standort       | Ziel           | Ladezustand | Zieländern | f      |
| 1                                              | Shuttle_1    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:1 | Knoten_14_13_Y | Knoten_17_14_X |             |            |        |
| 2                                              | Shuttle_2    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:2 | Knoten_14_6_Y  | Knoten_17_5_X  |             |            |        |
| 3                                              | Shuttle_3    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:3 | Knoten_12_4_Y  | Knoten_17_3_X  |             |            |        |
| 4                                              | Shuttle_4    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:4 | Knoten_12_9_Y  | Knoten_13_16_Y |             |            |        |
| 5                                              | Shuttle_5    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:5 | Knoten_12_7_Y  | Knoten_17_12_X |             |            |        |
| 6                                              | Shuttle_6    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:6 | Knoten_2_5_Y   | Knoten_3_16_Y  |             |            |        |
| 7                                              | Shuttle_7    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:7 | Knoten_8_2_Y   | Knoten_17_7_X  |             |            |        |
| 8                                              | Shuttle_8    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:8 | Knoten_6_6_Y   | Knoten_17_10_X |             |            |        |

Abbildung 4-20: Struktur der Tabelle „Verteilung“

### Phase: Zielsetzung für alle Shuttle

Der Zweck dieser Phase besteht darin, gemäß den Informationen in der Tabelle „Verteilung“ den Zielknoten des Shuttles zu setzen und die Route für jedes Shuttle zu planen, nachdem die beste Auftragskombination erhalten wurde. Da sich die Tabelle „Ziele“ des Shuttles in der Initialisierungsphase von denen in der normalen Simulation unterscheiden (das Shuttle verfügt nicht über die Informationen des vorherigen Auftrags), wird für Routing eine neue Methode „Routing\_beि\_init“ eingerichtet. Die Logik lautet wie folgt:

---

#### Algorithmus der Methode „Routing\_beи\_init“

---

- 1 Für alle Shuttles schleifen
  - 2 die vorhandene Route im Shuttle löschen
  - 3 Temporäres Ziele-Tabelle für das Shuttle erzeugen
  - 4 Routing für das Shuttle: Multi Stage Routing
  - 5 Das ersten Zeitfenster am Standort des Shuttles löschen
- 

Abbildung 4-21: Algorithmus der Methode „Routing\_beи\_init“

Darüber hinaus müssen sich darauf achten lassen, dass Shuttles in der Initialisierungsphase der Bewegung nicht erneut Auftrag zugewiesen werden dürfen, da allen Shuttles einen Auftrag nach der Initialisierung haben. Stattdessen können die Shuttles sich direkt anhand der Routen bewegen. Da das Shuttle zu Zeitpunkt 0 schon einen neuen Zielknoten und eine neue Route hat, wird das Initialisierungs-Bewegungs-Modul in der Methode „bei\_Aankunft\_Lagerplatz“ nicht aktiviert.

#### 4.3.3 Auftragsauswahlalgorithmus während der Simulation

Aufgrund der Kontinuität der Zeit ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zwei Shuttles gibt, die ihre Aufträge gleichzeitig abgeschlossen werden und neue Aufträge benötigen, beträgt fast 0. In der Simulation werden aufgrund der Diskontinuität der Berechnungszeit, wird Computerbefehl in der Reihenfolge ausgeführt, obwohl zwei Aufträge gleichzeitig abgeschlossen werden können, so dass es eine Sequenz für die Verarbeitung des Auftrags gibt. Dies führt dazu, dass es zu jeder Zeit nur ein Shuttle gibt, das einen neuen Auftrag benötigt.

Obwohl in diesem Algorithmus bei der Auftragsauswahl die Zustände anderer Shuttles berücksichtigt, besteht seine Essenz darin, die am besten geeignete Auftrag für das Shuttle zu finden, das neue Auftrag benötigt. Daher soll hauptsächlich die Methode „weis\_Auftrag\_zu“ geändert werden, um die ursprüngliche Zeit-basierte Auswahlmethode zu ersetzen. Die Logik der Methode „weis\_Auftrag\_zu“ lautet wie folgt:

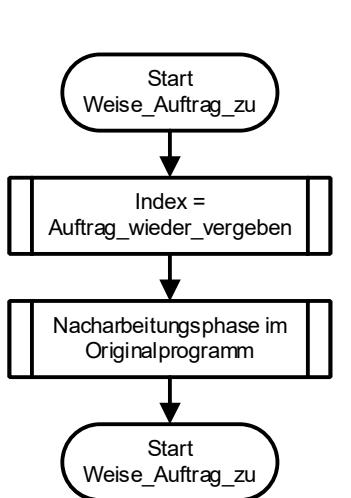


Abbildung 4-22: Flussdiagramm der Methode „weise\_Auftrag\_zu“ für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

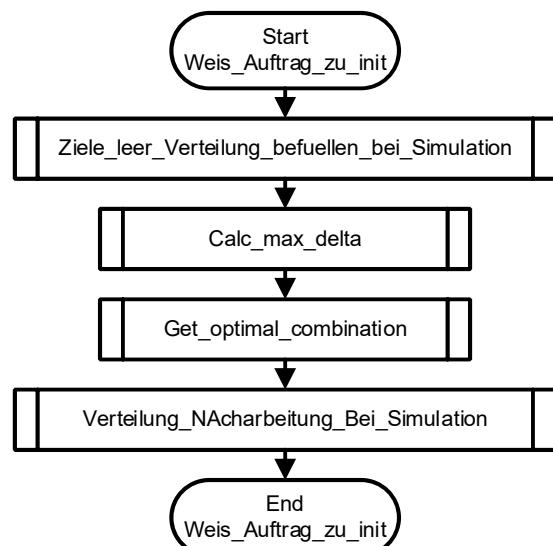


Abbildung 4-23: Flussdiagramm der Methode „weis\_Auftrag\_zu\_init“ für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

Bei diesem Algorithmus wird der Index des neuen Auftrags über die Methode "Auftrag\_wieder\_vergeben" ausgewählt. Diese Methode ähnelt der Methode "weis\_Auftrag\_zu\_init" in der Initialisierungsphase und besteht aus vier Teilen, wie in der obigen Abbildung gezeigt. Wie oben erklärt, sind die Funktionen und die Logik der beiden Methoden "calc\_max\_delta" und "get\_optimal\_combination" dieselben wie in der Initialisierungsphase. In diesem Abschnitt werden hauptsächlich die Vorbereitungsphase „Ziele\_leer\_Verteilung\_befuellen\_bei\_Simulation“ und Nachbearbeitungsphase „Verteilung\_Nacharbeitung\_bei\_Simulation“ erläutert.

### Phase: Ziele\_leer\_Verteilung\_befuellen\_bei\_Simulation

Die Hauptaufgabe der Vorbereitungsphase besteht darin, Informationen über alle Shuttles und alle nicht zugewiesenen Aufträge zu sammeln und den Wert von jedem Startort zum Zielort zu berechnen.

Der erste Schritt ist die Sammlung von Auftragsinformationen. Der Startknoten aller nicht zugewiesenen Bestellung wird als Spaltenindex der Berechnungstabelle verwendet. Die Logik lautet wie folgt:

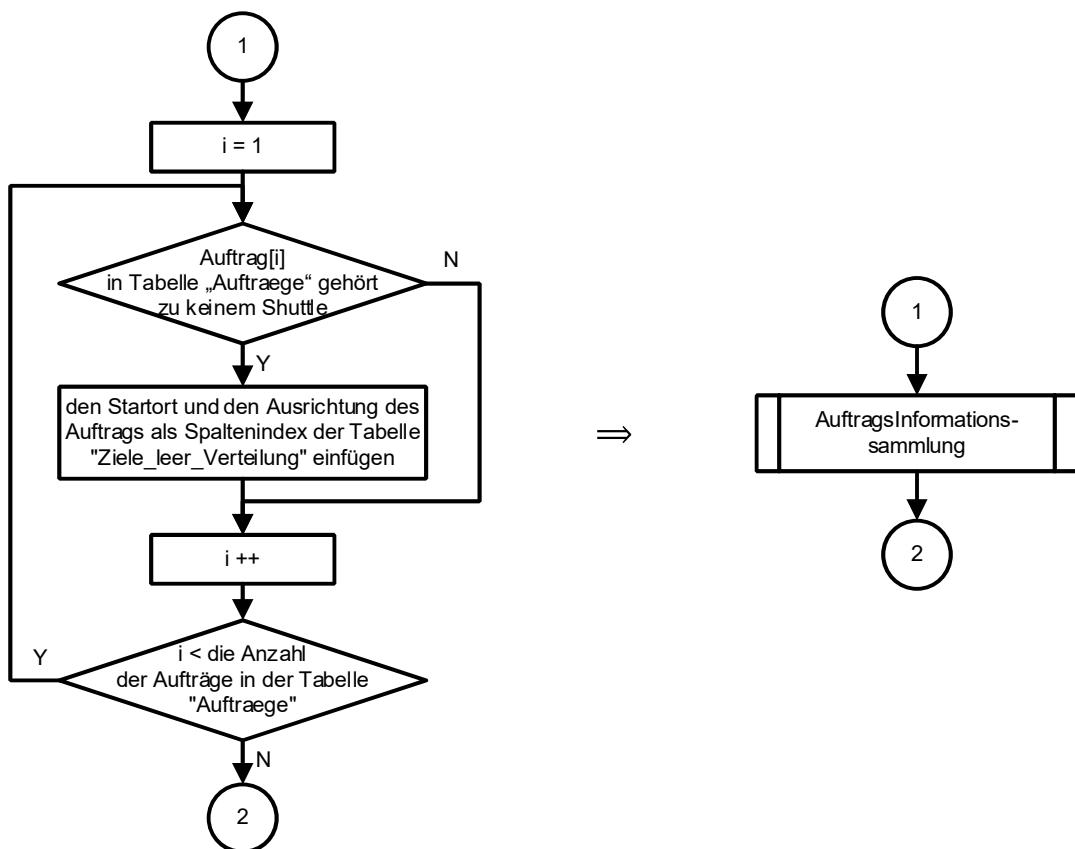


Abbildung 4-24: Flussdiagramm der Phase der Informationssammlung der Aufträge

Als nächstes müssen die Informationen über das Shuttle gesammelt werden. In diesem Algorithmus muss die Auftragsabschlusszeit anderer Shuttles geschätzt werden, um neue Aufträge gleichmäßig nach der Abschlusszeit des Auftrags aufzuteilen. Nicht alle Abschlusszeit des zugewiesenen Auftrags sind jedoch vorhersehbar. Basierend auf der obigen Analyse sind nur den Zeitpunkt, auf dem das Shuttle einen neuen Auftrag benötigen, für die beladenen Shuttles vorhersehbar sind. Daher werden bei der Auftragsvergabe nur andere beladenen Shuttles berücksichtigt. Die Logik lautet wie folgt:

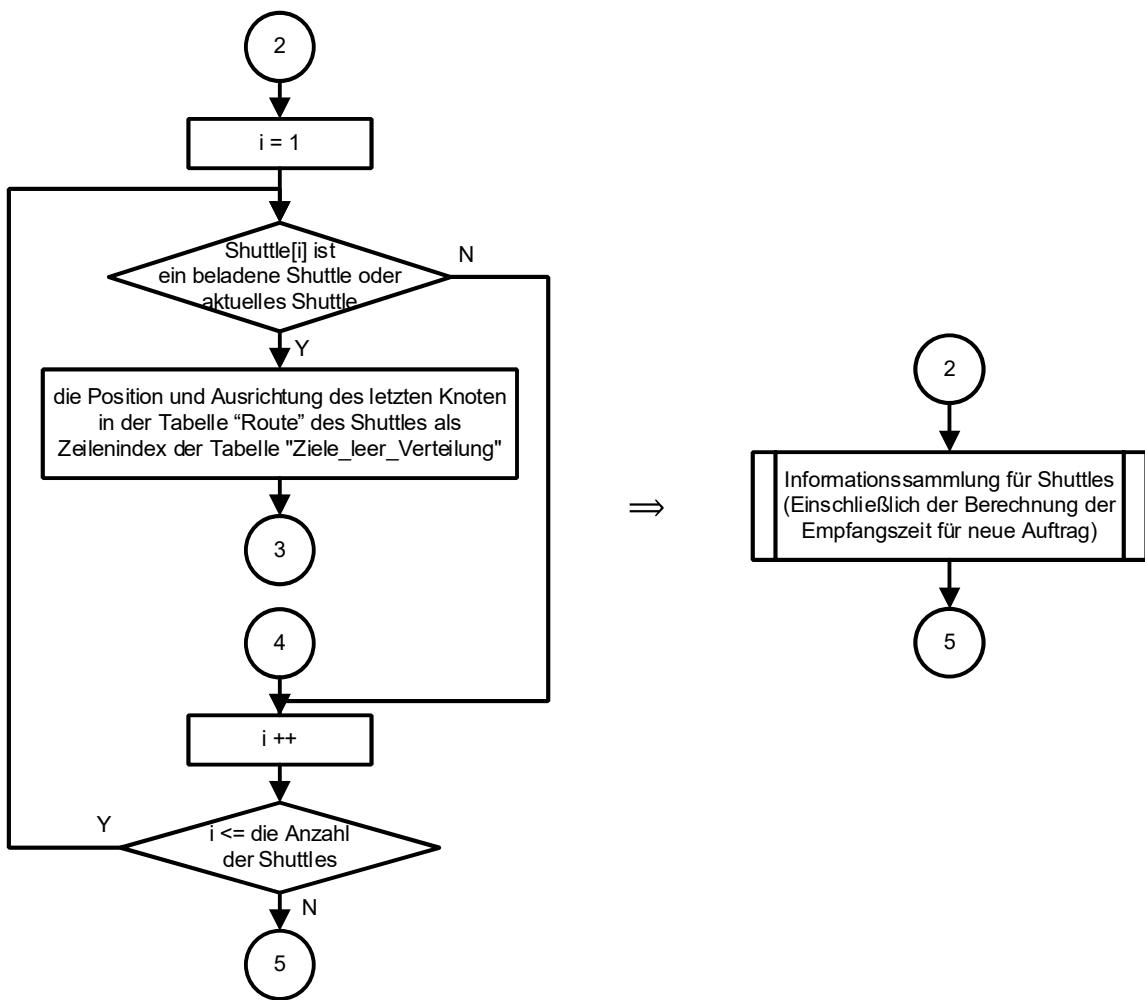


Abbildung 4-25: Flussdiagramm der Phase der Informationssammlung für Shuttles

Die Zeit, die das Shuttle eine neue Auftrag benötigt, wird durch die Ankunftszeit des letzten Knotens der Route des Shuttles zuzüglich der Zeit, die das Shuttle am Zielknoten entladen braucht, geschätzt. Wenn die abgeschätzte Zeit früher ist als die Zeit, die die Erstellungszeit des Auftrags, wird die Zeit, die das Shuttle den Auftrag empfangen kann, durch die Erstellungszeit des Auftrags bestimmen. Im Allgemeinen ist die Erstellungszeit des Auftrags jedoch häufig früher als die aktuelle Simulationszeit, und die Ankunftszeit zuzüglich der Lastwechselzeit ist im Allgemeinen später als die aktuelle

Simulationszeit. Daher wird die Zeit, die das Shuttle den Auftrag empfangen werden, hauptsächlich von der Ankunftszeit des Zielknoten abhängig. Die Logik lautet wie folgt:

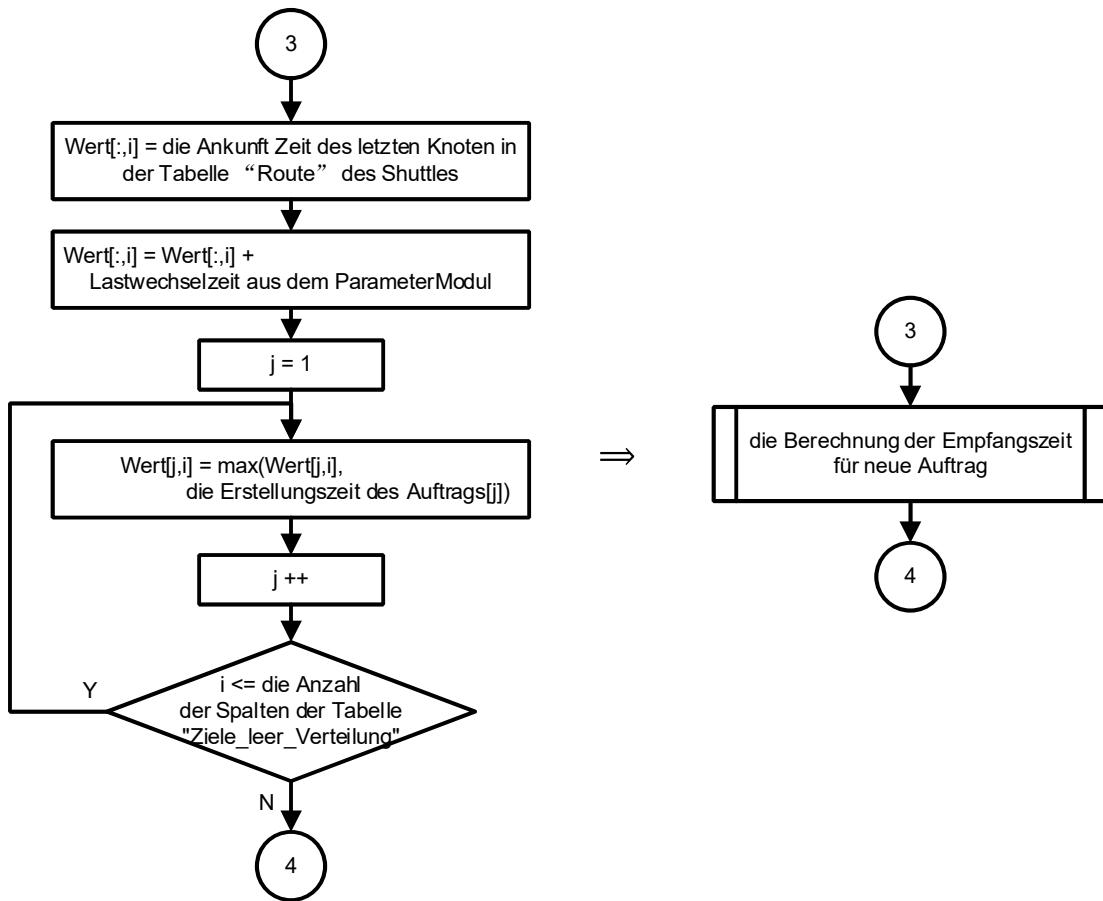


Abbildung 4-26: Flussdiagramm der Berechnungsphase der Empfangszeit für neue Auftrag

Die obigen Berechnungen gelten für das Shuttle und es gibt fast keine Informationen für die Aufträge. Als nächstes wird den Wert für jeden Auftrag basierend auf den drei oben genannten Kriterien berechnet. Im Gegensatz zur Initialisierungsphase kann die Erstellungszeit des Auftrags während der Simulationsphase unterschiedlich sein. Daher ist es sinnvoll, ein Zeitkriterium zu verwenden. Darüber hinaus wird das Abstandskriterium wie in der Initialisierungsphase nur durch die Tabelle „Minimale\_Fahrzeit“ verwendet, um die Rechenlast des Systems zu reduzieren. Die Kombination der drei Kriterien ist wie folgt:

**Tabelle 4-6:** Kombination der drei Kriterien für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles während der Simulation

| Plan-Index | Abstand -Kriterium |  | Sequenz-Kriterium |          |          |          | Zeit-Kriterium |
|------------|--------------------|--|-------------------|----------|----------|----------|----------------|
|            | Option 3           |  | Option 2          | Option 3 | Option 4 | Option 5 |                |
| 1          | X                  |  | X                 | X        | X        | X        | ✓              |
| 2          | ✓                  |  | X                 | X        | X        | X        | X              |
| 3          | ✓                  |  | X                 | X        | X        | X        | ✓              |
| 4          | ✓                  |  | ✓                 | -        | -        | -        | X              |
| 5          | ✓                  |  | -                 | ✓        | -        | -        | X              |
| 6          | ✓                  |  | -                 | -        | ✓        | -        | X              |
| 7          | ✓                  |  | -                 | -        | -        | ✓        | X              |
| 8          | ✓                  |  | ✓                 | -        | -        | -        | ✓              |
| 9          | ✓                  |  | -                 | ✓        | -        | -        | ✓              |
| 10         | ✓                  |  | -                 | -        | ✓        | -        | ✓              |
| 11         | ✓                  |  | -                 | -        | -        | ✓        | ✓              |
| 12         | X                  |  | ✓                 | -        | -        | -        | X              |
| 13         | X                  |  | -                 | ✓        | -        | -        | X              |
| 14         | X                  |  | -                 | -        | ✓        | -        | X              |
| 15         | X                  |  | -                 | -        | -        | ✓        | X              |
| 16         | X                  |  | ✓                 | -        | -        | -        | ✓              |
| 17         | X                  |  | -                 | ✓        | -        | -        | ✓              |
| 18         | X                  |  | -                 | -        | ✓        | -        | ✓              |
| 19         | X                  |  | -                 | -        | -        | ✓        | ✓              |

Da der Wert des Auftrags für jedes Shuttle gleich ist, müssen nur jeder Spalte den gleichen Wert des Auftrags addiert werden. Die Logik lautet wie folgt:

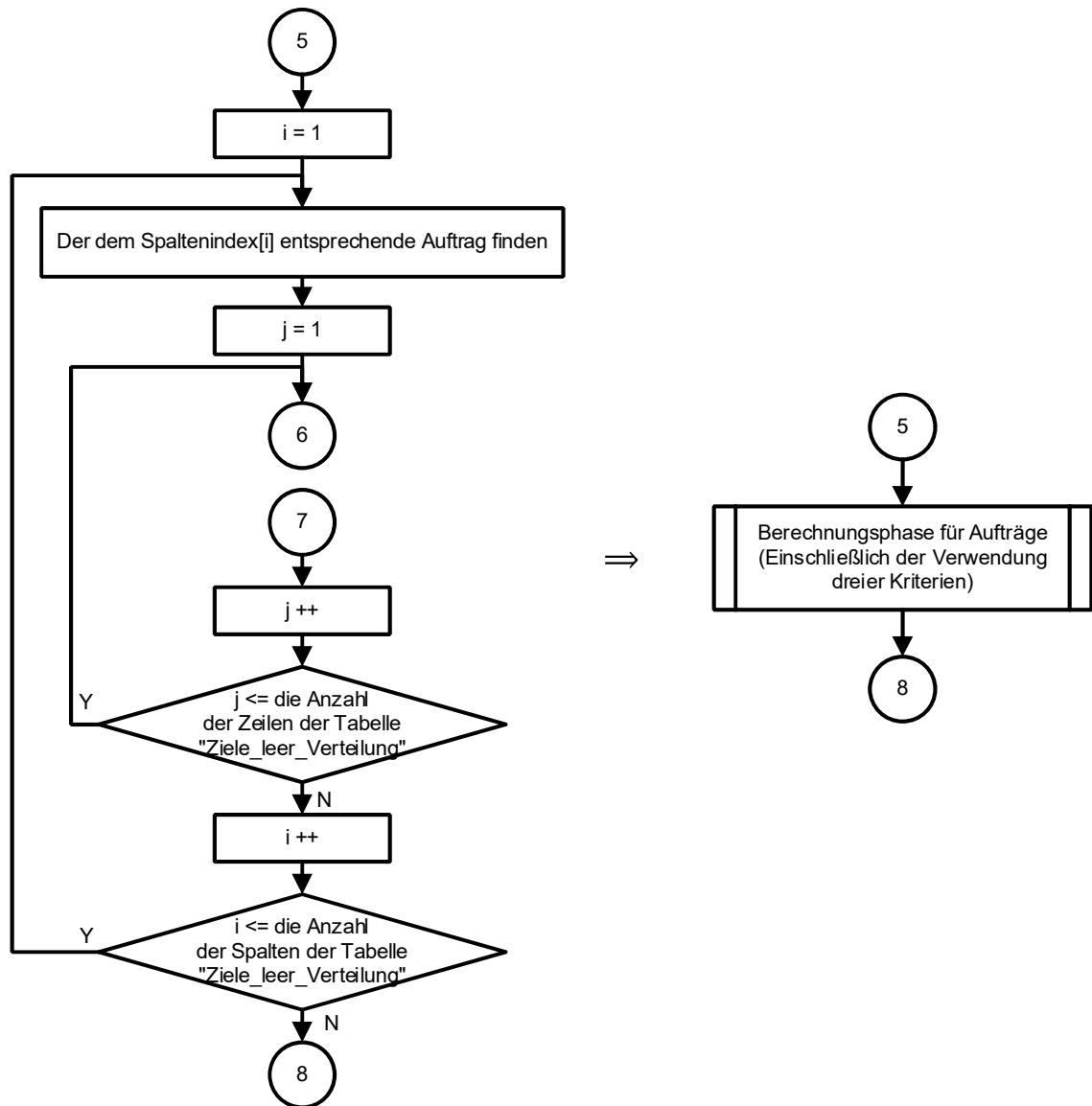


Abbildung 4-27: Flussdiagramm der Berechnungsphase für Aufträge bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

Bei der Berechnung des Werts jedes Auftrags können die oben beschriebenen Submodule verwendet werden. Die Berechnungslogik lautet wie folgt:

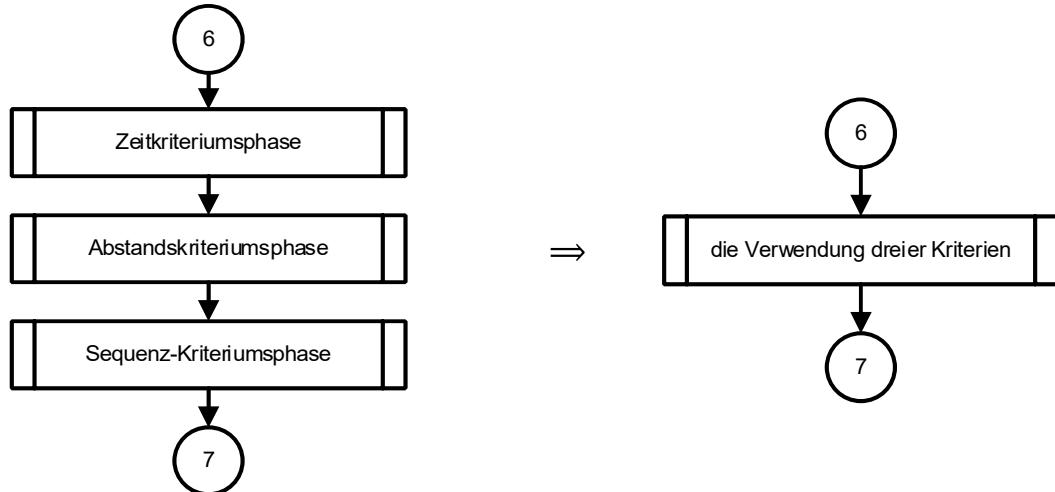


Abbildung 4-28: Flussdiagramm der Berechnungsphase durch die Verwendung dreier Kriterien bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

Zusammenfassend ist die Logik der gesamten Vorbereitungsphase „Ziele\_leer\_Verteilung\_befuellen\_beSimulation“ wie folgt:

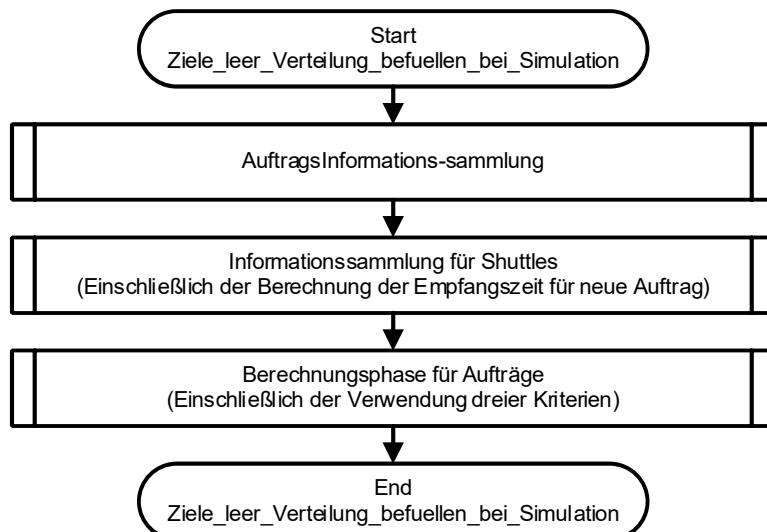


Abbildung 4-29: Flussdiagramm der Methode „Ziele\_leer\_Verteilung\_befuellen\_beSimulation“

### Phase: Verteilung\_Nacharbeitung\_beSimulation

Anders als bei der Zuweisung von Aufträgen und Routing für alle Shuttles in der Initialisierungsphase muss in der Nachbearbeitungsphase in der normalen Simulation nur die für das aktuelle Shuttle erforderliche Auftragsindex aus der erhaltenen Kombination ermittelt werden. Die Logik ist wie folgt:

---

**Algorithmus von Nachbearbeitungsphase „Verteilung\_Nacharbeitung\_bei\_Simulation“**

---

|   |                                                                                              |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | <b>Input:</b> ausgefüllte Tabelle „Verteilung“                                               |
| 2 | Für alle Aufträge in der Tabelle „Auftraege“ schleifen                                       |
| 3 | Wenn der Auftrag nicht zugewiesen wird                                                       |
| 4 | Wenn der Startort des Auftrags das „Ziel“ des aktuellen Shuttles in der Tabelle „Verteilung“ |
| 5 | Den Index des Auftrags in der Tabelle „Auftraege“ aufzeichnen                                |
|   | Die Schleife beenden                                                                         |

---

Abbildung 4-30: Algorithmus von Nachbearbeitungsphase „Verteilung\_Nacharbeitung\_bei\_Simulation“



## 5 Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen

### 5.1 Methode des Auftragsumtauschs

#### 5.1.1 Auswahl der Shuttles mit umtauschbarem Auftrags

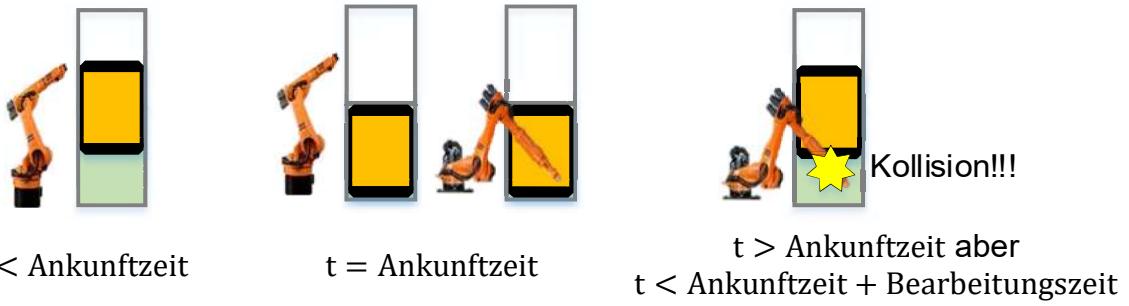
Vor dem Umtausch von Aufträgen muss analysiert werden, welche Aufträge umgetauscht werden können. Wenn das Shuttle zum Startknoten des Auftrags fahren, gemäß der obigen Analyse des Auftragsmoduls muss das Shuttle leer sein. Für das beladene Shuttle können die Palette auf den relevanten Shuttles gleich sein, wenn es keine Anforderung der Sequenz an die Aufträge gibt. Diese Aufträge können umgetauscht werden. Bei Aufträgen mit Sequenzanforderungen sind die Palette voreinander verschieden, sodass unter normalen Situation kein Austausch von Zielknoten möglich ist. Wie in der folgenden Tabelle gezeigt:

Tabelle 5-1: verschiedene Auftragsbearbeitungsmethode nach dem Typ des Zielknotens und des Ladenzustands des Shuttles

| Umtauschbarkeit              |         | Typ des Zielknotens |        |        |
|------------------------------|---------|---------------------|--------|--------|
| Ladenzustand<br>des Shuttles | beladen | Lagerplatz          | IO_LKW | IO_RBG |
|                              | beladen | X                   | X      | X      |
|                              | leer    | ✓                   | ✓      | ✓      |

In diesem Modell ist die Palette jeder Auftrag eindeutig, unabhängig davon, ob es sich um einen Auftrag mit oder ohne Sequenzanforderung handelt, sodass der Aufträge der beladenen Shuttles nicht umgetauscht werden.

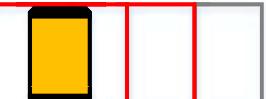
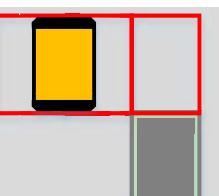
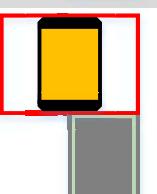
Obwohl theoretisch alle Aufträge auf den leeren Shuttles umgetauscht werden können, kann der erste Halteknoten des Shuttles sein Zielknoten sein, wenn sich das Shuttle sehr nahe an seinem Zielknoten befindet. Im tatsächlichen Logistiksystem beurteilen Arbeiter oder Maschinen auf dem Zielknoten nicht, ob der aktuelle Knoten der Zielknoten des Shuttles ist, sondern führen den entsprechenden Vorgang direkt auf dem ankommenden Shuttle aus. Shuttle kann den Knoten verlassen, bevor der Vorgang auf dem Knoten abgeschlossen wird. Dies führt zu Fehlern bei der Arbeit am Knoten, die Leben oder Eigentum gefährden können, wie in der folgenden Abbildung dargestellt:



*Abbildung 5-1: Unfall beim Eintritt des Funktionsknoten, die kein Zielort ist*

Daher muss sichergestellt werden, dass das ausgewählte Shuttle einen bestimmten Abstand zum Zielknoten hat. Aufgrund der Besonderheit der Knotengröße und Beschleunigung des Shuttles kann das Shuttle in diesem Modell mit jeder zulässigen Geschwindigkeit in einen Knoten eintreten und vollständig innerhalb des Knotens anhalten. Wenn sich Shuttle dem Zielknoten nähert, treten folgende Situationen auf:

**Tabelle 5-2:** Verschiedene Situationen der Bewegung des Shuttles bei Annäherung an den Zielknoten

| Anzahl der Knoten<br>in der Route n | Anhalt nicht am Zielknoten                                                           | Anhalt am Zielknoten                                                                  |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $n > 4$                             |   | -                                                                                     |
| $n = 4$                             |   |   |
| $n = 3$                             |  |  |
| $n < 3$                             | -                                                                                    |  |

Wenn es zwischen das Shuttle und Zielknoten mehr als 2 Segmente oder nur 1 Segment mit mindestens 4 Knoten, ist der ersten Halteknoten nicht der Zielknoten. Aus Versicherungsgründen müssen die aktuellen Route des Shuttles mindestens 3 Knoten erhalten, wenn das Shuttle ausgewählt werden kann.

### 5.1.2 Kriterien für den Umtausch von Aufträgen

Im Gegensatz zu den vorherigen für Auftragszuweisung ändert das Kriterien für Auftragsumtausch nicht die Anzahl und Art der Aufträge im gesamten System, sondern nur die Zuordnungsbeziehung zwischen Aufträgen und Shuttles, wodurch der Gesamtzeitverbrauch für diese Aufträge verringert wird.

#### Zeitkriterium

Da die Aufträge im System bereits festgelegt sind, hat die Erstellungszeit der Aufträge nur geringe Auswirkungen auf den Auftragsumtausch. In dieser Arbeit wird das Zeitkriterium ignoriert, weil die Auswirkungen nicht sicher kennen.

#### Sequenzkriterium

Gemäß dem Auftragsmodul des ursprünglichen Modells ist der aktuelle Zielknoten des leeren Shuttles nicht mit der Sequenz verbunden. Wenn die leere Shuttles einige Aufträge mit Sequenzanforderung an denselben IO-Knoten empfängt, sollte das Shuttle mit dem Auftrag mit der richtigen Sequenznummer zuerst den entsprechenden Zielknoten(Lagerplatz) erreichen, um zu erwarten, dass dies Auftrag so schnell wie möglich abgeschlossen werden kann. Dies garantiert jedoch nicht, dass die Gesamtzeit für diese Reihe von Aufträgen zum aktuellen Zeitpunkt minimal ist.

Aufgrund des Fehlens einer entsprechenden theoretischen Grundlage wird das Sequenzkriterium bei dem Auftragsumtausch nicht berücksichtigt.

#### Abstandskriterium

In dieser Arbeit wird hauptsächlich das Abstandskriterium im Auftragsumtauschmethode verwendet, in der Hoffnung, dass jedes Shuttle nach dem Auftragsumtausch seinen neuen Zielknoten schneller erreichen kann. Da es andere Shuttles gibt, die den Auftrag nicht ändern, ist es schwierig, die Zeit vom ersten Halteknoten des Shuttles zu einem Knoten zu schätzen. Da außerdem viele Verbrauchszeiten berechnet werden müssen, wird hier das Abstandskriterium basierend auf der Tabelle „Minimalen\_Fahrzeit“ zur Schätzung verwendet, um Berechnungszeit zu sparen.

### 5.1.3 Algorithmus von Auftragsumtausch

In diesem Abschnitt wird ausführlich beschrieben, wie die beste Kombination zwischen leeren Shuttles und ihre Aufträge basierend auf dem Abstandskriterium mit „Minimale\_Fahrzeit“ mithilfe des oben beschriebenen heuristischen Algorithmus gefunden wird.

Der Auftragsaustauschalgorithmus wird im letzten Teil der Methode „weis\_Auftrag\_zu“ eingestellt. Wenn ein Shuttle den neuen Auftrag erhält, werden alle Shuttles, die die Voraussetzungen für die Umtauschbarkeit erfüllen, und ihre Aufträge gruppiert und dann gibt diesen Shuttles neue Aufträge. Die Logik lautet wie folgt:

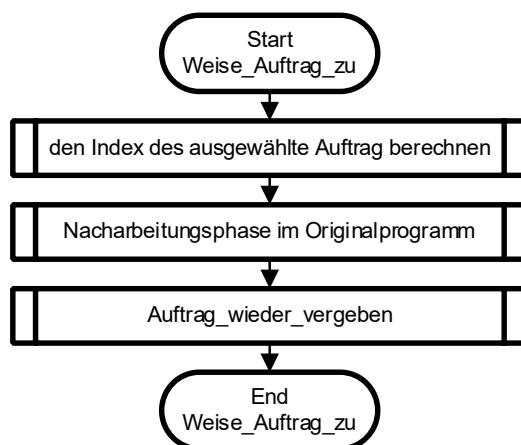


Abbildung 5-2: Flussdiagramm der Methode „weis\_Auftrag\_zu“ für die Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen

Der Algorithmus der Methode für Auftragsumtausch „Auftrag\_wieder\_vergeben“ ähnelt der Algorithmus der obigen „Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles“, die sich hauptsächlich aus der Vorbereitungsphase der Berechnungstabelle, der Suche der optimalen Kombination, dem Nachbearbeitungsteil und der endgültigen Auftragszuordnung zusammensetzt, wie unten gezeigt.

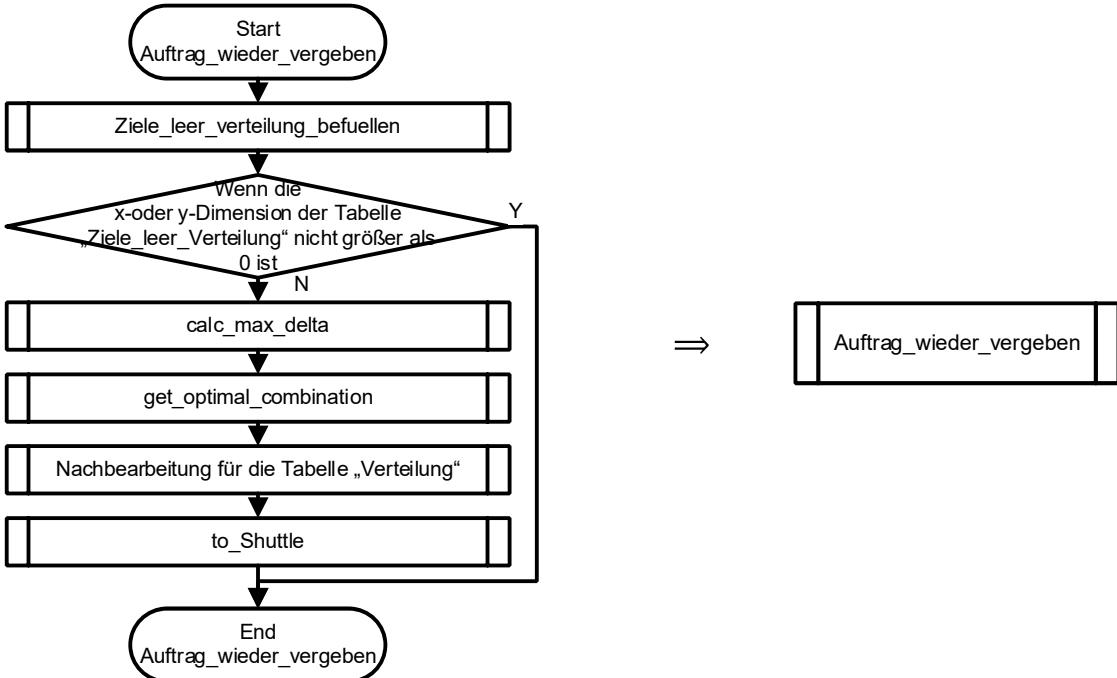


Abbildung 5-3: Flussdiagramm der Methode „Auftrag\_wieder\_vergeben“

Wenn es nur einen Shuttle in der Berechnungstabelle gibt, dessen Auftrag umgetauscht werden kann (das Shuttle, der gerade eine neue Bestellung erhalten hat), ist das Auftragsumtausch nicht sinnvoll, sodass den Schritt zum Umtausch von Aufträgen direkt überspringen werden können.

Anders als die Sammlung aller Informationen über alle Shuttles und alle nicht zugewiesene Aufträge in der Auftragsbibliothek in der Optimierung bei Auftragszuweisung unter Berücksichtigung anderer Shuttles wird in der Vorbereitungsphase der Berechnungstabelle in diesem Algorithmus die Position des ersten Halteknotens des Shuttles als Zeilenindex, und die Position des Startknotens seines Auftrags (aktueller Zielknoten) als Spaltenindex der Berechnungstabelle ausgewählt. Die Logik lautet wie folgt:

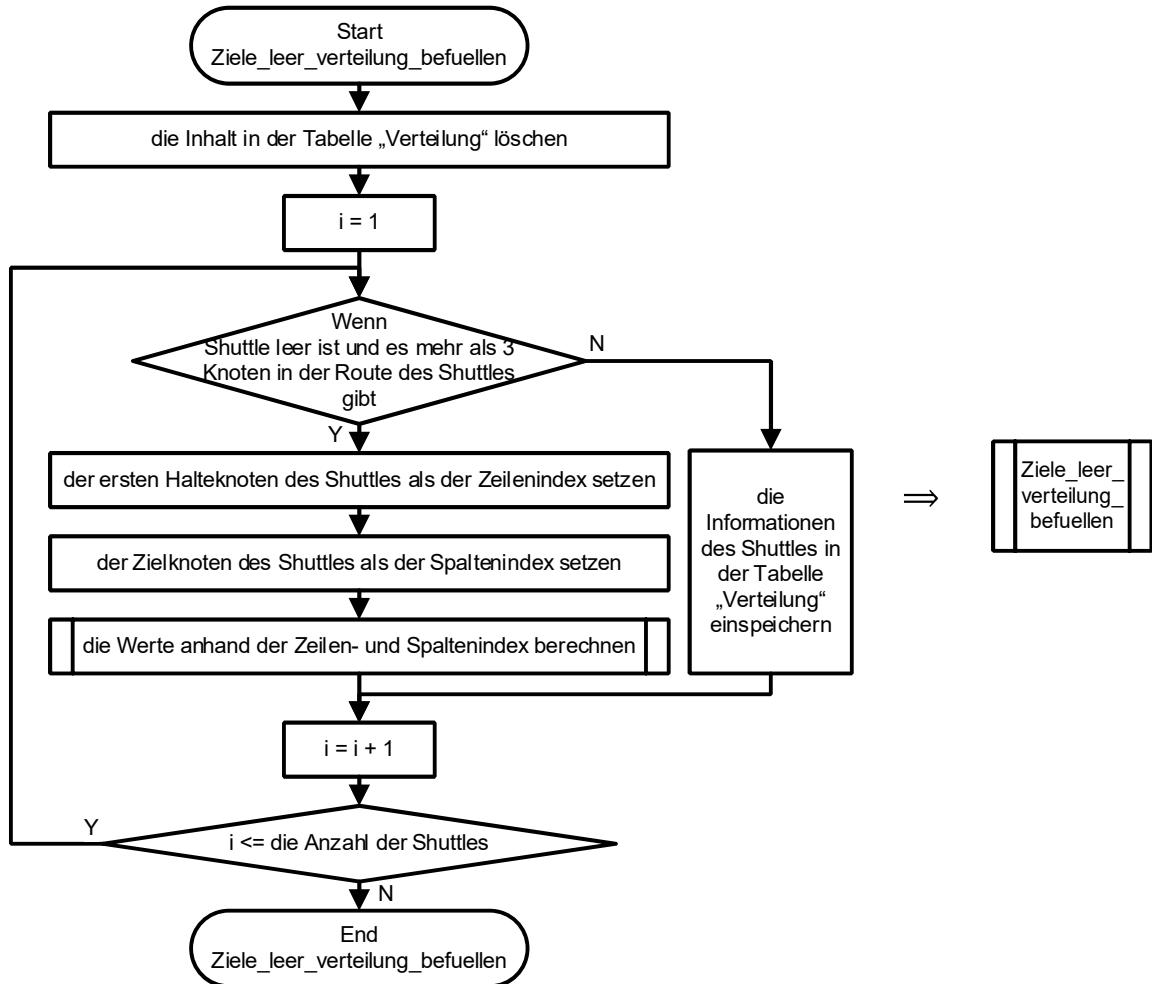


Abbildung 5-4: Flussdiagramm der Methode „Ziele\_leer\_verteilung\_befuellen“ bei Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen

Gemäß der obigen Analyse werden nur die Position von ersten Halteknoten und aktuellen Zielknoten des leeren Shuttles mit der Anzahl der Knoten der verbleibenden Route größer als 3 erfasst. Wenn der Shuttle die Bedingungen für den Auftragsumtausch nicht erfüllt, werden die relevanten Informationen des Shuttles direkt in der Tabelle „Verteilung“ eingespeichert.

Die Werte aller Elemente in der Berechnungstabelle können in der Tabelle „Minimale\_Fahrzeit“ basierend auf den Zeilen- und Spaltenindex abgefragt werden. Die Logik lautet wie folgt:

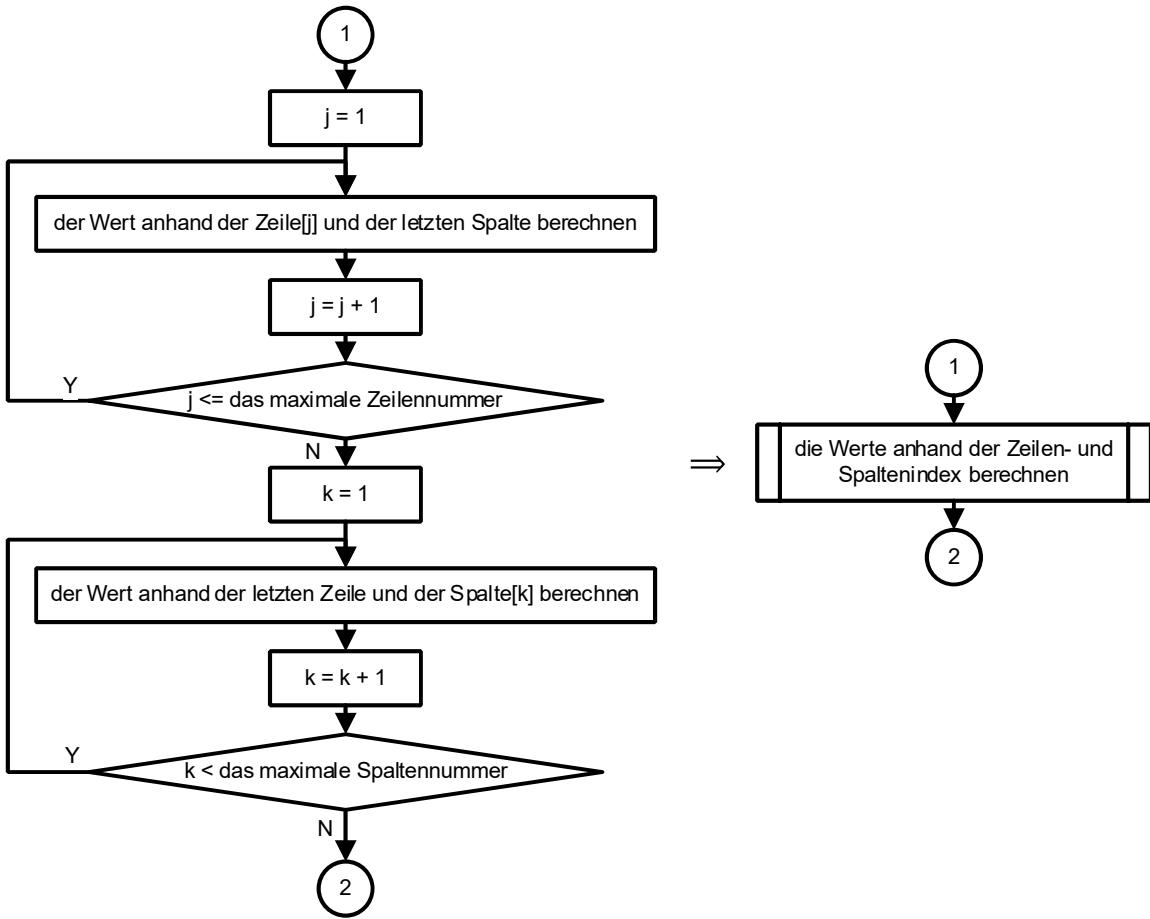


Abbildung 5-5: Flussdiagramm des Berechnung des Werts anhand Zeilenindex und Spaltenindex der Tabelle „Ziele\_leer\_verteilung“

Die Logik und Funktionen der Methode „calc\_max\_delta“ und „get\_optimal\_combination“ sind im Wesentlichen dieselben wie oben, daher werde ich hier nicht auf Details eingehen. Alle Informationen zur Zuordnung der endgültigen Aufträge der Shuttles werden in der Tabelle „Verteilung“ gespeichert.

In der Nachbearbeitungsphase werden hauptsächlich die Auftragsinformationen jedes Shuttles in der Tabelle „Verteilung“ mit den aktuellen Auftragsinformationen des Shuttles verglichen, um festzustellen, ob sich der Auftrag des Shuttles geändert hat. Die endgültige Tabelle „Verteilung“ lautet wie folgt:

|        | string 0     | object 1                     | string 2       | string 3       | string 4    | boolean 5      |
|--------|--------------|------------------------------|----------------|----------------|-------------|----------------|
| string | Shuttle_Name | Shuttle                      | Standort       | Ziel           | Ladezustand | Zielaelaendern |
| 1      | Shuttle_1    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_X:173 | Knoten_10_5_X  | Knoten_5_16_Y  | false       |                |
| 2      | Shuttle_2    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:181 | Knoten_13_10_Y | Knoten_12_16_Y | beladen     |                |
| 3      | Shuttle_3    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_X:174 | Knoten_17_4_X  | Knoten_17_5_X  | beladen     |                |
| 4      | Shuttle_4    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_X:177 | Knoten_15_14_X | Knoten_15_16_Y | false       |                |
| 5      | Shuttle_5    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:177 | Knoten_6_4_Y   | Knoten_6_3_X   | beladen     |                |
| 6      | Shuttle_6    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_X:171 | Knoten_15_9_X  | Knoten_9_14_X  | true        |                |
| 7      | Shuttle_7    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:180 | Knoten_3_5_Y   | Knoten_2_6_X   | beladen     |                |
| 8      | Shuttle_8    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_X:172 | Knoten_14_11_X | Knoten_9_16_Y  | true        |                |
| 9      | Shuttle_9    | *.Modelle.OLPS.Shuttle_X:163 | Knoten_2_6_X   | Knoten_2_7_X   | beladen     |                |
| 10     | Shuttle_10   | *.Modelle.OLPS.Shuttle_X:161 | Knoten_12_13_X | Knoten_17_9_X  | beladen     |                |
| 11     | Shuttle_11   | *.Modelle.OLPS.Shuttle_Y:178 | Knoten_4_15_Y  | Knoten_6_16_Y  | beladen     |                |
| 12     | Shuttle_12   | *.Modelle.OLPS.Shuttle_X:176 | Knoten_16_15_X | Knoten_2_12_Y  | beladen     |                |

Abbildung 5-6: Tabelle „Verteilung“ zur Aufzeichnung des Ergebnis nach dem Umtausch der Aufträge

Wenn sich der Auftrag des Shuttles geändert haben, wird durch die Methode „to\_Shuttle“ der neue Auftrag zum Shuttle zugewiesen und werden die ursprüngliche Route und die reservierten Zeitfenster gelöscht. Der Vorbereitungsprozess wird später in der Änderung der Route in Bewegung für mehreren Shuttle ausführlich beschrieben. Dies dient dazu, sich später auf Planen einer neuen Route für sich selbst oder andere Shuttles vorzubereiten. Diese Vorbereitungsphase wird später in „der Änderung der Route in Bewegung für mehreren Shuttle“ ausführlich beschrieben.

## 5.2 Routingmethode in Bewegung

### 5.2.1 Prinzip von Änderung der Route in Bewegung

Da beim Umtausch des Auftrags die Position des betreffenden Shuttles nicht unbedingt der Startknoten oder der Zielknoten der Route ist, plant das Shuttle im ursprünglichen Modell die Route basierend auf den neu erhaltenen Auftrag nicht. Wenn Aufträge zwischen Shuttles während des Betriebs umgetauscht und unmittelbar danach die Routen basierend auf neuen Aufträgen geplant werden können, müssen neue Routen für die bewegten Shuttles geplant werden.

Bei einem zeitdiskreten System befindet sich das Shuttle am Ende jedes Zeitraums in der Mitte des Knotens, und die Geschwindigkeit des Shuttles beträgt zu diesem Zeitpunkt 0. Für ein solches System kann leicht die Route während der Bewegung geändert werden. In dieser Arbeit wird jedoch ein zeitkontinuierliches System verwendet, das Beschleunigung und Verzögerung berücksichtigt. Das Shuttle befindet sich zum Zeitpunkt des Auftragswechsels möglicherweise nicht in der Mitte des Knotens und hat möglicherweise eine bestimmte Geschwindigkeit. Wie in dieser Situation die beste Route gefunden werden, ist einem schwierigen Punkt. Im Folgenden werden verschiedene Lösungen vorgeschlagen:

### **Alternative 1: das Shuttle erzwingend am nächsten Knoten anhält**

Um das Problem zu lösen, dass im ursprünglichen Modell kein Routing durchführen kann, während das Shuttle in Bewegung ist, wird das bewegte Shuttle gezwungen, am nächsten Knoten anzuhalten. Dann kann eine neue Route von dem statischen Zustand des Shuttles geplant werden. Die Logik lautet wie folgt:

---

#### **Algorithmus von zweistufigen Routingalgorithmus**

---

|                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Auslöser:</b> nach dem Umtausch von Aufträge einen neuen Zielknoten erhalten         |
| <b>Input:</b> den Zustand des Shuttles, den neue Zielknoten                             |
| 1      den nächste Halteknoten finden                                                   |
| 2      Berechnen Sie die Ankunftszeit des nächsten Halteknotens berechnen               |
| 3      Routing vom Halteknoten bis zum neuen Zielknoten durch das ursprünglichen Modell |

---

*Abbildung 5-7: Algorithmus von zweistufigen Routingalgorithmus*

Da jedes Shuttle nach dem Erhalten neues Auftrags angehalten und dann die entsprechende Route neu geplant werden muss, wird mehr Zeit verschwendet und wird das gesamte System weniger optimiert.

Zweitens ändert sich die Zeitfenster des Shuttles in der Nähe dieses Knotens, wenn das Shuttle auf einem Knoten angehalten werden muss, der nicht angehalten anhand der ursprünglichen Route werden muss. Wenn andere Shuttles diese Knoten zu diesem Zeitpunkt verwenden, kann es zu einer Kollision kommen. Diese Situation ist wie folgt:

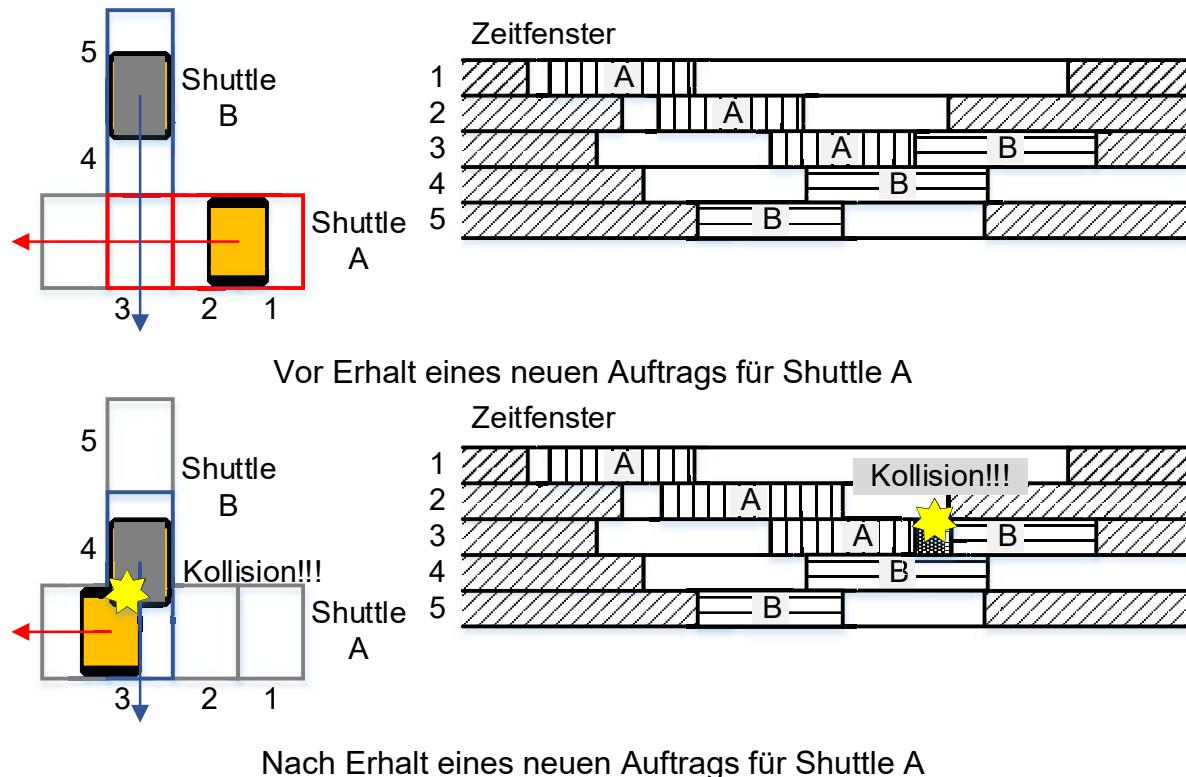


Abbildung 5-8: Kollision wegen dem erzwingenden Anhalten des Shuttles am nächsten Knoten

### Alternative 2: das anfängliche Zeitfenster erweitern

Entsprechend der Auswirkung von Beschleunigung und Verzögerung auf das Zeitfenster können erfahren werden, dass das Zeitfenster am aktuellen Knoten unsicher ist, wenn der Bewegungszustand unsicher ist. Diese Unsicherheit ist besonders ausgeprägt, wenn die Beschleunigung und Verzögerung des Shuttles gering ist. Um den Einfluss von Beschleunigung und Verzögerung auf das zukünftige Routing verhindern, wird das maximale Zeitfenster als aktuelles Knotenzeitfenster ausgewählt und die nachfolgende Route entsprechend geplant. Wie unten gezeigt:

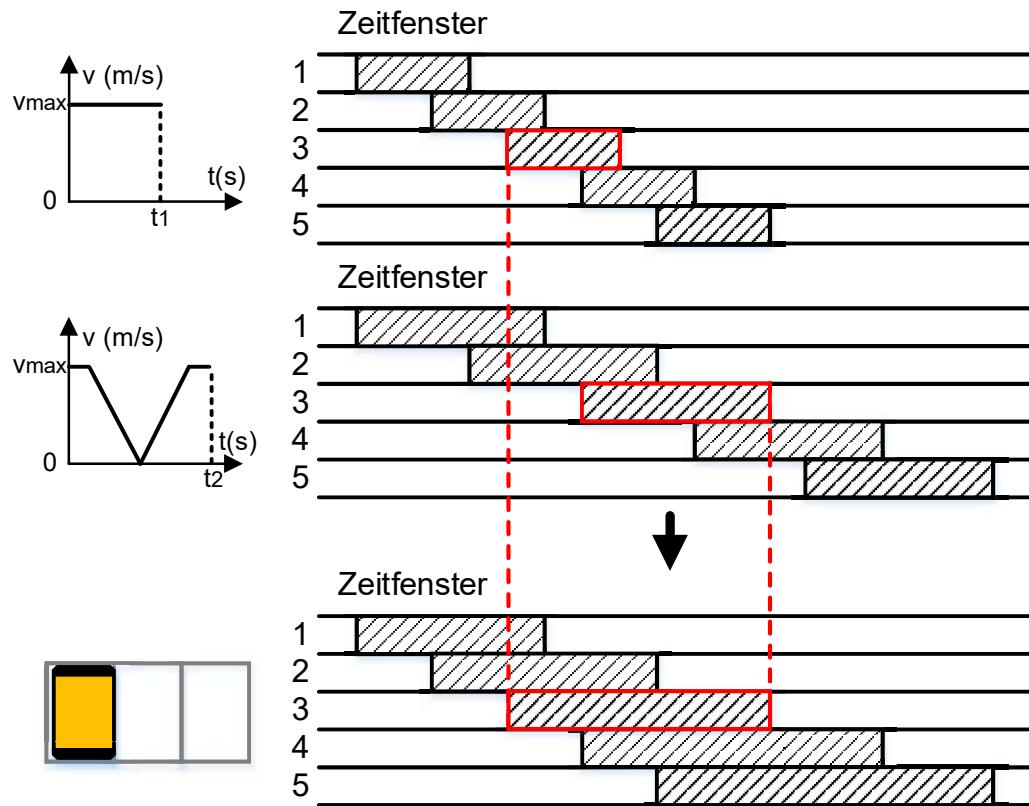


Abbildung 5-9: Erweiterung des Zeitfensters aufgrund unbekanntes Bewegungszustand

Obwohl dieses Verfahren das Problem für das Routing in Bewegung lösen kann, kann aufgrund des großen Zeitfensters am Anfangsknoten das Shuttle nicht in den optimalen Knoten eintreten kann. Wie unten gezeigt:

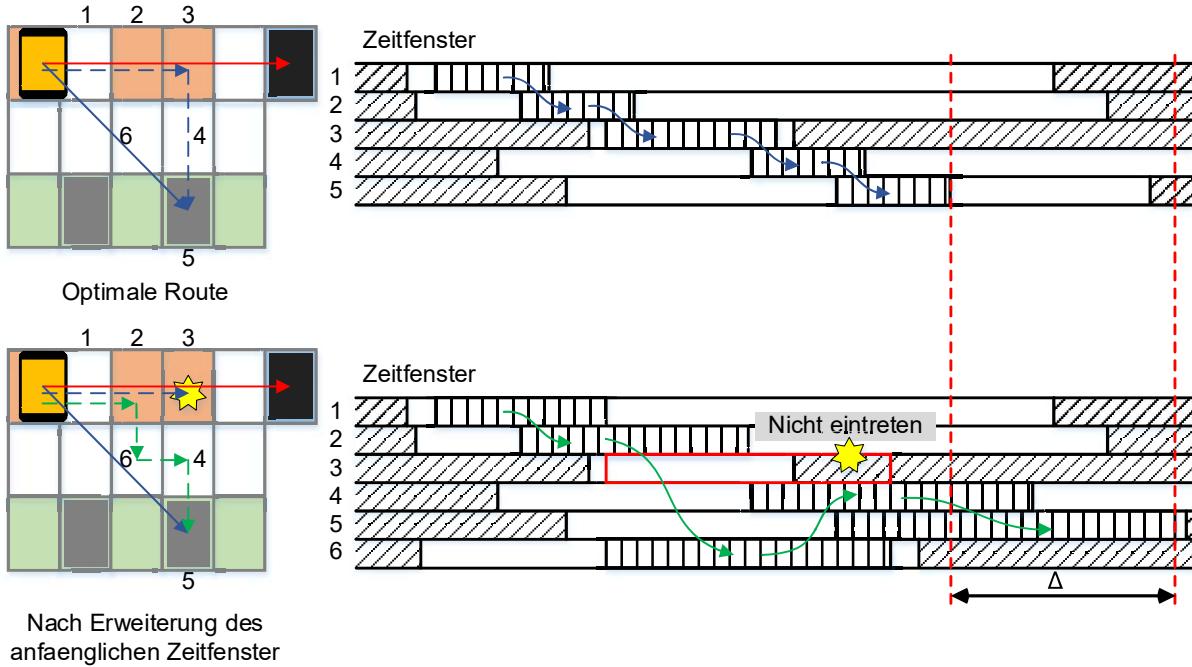


Abbildung 5-10: Die Erweiterung des anfänglichen Zeitfensters zur Verringerung der Optimalität der Route

### Alternative 3: Zweistufige Routingalgorithmus

Obwohl das aktuelle Shuttle möglicherweise eine Geschwindigkeit hat, muss sich das Shuttle zu einem bestimmten Knoten in der aktuellen Richtung bewegen und dann anhalten, unabhängig davon, ob dieser Knoten ein Zielknoten oder ein anderer Knoten ist. Daher wird einen zweistufigen Routingalgoritmus verwandt.

In der ersten Stufe wird die benötigte Zeit berechnet, um einen Zwischenknoten in seiner aktuellen Bewegungsrichtung zu erreichen. In der zweiten Stufe wird die Route vom einem statischen Zustand zum Zielknoten gemäß den aktuell reservierten Zeitfenstern geplant. Die Logik lautet wie folgt:

---

**Algorithmus von zweistufigen Routingalgorithmus**


---

**Auslöser:** nach dem Umtausch von Aufträgen einen neuen Zielknoten erhalten

**Input:** den Zustand des Shuttles, den neue Zielknoten

**Stufe 1**

- 1 Einen Halteknoten setzen
- 2 Die Ankunftszeit des Halteknotens berechnen und die entsprechenden Zeitfenster entlang der Route zum Halteknoten reservieren

**Stufe 2**

- 1 Routing vom Halteknoten bis zum neuen Zielknoten durch das ursprünglichen Modell
- 2 Alle neuen generierte Zeitfenster überprüfen, wenn keine Kollision auftritt
  - 3   | zweistufigen Routingalgorithmus erfolgreich
  - 4   | Sonst
  - 5   | zweistufigen Routingalgorithmus erfolglos

Abbildung 5-11: Algorithmus von zweistufigen Routingalgorithmen

Wenn das Shuttle am Zwischenknoten anhält, folgt die neu geplante Route in der zweiten Stufe möglicherweise immer noch der ursprünglichen Bewegungsrichtung. Für diesen Zwischenknoten ist die geplante Route nicht optimaler als die für den ersten Halteknoten der Route in der zweiten Stufe, wenn es keine Störung durch andere Shuttles gibt. Wenn das Shuttle zu früh angehalten wird, wird in der Route des Shuttles eine zusätzliche Beschleunigungs- und Verzögerungszeit hinzugefügt, wodurch sich die Ankunftszeit am Zielknoten verzögert. Die folgende Abbildung veranschaulicht anhand eines einfachen Beispiels:

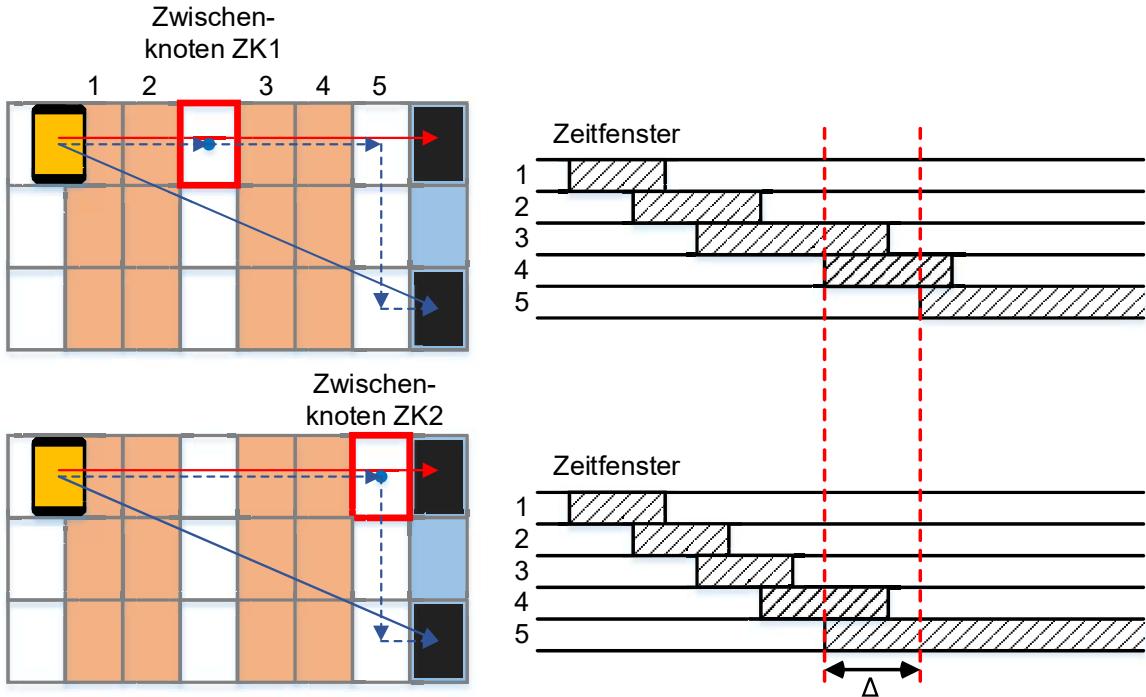


Abbildung 5-12: Der Einfluss verschiedener Zwischenknoten auf die Optimalität der Route

Wenn die Route des Shuttles durch das von anderen Shuttles reservierte Zeitfenster beeinflusst wird, z.B. bei Verwendung des CA\*-Algorithmus, wird nicht nur erwartet, dass der optimalen Zwischenknoten der ersten Knoten für Abbiegung ist. In dieser Arbeit wird die Optimalität des Zwischenknotens und der entsprechenden Route anhand des Ankunftszeit am Zielknoten beurteilt. Die Logik für die Suche des optimalen Zwischenknotens lautet wie folgt

#### Algorithmus von Auswahl des optimalen Zwischenknotens

**Auslöser:** nach dem Umtausch von Aufträgen einen neuer Zielknoten erhalten

**Input:** den Zustand des Shuttles, den neue Zielknoten

- 1 Den ersten Halteknoten finden
- 2 Der untersuchten Knoten der ersten Halteknoten ist
- 3 Wenn true schleifen
  - 4 Die Position des nächsten Halteknoten des untersuchte Knoten berechnen
  - 5 Wenn der nächsten Halteknoten existiert
    - 6 Der untersuchten Knoten der nächsten Halteknoten ist
    - 7 Das zweistufigen Routingalgorithmus anhand des untersuchte Knoten
    - 8 Wenn die neue Route optimaler ist
      - 9 Die optimale Route und der optimalen Zwischenknoten aktualisieren
    - 10 Sonst
      - 11 Schleife beenden

Abbildung 5-13: Algorithmus von Auswahl des optimalen Zwischenknotens

Durch verschiedene Zwischenknoten können verschiedene Routen und die endgültige Ankunftszeit jeder Route erhalten werden. Die Route mit der frühesten Ankunftszeit wird nach dem Ändern des Zielknotens als die beste Route angesehen.

### 5.2.2 Zweistufigen Routingalgorithmus

#### 1. Suche des ersten Halteknotens für das Shuttle: Methode „calc\_first\_changeable\_Knoten“

Der Kern der 4.2.3 Zweistufigen Routingalgorithmus besteht in der Auswahl des optimalen Zwischenknotens. Voraussetzung für den Zwischenknoten ist, dass das Shuttle mit der aktuellen Geschwindigkeit und Richtung an diesem Knoten anhalten kann. Mit der Methode „calc\_first\_changeable\_Knoten“ wird der erste Knoten berechnet, der das Shuttle in Richtung seiner Bewegung vollständig anhalten kann.

Zuerst muss die aktuelle Position des Shuttles ermittelt werden. Gemäß der obigen Analyse von Layout und Bewegungsmodul können festgestellt, dass die Position des Shuttles von seinem aktuell beanspruchten Knoten, seinem Standort des Shuttles und der belegten Länge auf dem Standort abhängt. Da das MAPF-Problem erfordert, dass die Länge des Knotens in einer beliebigen Richtung nicht kleiner als die maximale Größe des Shuttles ist, gibt es für den Standort des Knotens die folgenden zwei Möglichkeiten:

*Tabelle 5-3: die Beziehung und die Berechnungsmethode des Abstands zwischen dem aktuellen Standort des Shuttles und den beanspruchten Knoten*

| Fall | Beschreibung                                    | Abbildung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Formel zur Berechnung $L_i$                                      |
|------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1    | Der erst beanspruchten Knoten ist der Standort  | <p>Diagramm 1 zeigt einen horizontalen Gang mit vier nummerierten Knoten (4, 3, 2, i=1) von links nach rechts. Der Knoten 2 ist rot eingekennzeichnet und als "Standort" beschriftet. Ein gelbes Rechteck stellt das Shuttle dar, das genau auf dem Knoten 2 steht. Ein Pfeil weist auf den Knoten 2. Die Länge des Knotens ist als <math>L_b</math> bezeichnet. Der Abstand vom Standort bis zum i=1-Knoten ist als <math>L_i = L_2</math> bezeichnet. Weitere Abstände sind als <math>L_s</math> (Shuttle-Länge) und <math>L_k</math> (Knotenlänge) beschriftet.</p> | $L_i = \left(i - \frac{1}{2}\right) L_k - \frac{1}{2} L_s + L_b$ |
| 2    | Der zweit beanspruchten Knoten ist der Standort | <p>Diagramm 2 zeigt denselben Gang wie Diagramm 1. Der Knoten 3 ist rot eingekennzeichnet und als "Standort" beschriftet. Das gelbe Shuttle steht auf dem Knoten 3. Ein Pfeil weist auf den Knoten 3. Die Länge des Knotens ist als <math>L_b</math> bezeichnet. Der Abstand vom Standort bis zum i=1-Knoten ist als <math>L_i = L_2</math> bezeichnet. Weitere Abstände sind als <math>L_s</math> (Shuttle-Länge) und <math>L_k</math> (Knotenlänge) beschriftet.</p>                                                                                                 | $L_i = \left(i + \frac{1}{2}\right) L_k + \frac{1}{2} L_s - L_b$ |

Wobei  $L_k$  die Länge des Knotens in der aktuellen Bewegungsrichtung,  $L_s$  die Länge des Shuttles in der aktuellen Bewegungsrichtung,  $L_b$  die belegte Länge am Standort des Shuttles,  $L_i$  die Abstand zum i-ten Knoten zum aktuellen Zeitpunkt darstellt.

Von oben können den Abstand zur Mitte des ersten Halteknotens oder des vorderen Knoten ermittelt werden. Wenn der Abstand geringer ist als der kürzeste Abstand, die von der Bremse benötigt wird, kann das Shuttle an diesem Knoten nicht anhalten. Umgekehrt kann dieser Knoten ein Zwischenknoten werden. Der kürzeste Abstand für das Bremsen des Shuttles kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$L_{min,bremsen} = \frac{v^2}{2a} \triangleq L_m \quad (5-1)$$

Dabei steht  $v$  für die aktuelle Geschwindigkeit des Shuttles und  $a$  für die maximale Verzögerung in der aktuellen Bewegungsrichtung.

Gemäß der obigen Beschreibung lautet die Logik der Methode „calc\_first\_changeable\_Knoten“ zum Finden des ersten Haltepunkts wie folgt:

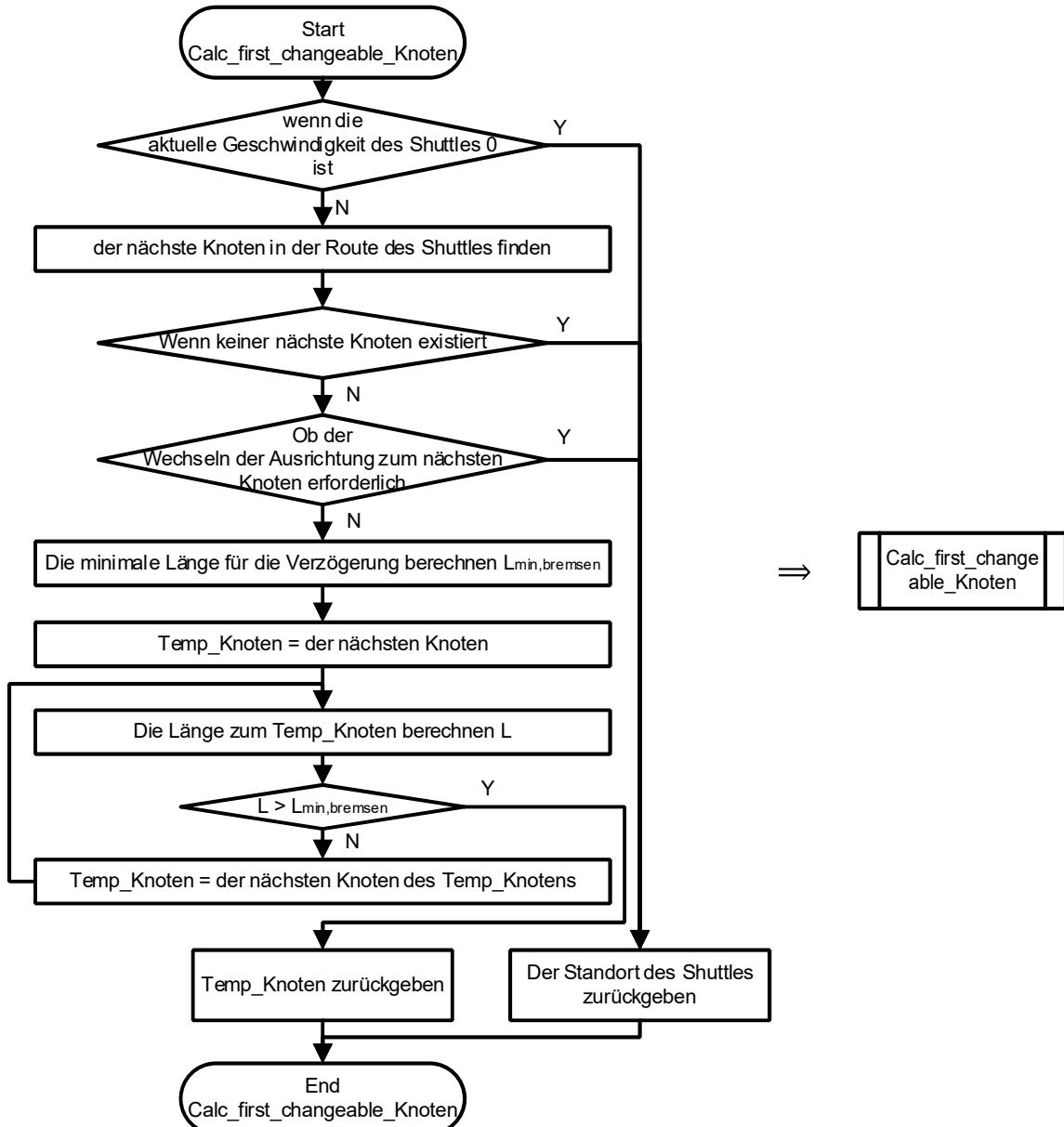


Abbildung 5-14: Flussdiagramm der Methode „calc\_first\_changeable\_Knoten“

Die obige Beurteilungsmethode gilt für den allgemeinen Fall. Um die Berechnungszeit und den Fehlern im Berechnungsprozess zu verringern, werden für einige Sonderfälle zusätzliche Beurteilungsmethoden vorgeschlagen:

- (1) Die aktuelle Geschwindigkeit des Shuttles ist 0. Das Shuttle muss sich zu diesem Zeitpunkt am Startknoten oder am Zielknoten oder am Knoten zum Wechseln der Ausrichtung befinden. Die Route kann sich vom aktuellen Knoten direkt ändern lassen.
- (2) Es gibt keinen nächsten Knoten in Bewegungsrichtung des Shuttles. Zu diesem Zeitpunkt hat sich das Shuttle an den Rand des Layouts bewegt. Das

Shuttle muss am Rand des Layouts anhalten, da es sonst das Layout überschreitet und Kollisionen oder Fehler verursacht.

- (3) Wenn der aktuelle Knoten ein Knoten mit der Anforderung der Wechsel der Ausrichtung ist, muss das Shuttles am aktuellen Knoten auf Geschwindigkeit 0 abbremsen und dann von diesem Knoten in die andere Richtung wieder beschleunigen.

Für die obigen drei Fälle wird der aktuelle Standort des Shuttles als den ersten Halteknoten gewählt.

## 2. Berechnung des Zwischenknotens: Methode „get\_Ziel\_Knoten“

Der Zwischenknoten für den zweistufigen Routingalgorithmus kann alle Knoten in der aktuellen Bewegungsrichtung sein. Die Methode „get\_Ziel\_Knoten“ berechnet die Position des Zwischenknotens anhand des ersten Halteknotens und des entsprechenden Offsets. Die Logik lautet wie folgt:

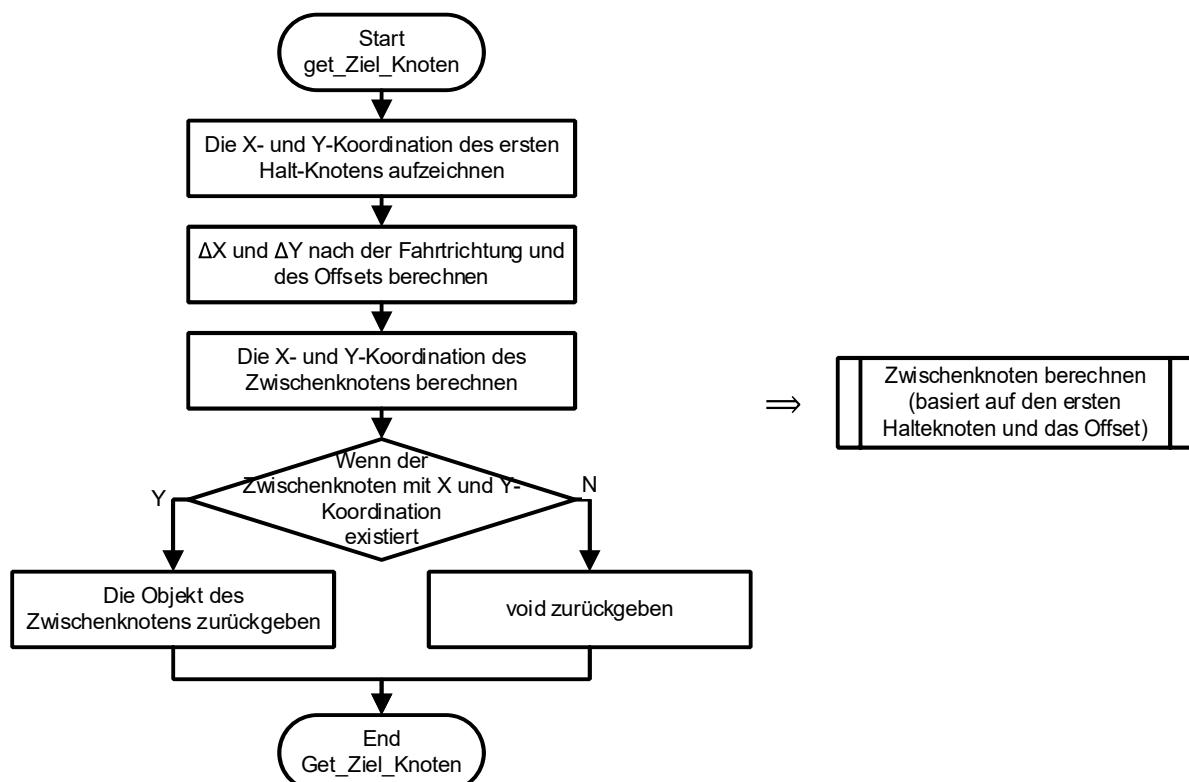


Abbildung 5-15: Flussdiagramm der Methode „get\_Ziel\_Knoten“

Aufgrund von Layout ist die Anzahl der Zwischenknoten in Bewegungsrichtung des Shuttles begrenzt. Entsprechend dem Layout des ursprünglichen Modells können maximal  $17-1=16$  Zwischenknoten in x-Richtung und maximal  $16-1=15$  Zwischenknoten

in y-Richtung erhalten werden. Wenn die berechneten Koordinaten des Zwischenknotens nicht im Layout dieses Modells enthalten sind, bedeutet dies, dass der Knoten außerhalb des Layouts liegt und das Shuttle den Knoten nicht erreichen kann. Das Shuttle muss am Rand des Layouts anhalten. Für das Shuttle muss also mindestens ein Zwischenknoten gefunden werden.

Die mögliche Anzahl von Zwischenknoten bestimmt auch den Rechenaufwand für den Algorithmus zur Suche nach der besten Route in Bewegung. Gemäß der obigen Analyse hat der Berechnung des zweistufigen Routingalgorithmus eine lineare Beziehung mit der Größe des Modelllayouts. Dies ist schneller als die zentralen Optimierungsverfahren, sodass von allgemeinen eingebetteten Prozessoren durchgeführt werden kann, was für die Anforderungen der Fabriklogistik sehr gut geeignet ist.

### **3. Löschen der Route und der reservierten Zeitfenster vor dem Routing: Methode „delete\_Segment“**

In der frühen Phase des zweiphasigen Routingalgorithmus müssen die vorher reserviert Zeitfenster für dieses Shuttle gelöscht werden. Einerseits ist die vorher reserviert Zeitfenster bei der Planung der neuen Route sinnlos, andererseits wirkt sich die auf das nachfolgende Routing aus und führt zu den Scheitern des Routings. Daher werden vor der Erstellung der neuen Route die entsprechenden Zeitfenster gelöscht.

Obwohl am einigen Knoten in der Nähe des aktuellen Standorts die Zeitfenster für das Shuttle eingehalten werden sollte, um anzugeben, dass das Shuttle diese Knoten zu diesem Zeitpunkt besitzt, wird später in dem Routingalgorithmus von der ersten Stufe ein klares Zeitfenster für diese Knoten des aktuellen Knotens des Shuttles eingesetzt. Daher können hier alle Zeitfenster für dieses Shuttle gelöscht werden. Die Logik lautet wie folgt:

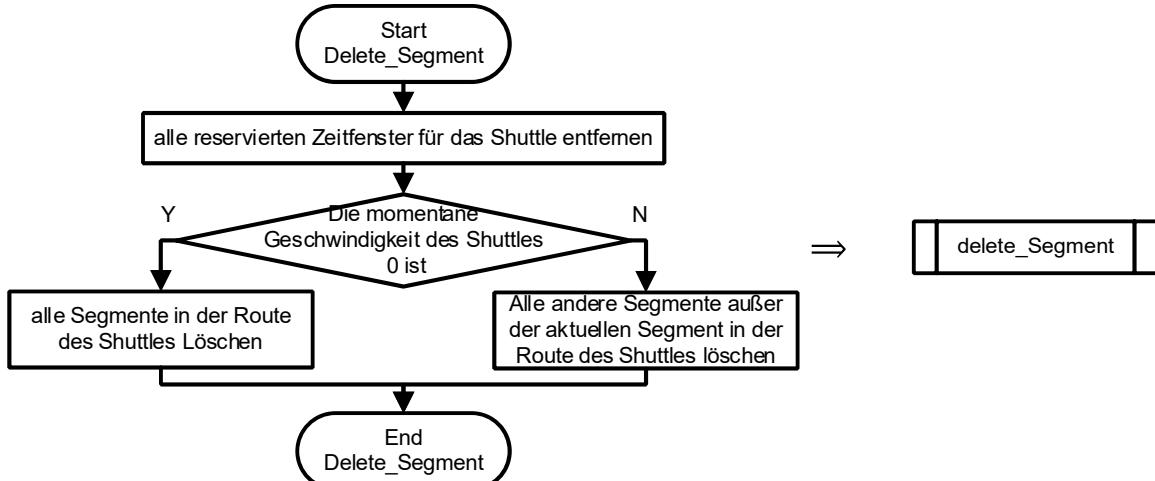


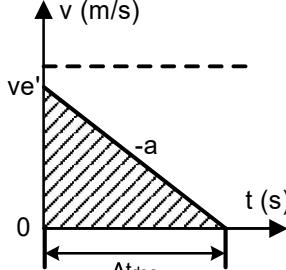
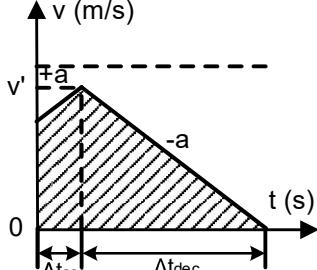
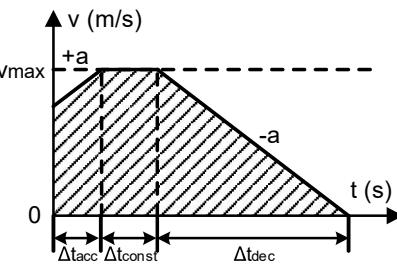
Abbildung 5-16: Flussdiagramm der Methode „delete\_Segment“

Um zu verhindern, dass das Shuttle beim Ankunft des Knotens den Wechseln der Ausrichtung oder die Methode für die Ankunft am Zielknoten auslöst, müssen auch ein Teil der vorher generalisierte Route des Shuttles gelöscht werden, da die Auslösung der Methoden von der Route des Shuttles gesteuert werden. Da am aktuellen Segment des Shuttles die Methoden für Ausrichtungswechseln und für die Ankunft des Zielknotens nicht ausgelöst werden, lässt sich nur der Teil der Route für anderen Segmenten löschen.

#### 4. Berechnung der Zeitfenster für die Route ersten Stufe: Methode „Ankunft\_Zeit\_berechnen“

Diese Methode wird hauptsächlich verwendet, um die Ankunftszeit des Zwischenknotens und das Zeitfenster auf jedem Knoten in der ersten Stufe zu berechnen. Zunächst müssen der Bewegungszustand des Shuttles in der ersten Stufe anhand der aktuellen Geschwindigkeit und Richtung des Shuttles, der Position des Zwischenknotens und der maximalen Beschleunigung und Verzögerung des Shuttles bestimmt werden, wie unten gezeigt:

Tabelle 5-4: der Bewegungszustand des Shuttles in der ersten Stufe

| Fälle                          | $v_{max}$ erreichen                                                                             |                                                                                                   |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                | Nein                                                                                            | Ja                                                                                                |
| Nein                           |  <p>Fall 1</p> |  <p>Fall 2</p> |
| Beschleunigungsphase erreichen | -                                                                                               |  <p>Fall 3</p> |

Durch den Gesamtbewegungszustand des Shuttles in der ersten Stufe lassen sich die Länge der Beschleunigungs-, Gleichmäßige- und Verzögerungsphase angeben.

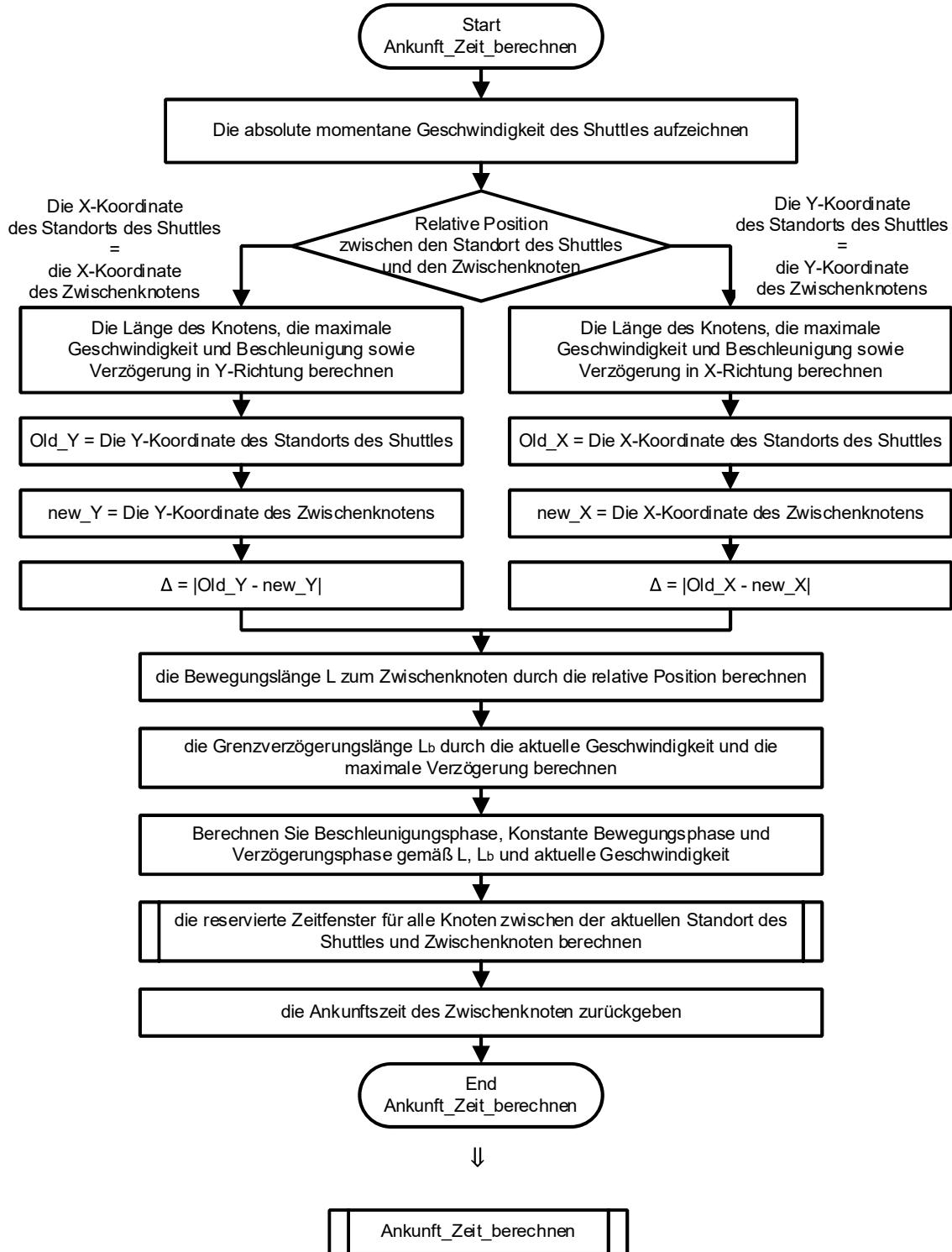


Abbildung 5-17: Flussdiagramm der Methode „Ankunft\_Zeit\_berechnen“

Gemäß dem berechneten  $\Delta$ -Wert kann bekannt sein, dass insgesamt  $\Delta+1$  Knoten vom aktuellen Knoten zum Zwischenknoten enthalten sind. Für diese Knoten müssen Zeitfenster separat reserviert werden. Die Berechnung der Zeitfenstergröße basiert auf

dem Eintrittszeitpunkt und dem Austrittszeitpunkt des Shuttles. Die Logik lautet wie folgt:

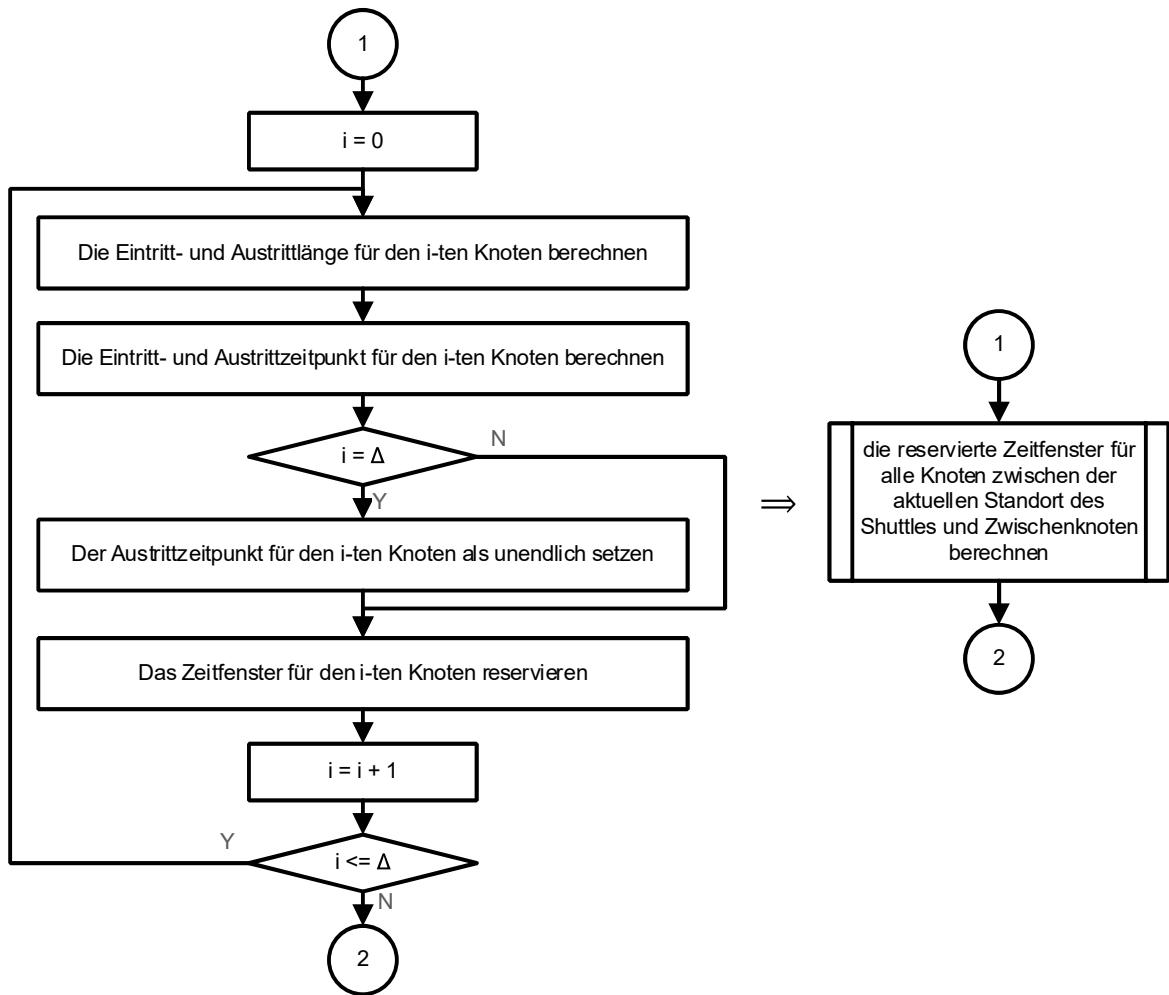


Abbildung 5-18: Flussdiagramm der Berechnung der reservierten Zeitfenster für alle Knoten zwischen dem aktuellen Standort des Shuttles und Zwischenknoten

## 5. Routing in der zweiten Stufe für die Suche der optimalen Route

In diesem Teil wird ausgehend von der Ankunftszeit der Zwischenknoten in der ersten Stufe der Routingalgorithmus des ursprünglichen Modells verwendet, um die Route in der zweiten Stufe zu suchen. Die Logik lautet wie folgt:

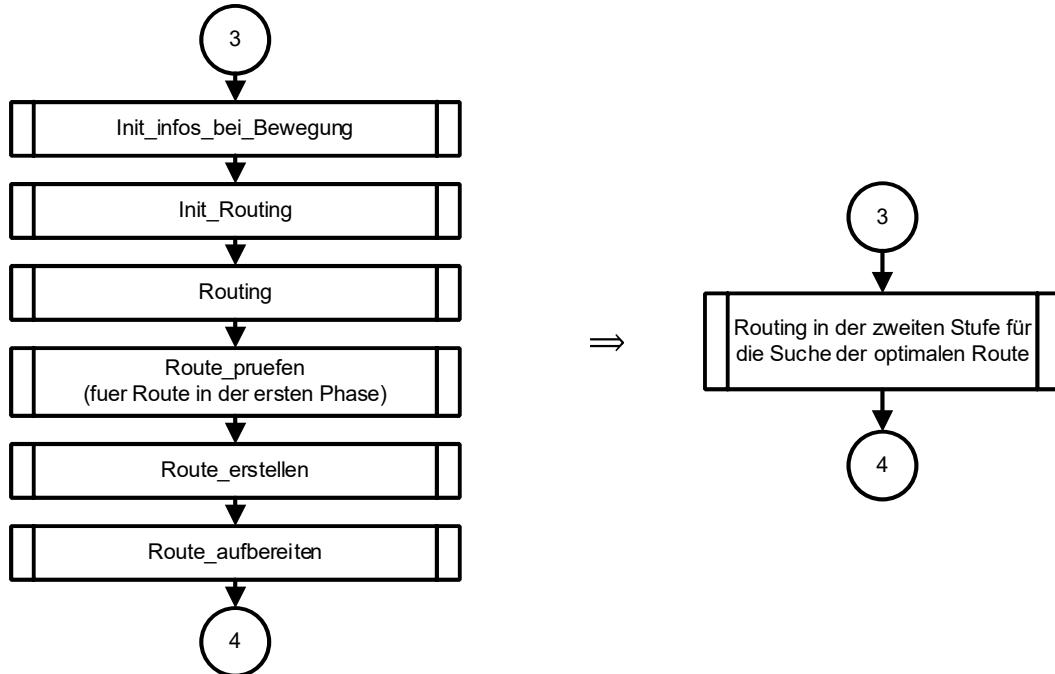


Abbildung 5-19: Flussdiagramm der Routingphase in der zweiten Stufe für die Suche der optimalen Route

Um die Voraussetzungen des ursprünglichen Routingmodells zu erfüllen, wird hier eine Methode „init\_infos\_bei\_Bewegung“ erstellt, um die notwendigen Parameter direkt in die Tabelle „Informationen“ in dem Routingmodul einzugeben. Die Hauptparameter sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 5-5: Hauptparameter für die Tabelle „Informationen“

| Name                     | Beschreibung                          |
|--------------------------|---------------------------------------|
| Startzeit                | Die Ankunftszeit des Zwischenknoten   |
| Start_Knoten             | Zwischenknoten                        |
| Ausrichtung_Start_Knoten | Die aktuelle Ausrichtung des Shuttles |
| Ziel_Knoten              | Startknoten des neuen Auftrags        |
| Ausrichtung_Ziel_Knoten  | Die Ausrichtung des Zielknotens       |
| Ladezustand              | leer                                  |

Nachdem die Route generiert wurde, muss die Kollision mit anderen Routen überprüft werden. Da der Routingalgorithmus im ursprünglichen Modell den Status der erfolgreichen oder erfolglosen Suche der Route zurückgibt, wird hier hauptsächlich der Test für die erste Stufe durchgeführt. Um sicherzustellen, dass sich alle Shuttles gemäß dem reservierten Zeitfenster bewegen können, wird der unter genannten "Route\_pruefen" verwendet, um alle Zeitfenster zu überprüfen.

## **6. Überprüfung der Route generalisiert von zweistufige Routingalgorithmen: Methode „Route\_pruefen“**

Die Methode „Route\_pruefen“ bestimmt, ob der neu generierte Route mit anderen Route in Kollision steht. Um die Logik zu vereinfachen und die Stabilität des Systems zu erhöhen, testet dieses Modell die Rationalität aller Routen auf dem Ebene von Zeitfenster. Die Logik lautet wie folgt:

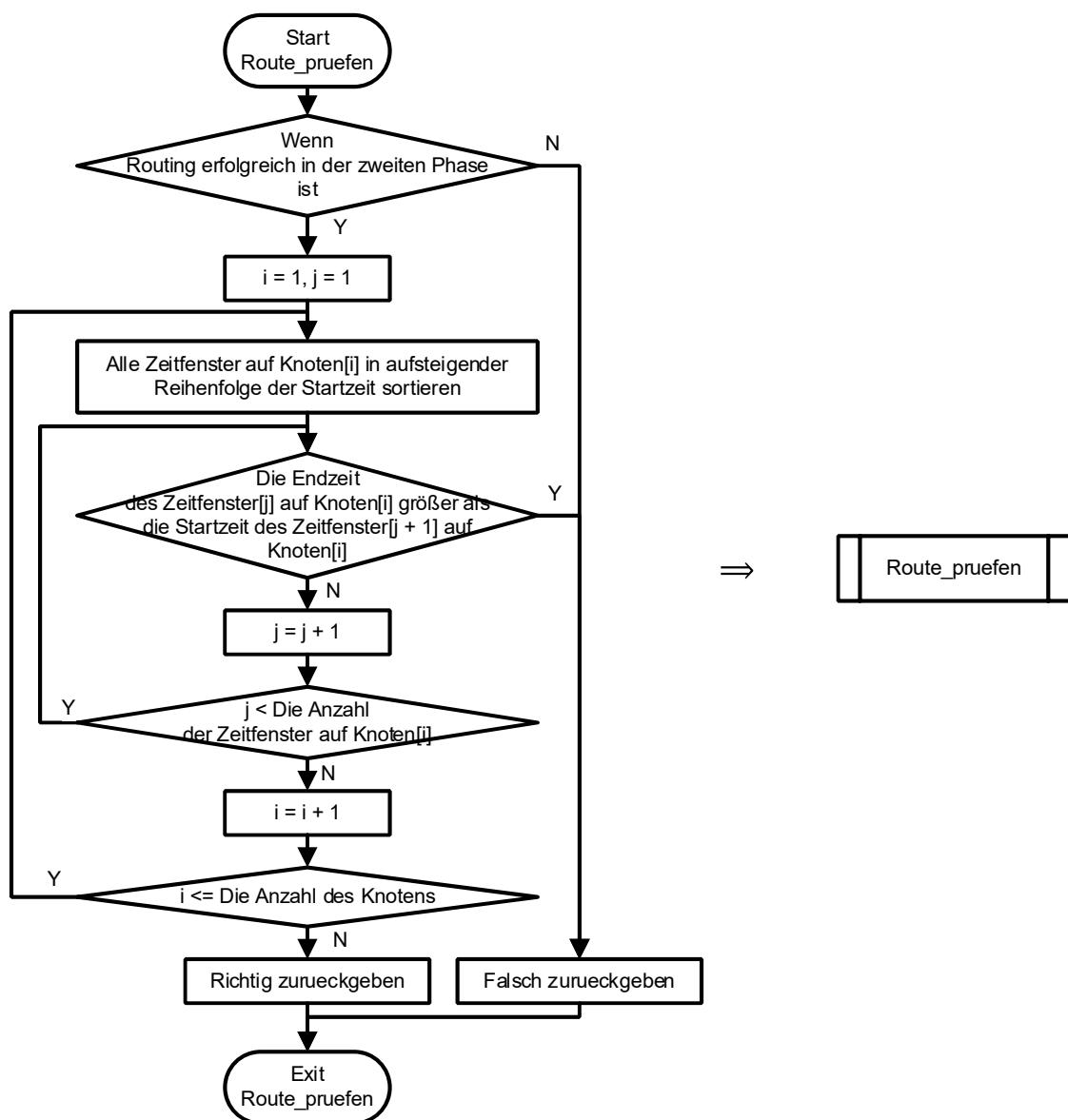
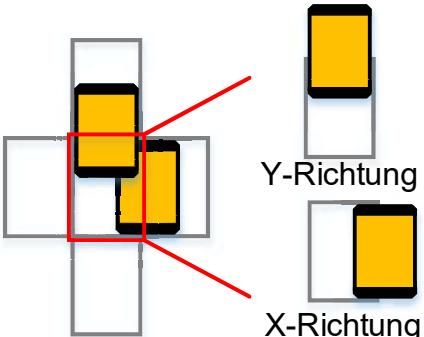


Abbildung 5-20: Flussdiagramm der Methode „Route pruefen“

Dieser Methode überprüft die Route, indem sich die Zeitfenster auf einem Knoten überlappen. Da in diesem Modell die Zeitfenster auf jedem Knoten in aufsteigender Reihenfolge von Startzeit des Zeitfensters sortiert sind, können die Überlappungen des Zeitfensters bestimmen, solange die Startzeit des nächsten Zeitfensters kleiner der Endzeit des vorherigen Zeitfensters auf demselben Knoten ist.

Wenn sich die Zeitfenster eines Knotens überlappen, bedeutet dies, dass das nächste Shuttle, das den Knoten besetzen muss, eintreten kann, bevor das vorherige Shuttle, das den Knoten besetzt hat, verlassen hat. Gemäß diesem Modell kann es zu einer Kollision kommen. Auf den x-Weg und y-Weg der Knoten gibt es unterschiedliche Shuttles. Obwohl dies Phänomen in der Simulation möglich ist, wird dies in der Realität nicht passieren. Diese Situation ist wie folgt:

Tabelle 5-6: Verschiedene Probleme in der Simulation und in der Realität

| Problem            | In der Simulation                                                                                                                 | In der Realität                                                                                                         |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kreuzungskollision |  <p>Y-Richtung<br/>X-Richtung</p> <p>möglich</p> |  <p>Kollision!!!</p> <p>Kollision</p> |
| Chase              |  <p>Warten</p> <p>Warten</p>                   |  <p>möglich</p>                    |

In der eigentlichen Simulation kann das nachfolgender Shuttle nicht gemäß seinem Zeitfenster bewegt, da ein Knoten nur gleichzeitig ein Shuttle besetzen darf, wodurch das Shuttle sich am nachfolgenden Knoten verspäten. Dies kann sich auf dem späteren Routing und der Bewegung anderer Shuttles auswirken, was später ausführlich beschrieben wird.

### 5.2.3 Änderung der Route in Bewegung für einen Shuttle

In diesem Abschnitt wird Routingalgorithmus nach der Änderung des Zielknoten und der entsprechenden Route im System mit nur einem Shuttle getestet, um die Funktionsfähigkeit des zweistufigen Routingalgorithmus zu überprüfen. In dieser Arbeit wird zum Zeitpunkt des Umtauschs der Aufträge keine neue Route für das betroffene Shuttle sofort geplant. Wenn das Shuttle jedoch einen Knoten erreicht und die Methode „bei\_Ankunft\_Knoten“ ausgelöst wird, vergleichen Sie die Route des Shuttles mit dem Zielknoten des Shuttles, um festzustellen, ob eine neue Route benötigt wird. Wenn der letzte Knoten in der Route des Shuttles zu diesem Zeitpunkt nicht der aktuelle Zielknoten ist, hat sich der Auftrag des Shuttles geändert, und zu diesem Zeitpunkt muss eine

neue Route für das Shuttle geplant werden. Die Logik der Methode „bei\_Aankunft\_Knoten“ lautet wie folgt:

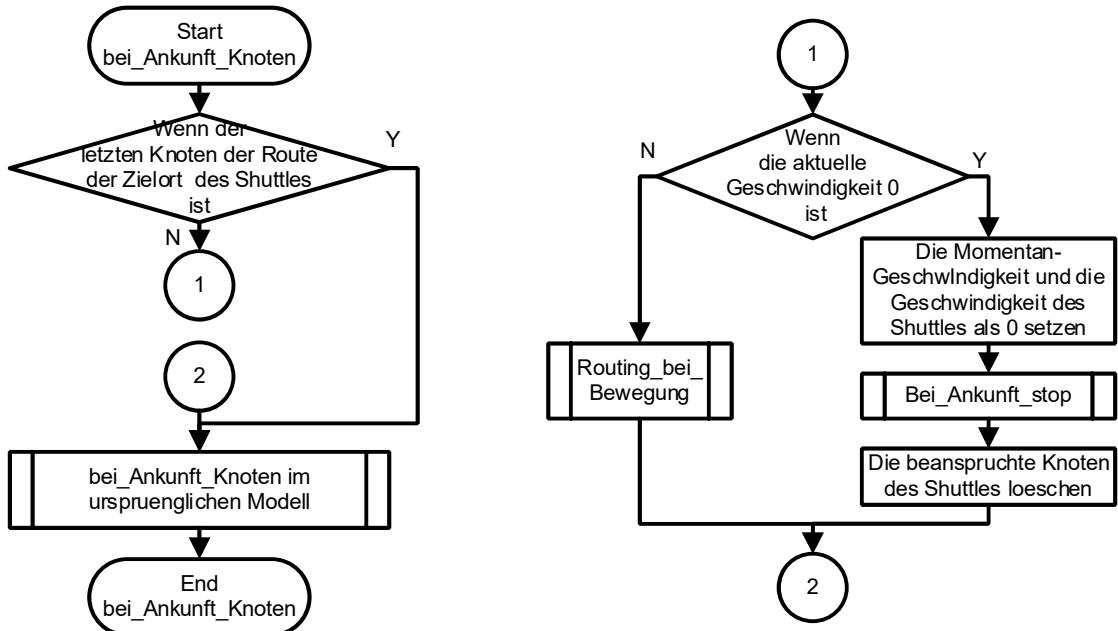


Abbildung 5-21: Flussdiagramm der Methode „bei\_Aankunft\_Knoten“ für die Optimierung durch den Umtausch der Aufträge

Wenn die Änderung des Zielknotens des Shuttles erkannt wird, wird die Operation zu diesem Zeitpunkt basierend darauf ausgewählt, ob die aktuelle Geschwindigkeit des Shuttles 0 ist. Die Operation wird wie in der rechten Abbildung oben gezeigt.

Wenn die Geschwindigkeit des Shuttles 0 ist, befindet sich das Shuttle zu diesem Zeitpunkt entweder am Startknoten oder am Zielknoten oder an dem Knoten, der die Ausrichtung des Shuttles wechselt werden muss. Gemäß der obigen Analyse des ursprünglichen Modells muss auf dem aktuellen Standort des Shuttles ein ausreichend großes Zeitfenster vorhanden sein, um jede Bewegung auf diesem Knoten abzuschließen. Daher kann zu diesem Zeitpunkt das ursprüngliche Routing-Modul fast direkt verwendet werden, ohne die Kollision am aktuellen Standort zu überprüfen. In diesem Modell wurde eine Methode „bei\_Aankunft\_stop“ erstellt, um das Routing für das Shuttle ohne Geschwindigkeit auszuführen.

Wenn die Geschwindigkeit des Shuttles nicht 0 ist, ist ein zweistufiger Routingalgorithmus für das Planen neuer Route erforderlich. In dieser Arbeit wird die Methode „Routing\_bei\_Bewegung“ zur Implementierung der zweiphasigen Routingalgorithmus eingerichtet. Um die Methode „Routing\_bei\_Bewegung“ zu implementieren und die Komplexität jeder Methode zu reduzieren, wurden die folgenden anderen Methoden erstellt. Diese Methoden werden nachstehend ausführlich beschrieben.

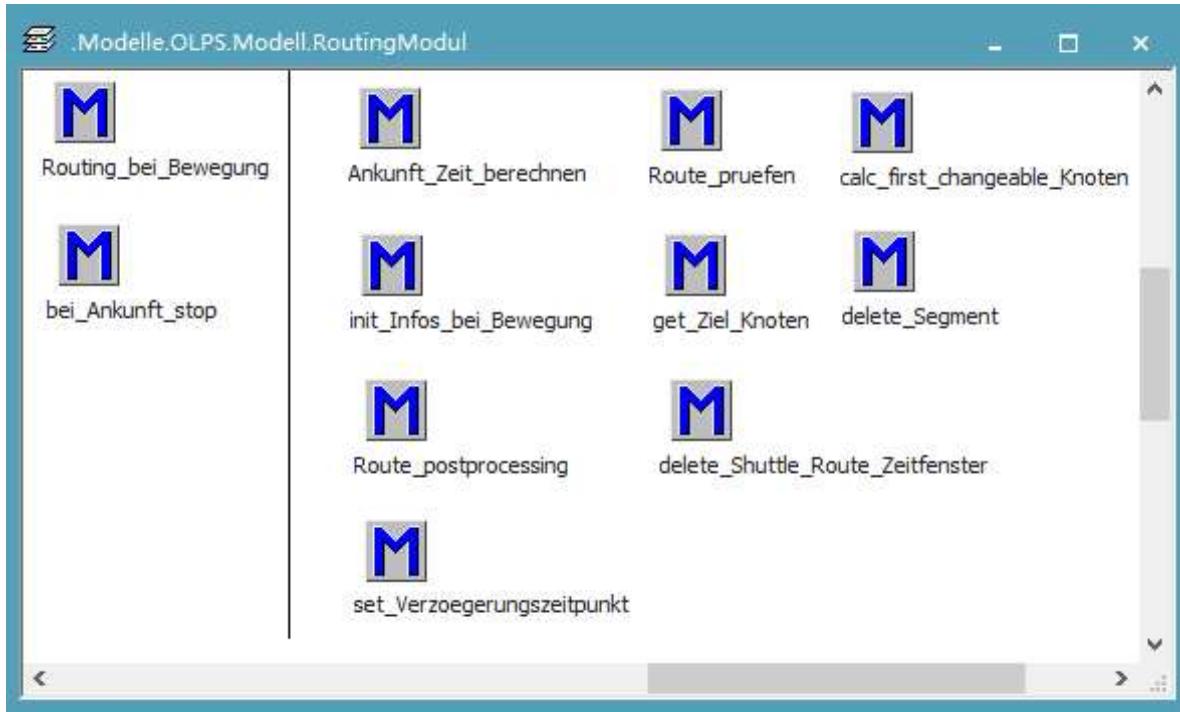


Abbildung 5-22: Methoden für zweistufige Routing

Da die zweite Stufe in dem zweistufigen Routingalgorithmus die Voraussetzungen vom Routing-Modul im ursprünglichen Modell vollständig erfüllt, wird das Routing-Modul im ursprünglichen Modell in der zweiten Stufe vollständig verwendet. Das Folgende beschreibt hauptsächlich den Algorithmus der ersten Stufe und das Verfahren zum Bestimmen der optimalen Route.

#### die Geschwindigkeit des Shuttles 0 (bei\_Aankunft\_stop)

Wenn die aktuelle Geschwindigkeit des Shuttles zu diesem Zeit 0 ist, wird der zukünftige Bewegungszustand des Shuttles am aktuellen Knoten bestimmt (beschleunigt, um den Knoten zu verlassen), sodass der Routingalgorithmus des ursprünglichen Modells fast direkt verwendet werden kann.

Erstellen Sie die Informationstabelle durch die Methode "Init\_infos\_beim\_Bewegen", um das Routing im Originalmodells vorzubereiten. Die Logik lautet wie folgt:

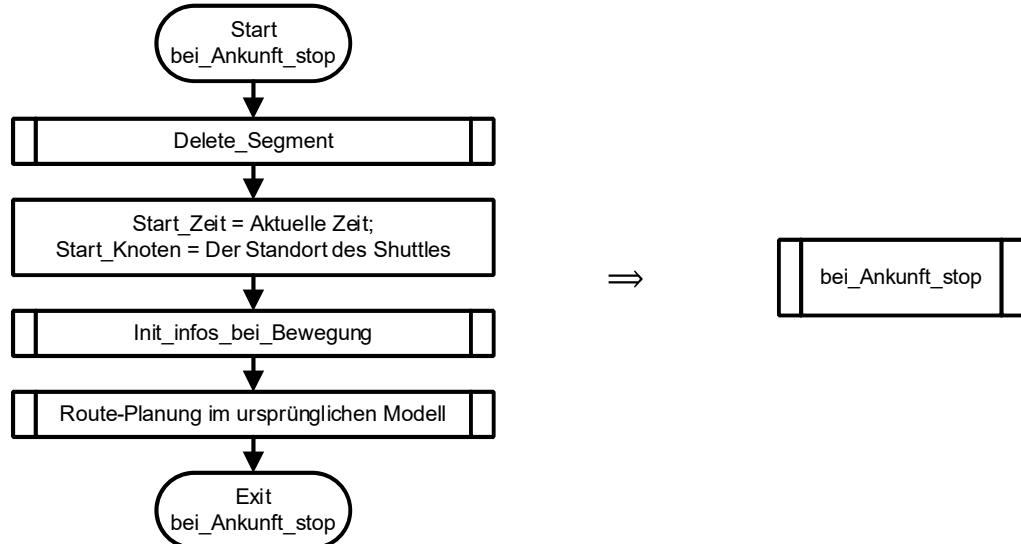


Abbildung 5-23: Flussdiagramm der Methode „bei\_Aankunft\_stop“

Es ist zu beachten, dass vor der Verwendung von Routing im ursprünglichen Modell die alte Route und die Zeitfenster gelöscht werden müssen, da sonst das nachfolgende Routing fehlschlagen wird.

### die Geschwindigkeit des Shuttles nicht 0 (Routing\_bei\_Bewegung)

Wenn die Geschwindigkeit des Shuttles nicht 0 ist, wird der zweistufigen Routingalgorithmus verwendet. Der Algorithmus ist wie unten gezeigt

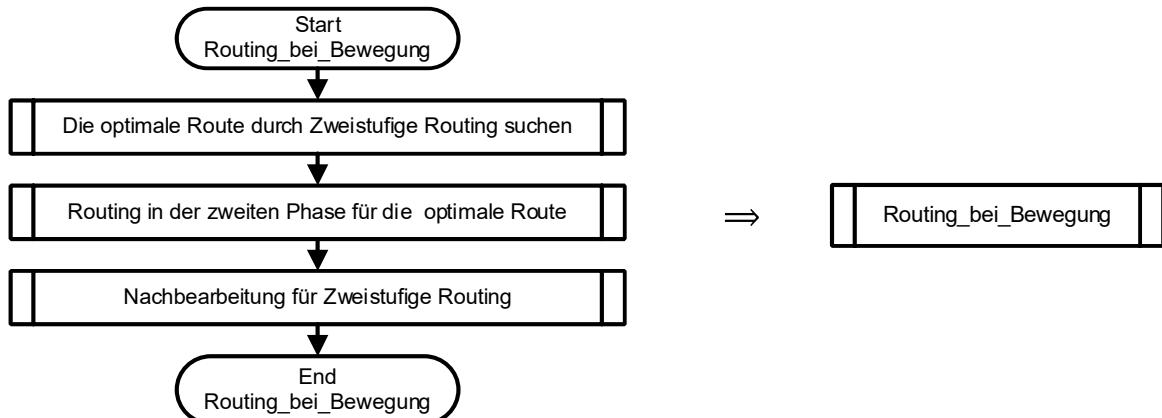


Abbildung 5-24: Flussdiagramm der Methode „Routing\_bei\_Bewegung“

#### 1. Suche des optimalen Zwischenknotens

Zuerst müssen der optimale Zwischenknoten bestimmt werden. Im diesem Modell wird zunächst durch die Methode „calc\_first\_changeable\_Knoten“ der ersten Haltepunkte in der aktuellen Bewegungsrichtung des Shuttles erhalten. Durch die Methode „get\_Ziel\_Knoten“ werden andere haltbare Zwischenknoten berechnet. Dann werden

die auf verschiedenen Zwischenknoten basierten Ankunftszeiten am Zielknoten vergleicht, um den besten Zwischenknoten und die beste Route herauszufiltern. Die Logik lautet wie folgt:

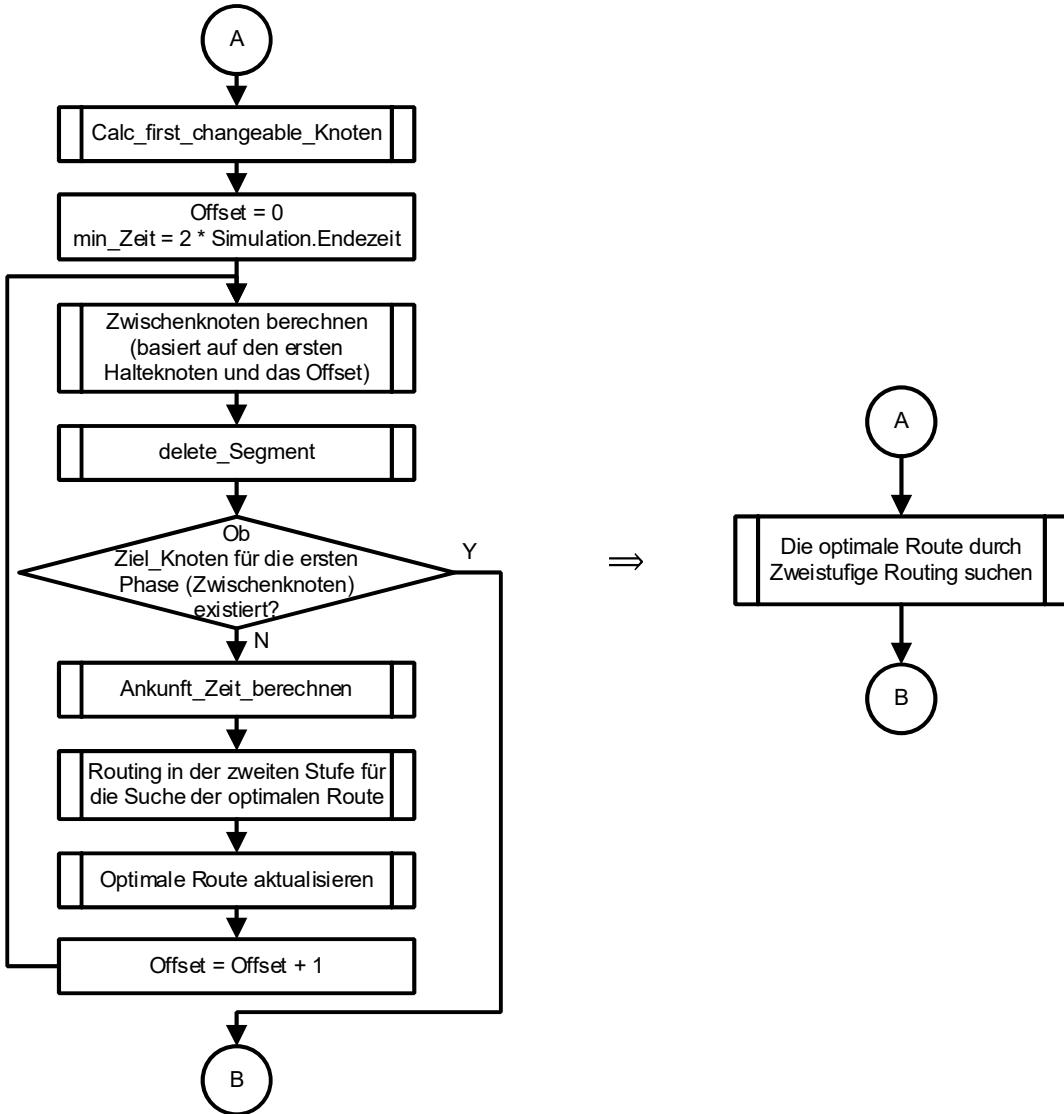


Abbildung 5-25: Flussdiagramm der Suchphase der optimalen Route durch zweistufige Routing

Wenn ein zweistufiger Routingalgorithmus abgeschlossen ist, muss die Kompatibilität der generalisierten Route mit anderen Routen getestet werden. Die Voraussetzung des Kompatibilitätstests ist, dass die zweite Stufe des Routingalgorithmus erfolgreich ist. Nur wenn in der ersten Stufe keine Kollision auftritt, und das Routing in der zweiten Stufe erfolgreich ist, ist die zweistufiger Routingalgorithmus erfolgreich und kann optimal sein.

Wenn der Zielknoten über den aktuellen Pfad früher erreicht werden kann, ist der aktuelle Zwischenknoten besser als der vorherige Zwischenknoten. In der Aktualisierungsphase werden der bisher besten Zwischenknoten und die beste Ankunftszeit aufzeichnen. Die Logik lautet wie folgt:

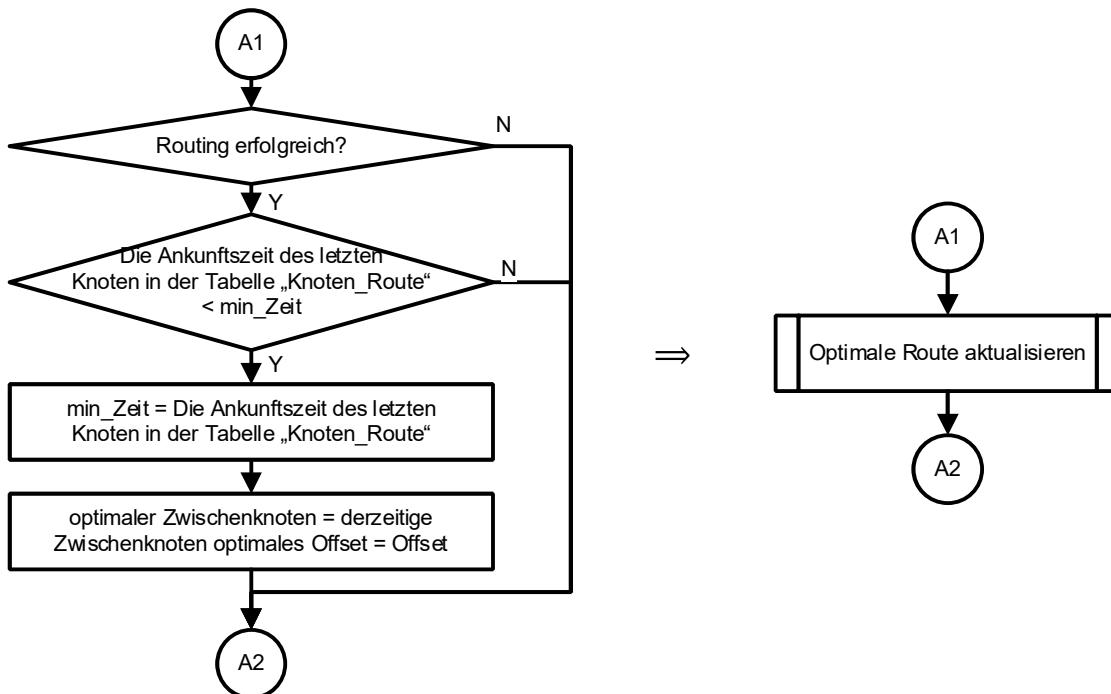


Abbildung 5-26: Flussdiagramm der Aktualisierungsphase zur Suche der optimalen Route

Es gibt ein Schlecht überlegte Aspekt im Logik der Aktualisierungsphase. Wenn die Ankunftszeiten des Zielknotens, die auf verschiedenen Zwischenknoten basieren, gemäß der obigen Logik gleich sind, wird nur der Zwischenknoten ausgewählt, der dem aktuellen Standort des Shuttles am nächsten liegt. Dies kann dazu führen, dass der Verkehr in der Nähe des aktuellen Knotens des Shuttles überlastet wird, was sich auf die nachfolgende Planung der Routen auswirkt und vielleicht die globale Optimalität verringert. Hierfür gibt es einige mögliche Lösungen, wie unter gezeigt werden:

- Unter diesen Zwischenknoten mit derselben optimalen Ankunftszeit wird ein Knoten zufällig als optimaler Zwischenknoten ausgewählt. Aufgrund der Zufälligkeit der Auswahl kann es möglich sein, die lokale Überlastung in der Nähe des aktuellen Knotens des Shuttles zu verringern und die globale Optimalität des Systems zu erhöhen. Da die Generierung von Aufträgen und die Auswahl von Lagerplatz mit zufälligen Werten zusammenhängen, will in diesem Modell die Reihenfolge der „Seed“ für die zufälligen Werte nicht beeinflussen werden. Daher wird diese Methode hier nicht verwendet.

- b) Bei Auswahl des optimalen Zwischenknotens wird der Überlastungsgrad des Systems berücksichtigt, um den Gesamtüberfüllungsgrad des Systems ausgewogener zu machen. Anhand der Simulation können festgestellt werden, dass der Verkehr in einigen Bereichen sehr überlastet ist und in anderen Bereichen unterlastet ist. entsprechend der Überlastungsgrad können der am weitesten vom überlasteten Bereich entfernten Knoten als den optimalen Zwischenknoten ausgewählt werden. Da die Überlastung des Systems nicht im Mittelpunkt dieser Studie steht, wird sie hier nicht weiter vorgestellt.

## 2. Bestimmen der optimalen Route

Nachdem den besten Zwischenknoten gesucht wurden, können der zweistufigen Routingalgorithmus verwendet werden, um den besten Route zu erstellen. Die Logik lautet wie folgt:

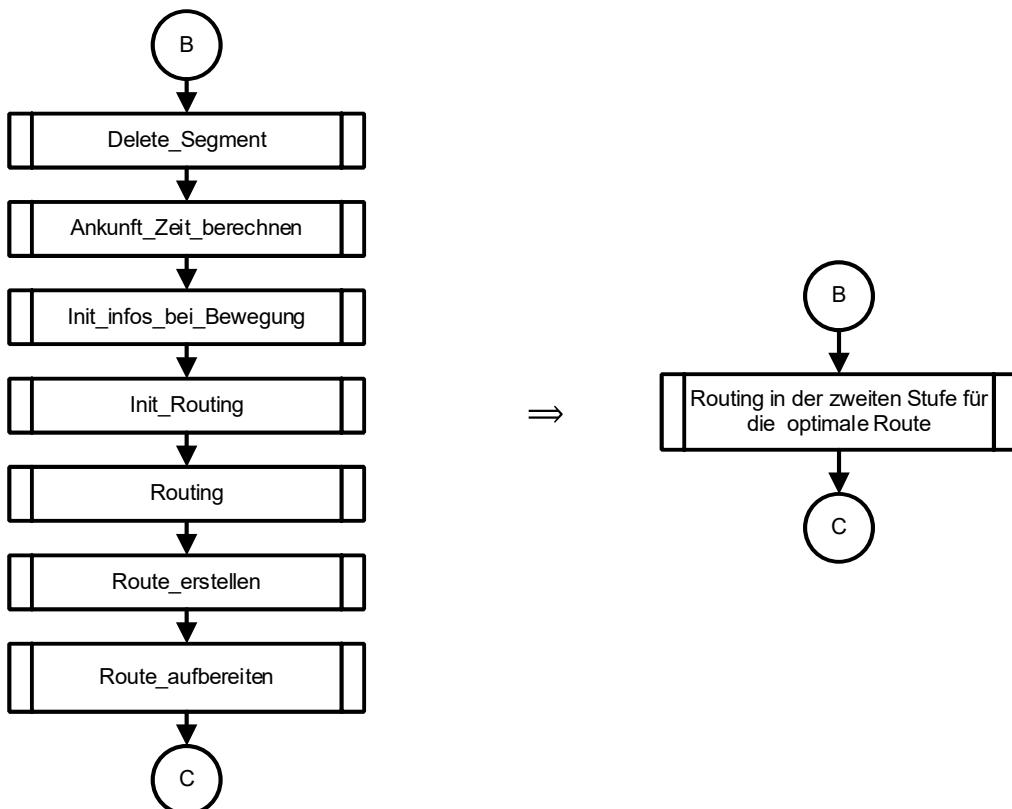


Abbildung 5-27: Flussdiagramm der Routingphase in der zweiten Stufe für die optimale Route

## 3. Nachbearbeitungsphase

Die Hauptaufgaben der Nachbearbeitungsphase bestehen darin, die gesamte Route für das Shuttle festzulegen und die entsprechenden Zeitfenster zu reservieren. Zusätzlich ist es notwendig, einen geeigneten Verzögerungszeitpunkt für die Route der ersten Phase festzulegen. Die Logik der Nachbearbeitungsphase lautet wie folgt:

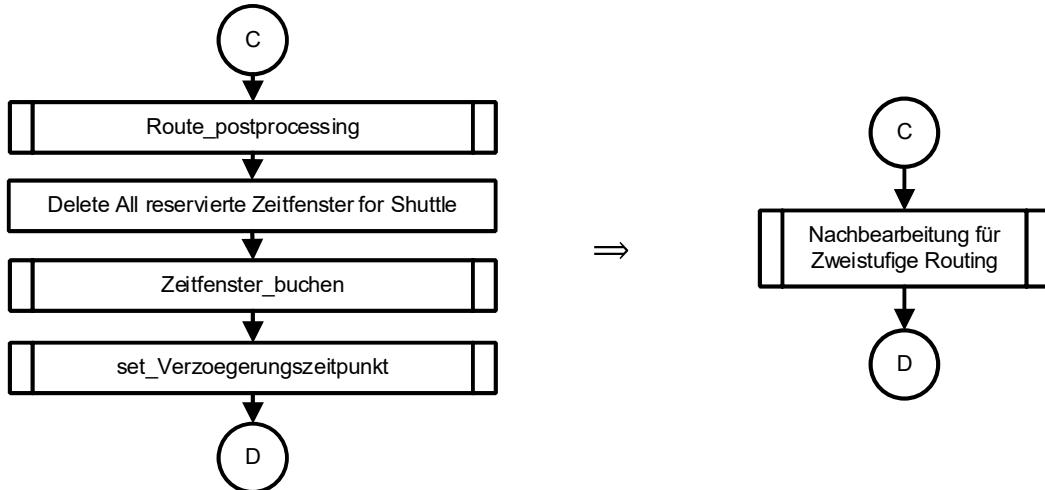


Abbildung 5-28: Flussdiagramm der Nachbearbeitungsphase für zweistufige Routing

In der Nachbearbeitungsphase wird zunächst die in den beiden Phasen erzeugte Route über die Methode „Route\_postprocessing“ integriert und in der Tabelle „Route“ des Shuttles gespeichert. Aus Sicherheitsgründen werden alle Zeitfenster des aktuellen Shuttles gelöscht und danach werden mit der Methode „Zeitfenster\_buchen“ entsprechende Zeitfenster für alle Knoten in der Routentabelle des Shuttles reserviert. Schließlich müssen die ursprüngliche Verzögerungszeitpunkt zurückgesetzt und die neue Verzögerungszeitpunkt für die Route der ersten Stufe eingestellt werden.

#### ( 1 ) Erzeugung der gesamten Route

Der Route der ersten Stufe wird im Zeitfenster jedes Knotens aufgezeichnet, der in der ersten Stufe durchgelaufen werden, und die Route der zweiten Stufe wird in der Tabelle „Knoten\_Route“ gespeichert. In der Methode „Route\_postprocessing“ werden sowohl der Route der ersten Stufe als auch die der zweiten Stufe in die Tabelle „Route“ des Shuttles integriert. Die Logik lautet wie folgt:

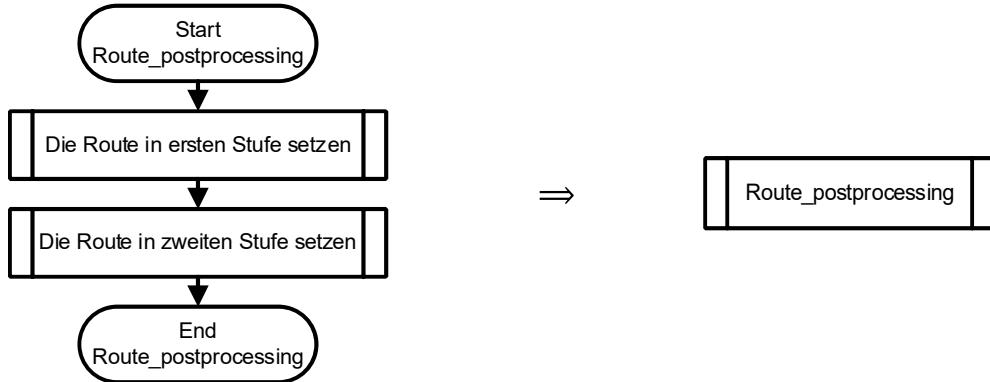


Abbildung 5-29: Flussdiagramm der Methode „Route\_postprocessing“

Beim Einstellen der Route der ersten Phase wird auch das der ersten Stufe entsprechende Zeitfenster eingestellt. Dadurch ist es in der folgenden Methode "Zeitfenster\_buchen" nur erforderlich, das Zeitfenster auf den anderen Knoten außer dem Zwischenknoten gemäß der Route der zweiten Stufe einzustellen.

Es ist zu beachten, dass in der ersten Stufe des Routings die Endzeit des Zeitfensters des Zwischenknotens auf unendlich (-1) gesetzt wird, um ein ausreichend langes Zeitfenster am Zwischenknoten für die zweite Stufe des Routings zu haben. Wie unten gezeigt:

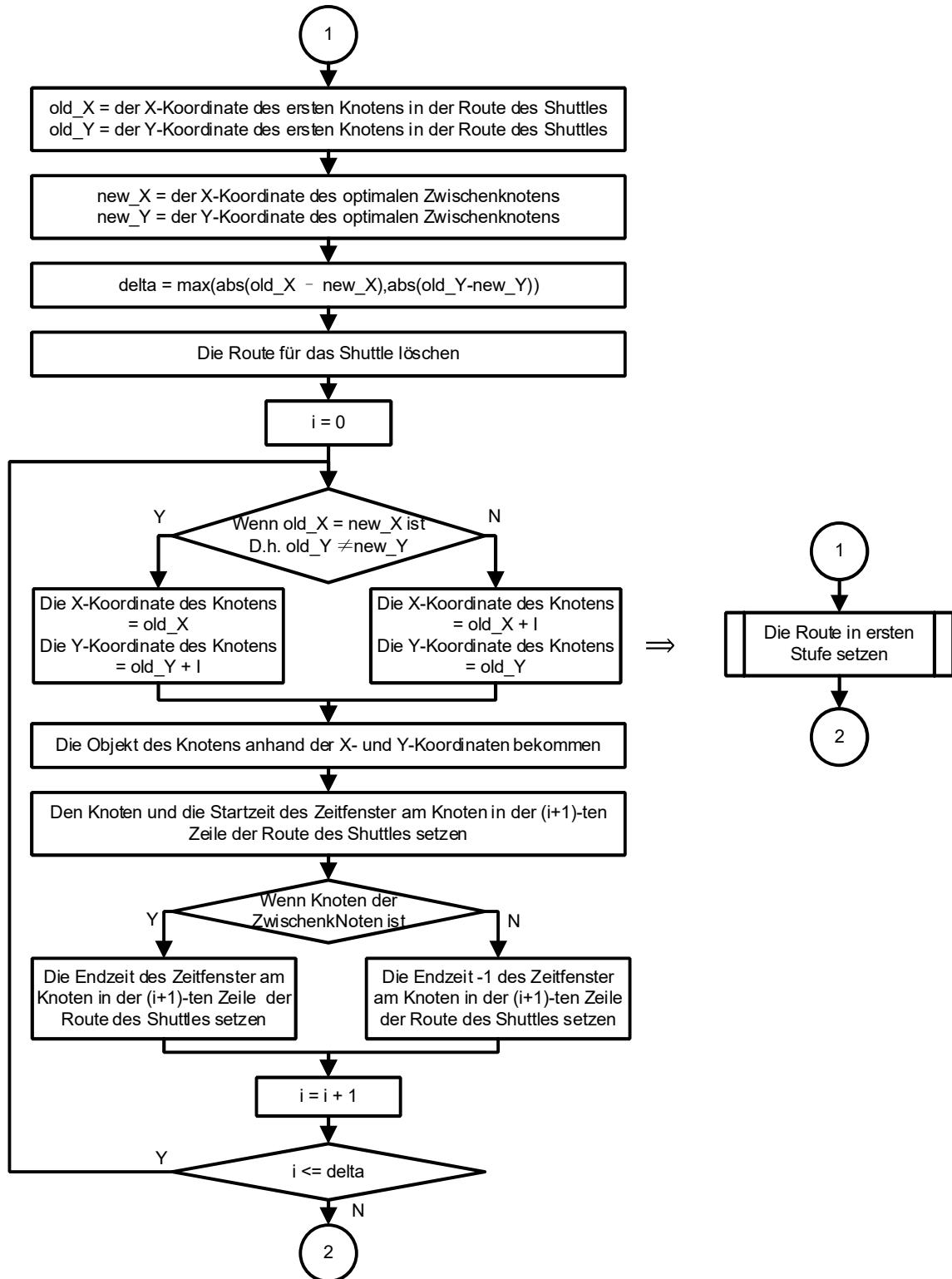


Abbildung 5-30: Flussdiagramm der Phase für das Setzen der Route in ersten Stufe

In der zweiten Stufe des Routings wird die tatsächlichen Endzeit des Zwischenknotens bestimmt, zu der das Shuttle den Zwischenknoten vollständig verlässt. Daher wird das Zeitfenster des Zwischenknotens sowohl durch das Routing der ersten als auch der

zweiten Stufe bestimmt. Außerdem müssen die „Ausrichtung“, „Ziel“ des Zwischenknotens sowie die Länge und der Abstand des ersten Segments verarbeitet werden. Die Logik lautet wie folgt:

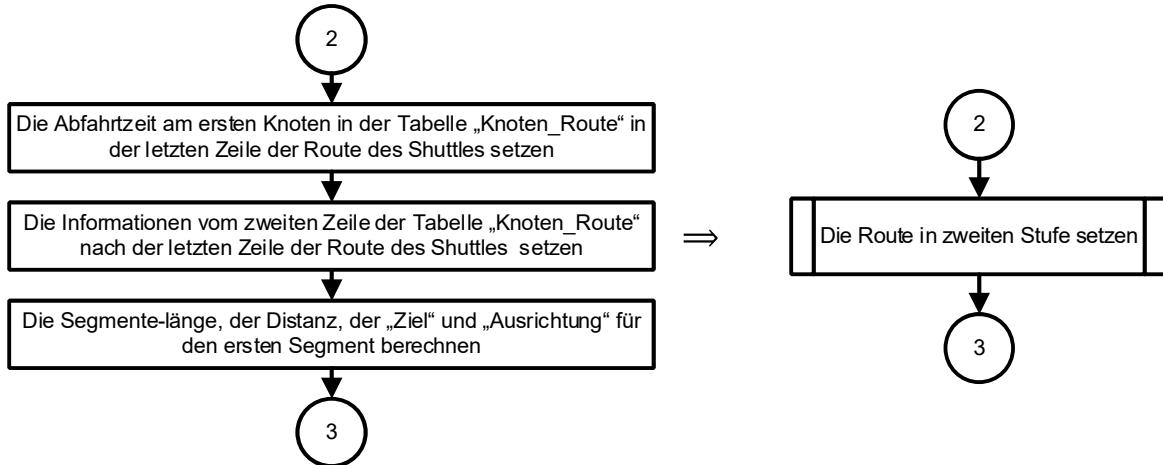


Abbildung 5-31: Flussdiagramm der Phase für das Setzen der Route in zweiten Stufe

Bisher hat Shuttle eine neue Route und ein entsprechendes Zeitfenster erhalten. Das Routing wurde abgeschlossen und das Shuttle wählt die entsprechende Aktion gemäß der neuen Route im Methode „bei\_Ankunft\_Knoten“ aus.

#### ( 2 ) Setzen des Verzögerungszeitpunkt für die Route der ersten Stufe

Shuttle hat bereits zuvor einen Bremszeitpunkt festgelegt, aber für die neue Route ist der ursprüngliche Bremszeitpunkt sinnlos, sodass der ursprüngliche Bremszeitpunkt gelöscht werden muss. Da die Route der ersten Stufe in Bewegung generiert wird, wird der Verzögerungszeitpunkt der Route nicht vom ursprünglichen Bewegungsmodul generiert, sodass der Verzögerungszeitpunkt für das Shuttle zu diesem Zeitpunkt manuell einstellt werden müssen. Dies kann durch die Methode „set\_Verzoegerzeitpunkt“ erreicht werden, deren Logik wie unten dargestellt ist:

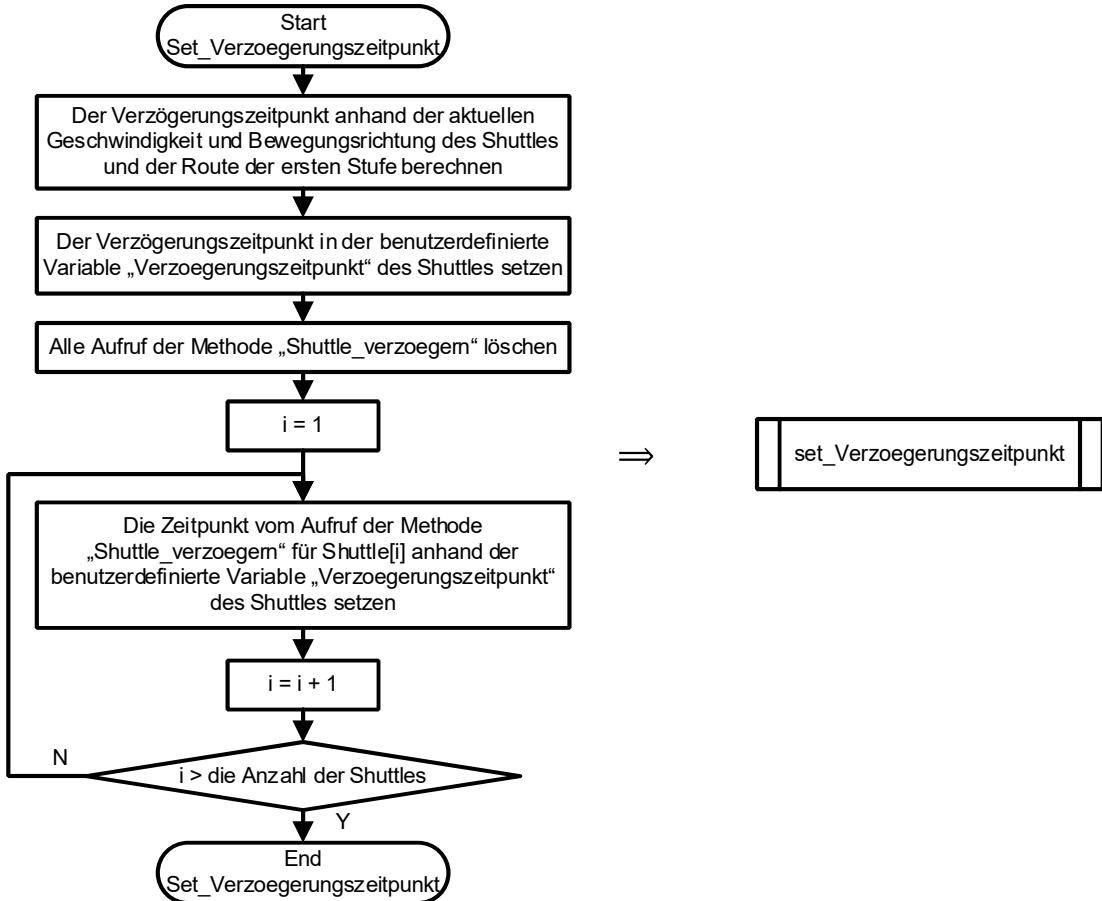


Abbildung 5-32: Flussdiagramm der Methode „set\_Verzoegerungszeitpunkt“

Gemäß der obigen Analyse des Bewegungsmoduls müssen neben der Einstellung des Aufrufzeitpunkts der Methode „Shuttle\_verzoegern“ die benutzerdefinierten Variable „Verzoegerungszeitpunkt“ des Shuttles gesetzt werden. Wenn die Methode „Shuttle\_verzoegern“ ausgeführt wird, werden die aktuelle Simulationszeit und die Variable „Verzoegerungszeitpunkt“ verglichen und die Verzögerung wird nur ausgeführt, wenn beide gleich sind.

Daher muss tatsächlich nur ein neuer Verzögerungszeitpunkt eingestellt werden, und alle Aufrufe der Methode „Shuttle\_verzoegern“ müssen nicht abgebrochen werden. Aus Gründen der Stabilität und Robustheit des Systems werden jedoch alle Aufrufe gelöscht und dann neue Verzögerungszeitpunkt für alle Shuttles gesetzt.

## 5.2.4 Änderung der Route in Bewegung für mehrere Shuttles

### 1. Nachbearbeitung für den Umtausch der Aufträge: Methode „to\_Shuttle“

Wenn ein Shuttle einen neuen Auftrag erhält, tauschen die Aufträge zwischen den leeren Shuttles gemäß der obigen Auftragszuweisungslogik aus. Daher erhalten einige leeren Shuttles zu diesem Zeitpunkt neue Aufträge. Wenn diese Shuttles einen Knoten

erreichen, wird basierend auf den neuen Auftragsinformationen neue Routen generiert und die entsprechenden Zeitfenster reserviert.

Für die Planung der Route mithilfe eines zweistufigen Routingalgorithmus sind die folgenden zwei Punkte sehr wichtig:

- Es gibt mindesten einen Zwischenknoten, an dem das Shuttle stoppen kann
- Der Zielknoten ist nicht belegt von anderer Shuttles

Um die neuen Route erfolgreich zu generieren, verwendet in dieser Arbeit die Methode „to\_Shuttle“, um das reservierte Zeitfenster aller Shuttles zu verarbeiten, wenn die Zielknoten nach der Zuweisung der Aufträge geändert werden. Im Folgenden werden die ursprüngliche Route und ihr Zeitfenster gemäß den beiden oben genannten Schwerpunkten behandelt.

### (1) Sicherung der Existenz des gültigen Halteknotens

Für einen zweistufigen Routingalgorithmus ist das Finden eines geeigneten Zwischenknotens für eine erfolgreiche Pfadplanung sehr notwendig. Der Unterschied zwischen dem zweistufigen Routingalgorithmus und dem ursprünglichen Routingalgorithmus besteht darin, dass, wenn das Routing der zweiten Stufe am Zwischenknoten durchgeführt wird, keine Garantie dafür besteht, dass das freies Zeitfenster am Zwischenknoten (der Startknoten der Route der zweiten Stufe) genug lang ist, sodass das Routing erfolgreich ist.

Entsprechend der Größe des Knotens und der Geschwindigkeit und Beschleunigung des Shuttles in diesem Modell muss das freie Zeitfenster eines gültigen Zwischenknotens den Zeitraum für das Anhalten und völlige Verlassen erfüllen, der das Shuttle benötigt. Die Länge des freien Zeitfensters kann durch folgende Formel berechnet werden:

$$\Delta t_{zwischenknoten,frei} = \frac{L_k}{v} + \frac{v}{a} + \Delta t_{anders} \quad (5-2)$$

Wobei  $L_k$  die Länge des Knotens ist und  $v$  und  $a$  die maximale Geschwindigkeit und maximale Beschleunigung (Verzögerung) des Shuttles in der aktuellen Bewegungsrichtung sind. Die zusätzliche Zeit am Zwischenknoten  $\Delta t_{anders}$  muss größer oder gleich 0 sein. Dies kann die Zeit sein, die das Shuttle benötigt, um am Knoten abzubiegen, oder um auf andere Shuttles zu warten. Im Allgemeinen wird gewählt:

$$\Delta t_{anders} = 0 \quad (5-3)$$

$$\Delta t_{zwischenknoten,frei,min} = \frac{L_k}{v} + \frac{v}{a} \quad (5-4)$$

Die erforderliche Länge des Zeitfensters für das Durchfahren des Knotens mit der höchsten Geschwindigkeit kann durch folgende Formel berechnet werden:

$$\Delta t_{durch} = \frac{L_k}{v} < \Delta t_{zwischenknoten,frei,min} = \frac{L_k}{v} + \frac{v}{a} \quad (5-5)$$

Wenn sich das Shuttle jedoch zum Ende der Segmente der ursprünglichen Route bewegt, muss das Shuttle langsamer fahren, um an diesem Endknoten anzuhalten, und warten bis andere Shuttles vorbeifahren oder sich abbiegen, und dann beschleunigen, um diesen Knoten zu verlassen. Daher beträgt die Länge des Zeitfensters am Endknoten des Segments:

$$\begin{aligned} \Delta t_{Segmentende} &= \frac{L_m}{v} + \frac{v}{a} + A \times \Delta t_{Abbiegung} + W \times \Delta t_{warten} \\ &\geq \Delta t_{zwischenknoten,frei,min} = \frac{L_m}{v} + \frac{v}{a} \end{aligned} \quad (5-6)$$

Wobei zeigt  $A$  an, dass das Shuttle am Knoten abbiegen muss, und  $W$  zeigt an, dass das Shuttle warten muss, bis andere Shuttles am Knoten vorbeifahren. Sowohl  $A$  als auch  $W$  sind Binärzahlen. Das Zeitfenster auf diesem Knoten erfüllt die Anforderung von  $\Delta t_{zwischenknoten,frei,min}$ .

Um sicherzustellen, dass mindestens einen gültigen Halteknoten, der das mindesten Größe des Zwischenknotens erfüllt, durchgesucht werden kann, werden nach dem Austausch der Aufträge das erste Segment der ursprünglichen Route des Shuttles und die reservierten Zeitfenster beibehalten.

## ( 2 ) Das Zeitfenster am originalen Zielknoten freigeben

Nur wenn der neue Zielknoten nicht von einem anderen Shuttle als Zielknoten reserviert wird, kann die Planung neuer Route erfolgreich sein. Das erste Shuttle, das die neue Route plant, muss das Shuttle sein, das den neuen Auftrag erhält. Zu diesem Zeitpunkt ist der Auftrag des Shuttles möglicherweise nicht der gerade eingegangene neue Auftrag, sodass der Zielknoten des Auftrags von einem anderen Shuttle reserviert werden kann.

Um zu vermeiden, dass das Routing aufgrund der Belegung des Zielknotens fehlschlägt, muss für jedes Shuttle, dessen Auftrag geändert wird, mindestens das Zeitfenster auf dem ursprünglichen Zielknoten freigegeben werden.

Um die Anforderungen am Halteknotens und am Zielknotens zu erfüllen, lautet die Logik der Nachbearbeitungsteil der Methode „to\_Shuttle“ wie folgt:

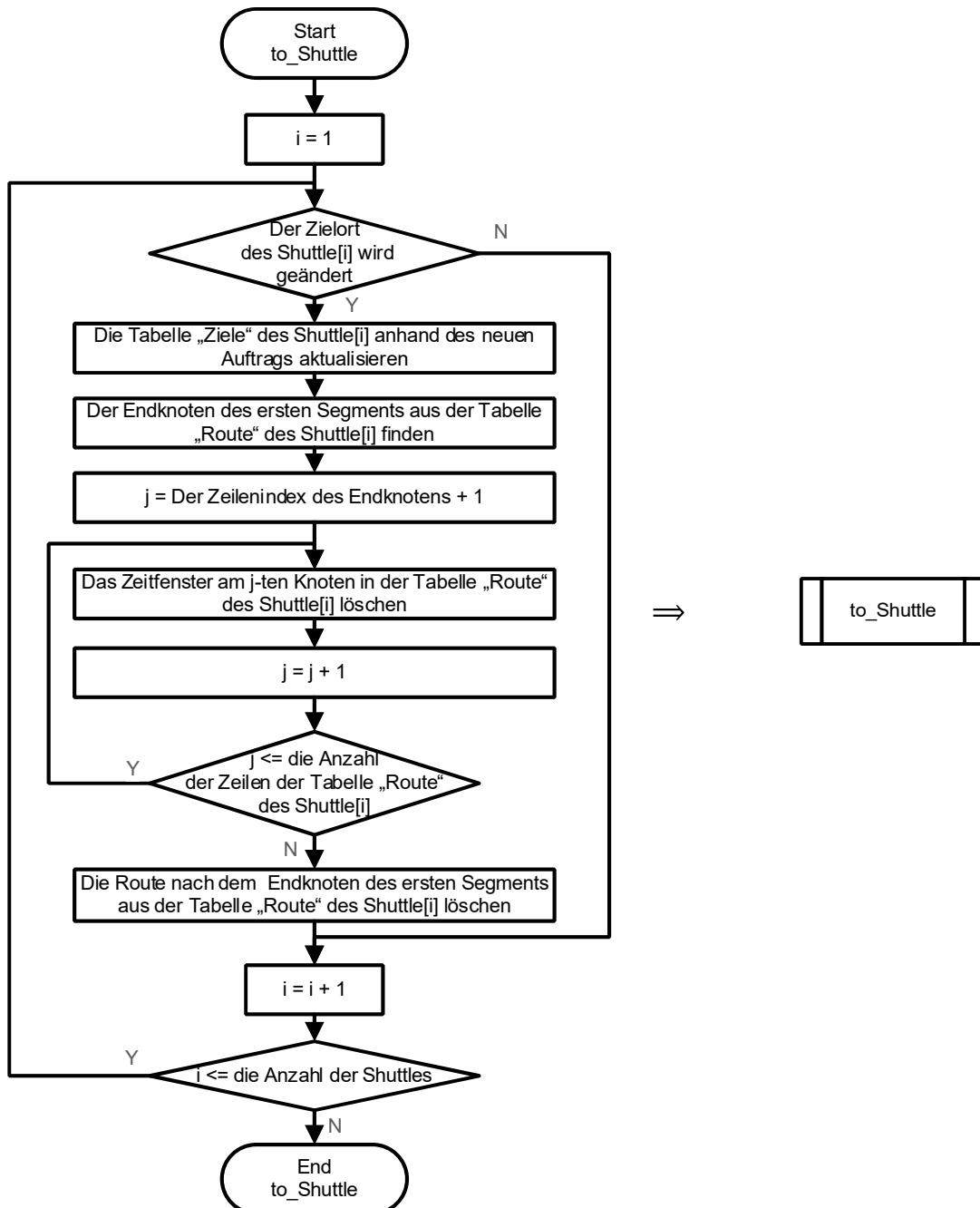


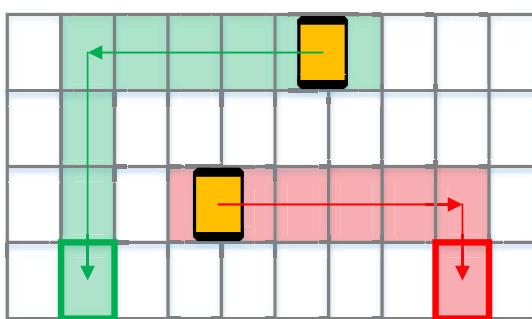
Abbildung 5-33: Flussdiagramm der Methode „to\_Shuttle“

Wenn der Endknoten des ersten Segments der Zielknoten ist, können die beiden oben genannten Anforderungen nicht gleichzeitig erfüllt werden. Zu diesem Zeitpunkt tritt ein „Verfolgungsproblem“ auf, das zum Fehlschlagen des Routings führt. Im Folgenden werden die möglichen Probleme detailliert beschrieben und einige Lösungen vorgeschlagen.

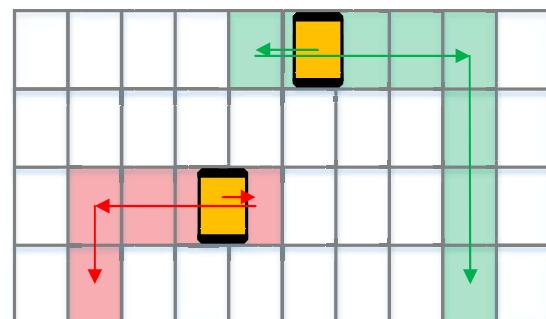
## 2. Potenzielle Probleme bei der Implementierung des Umtauschs von Aufträgen

### (1) Die Reservierung der originalen Zeitfenster zur Verringerung der gesamten Optimalität

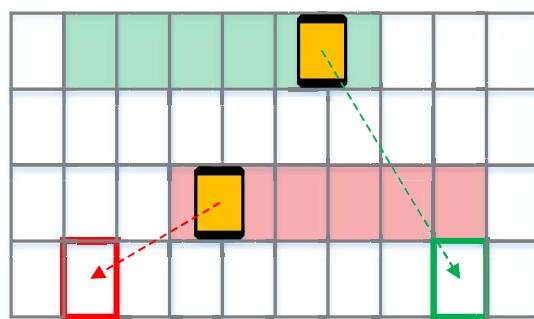
Nach dem Auftragsumtausch wird die Routen der Shuttles nicht vollständig gelöscht, sondern ein Teil der ursprünglichen Route behalten. Wenn eine neue Route geplant wird, wird das Routing daher von der ursprünglichen Route beeinflusst, sodass die neue Route nicht optimal ist. Wie unten gezeigt:



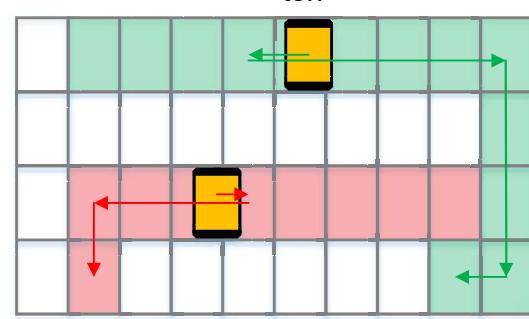
1. Vor dem Umtausch der Aufträge



3. Optimale Route für die neuen Zielknoten



2. Nach dem Umtausch der Aufträge und der Reservierung des ersten Segmente



4. Neue Route unter Berücksichtigung reservierten Zeitfenster

Abbildung 5-34: Einfluss der reservierten Zeitfenster auf die Route

Je weniger die reservierten Zeitfenster sind, desto optimaler ist die neue Route. Nach dem Umtausch der Aufträge müssen daher nicht nur die Route für die Shuttles mit neuem Auftrag, sondern alle Shuttles neu geplant werden. Wie unten gezeigt:

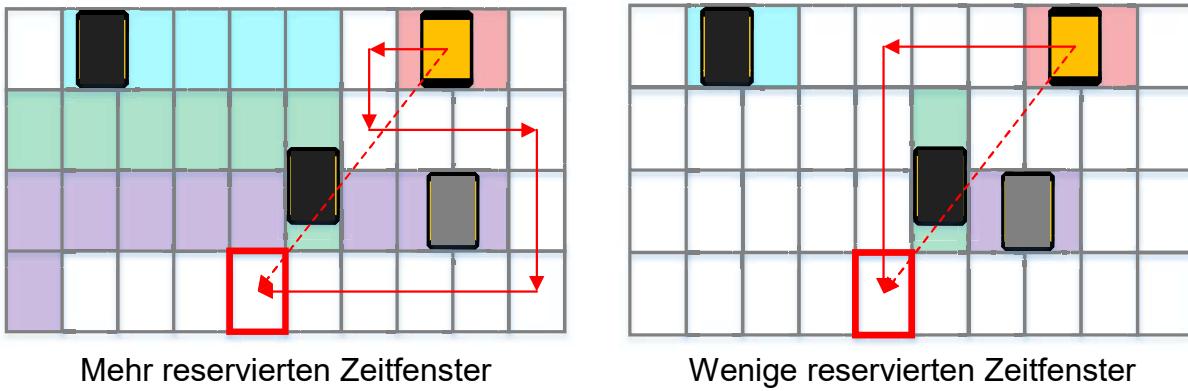


Abbildung 5-35: Einfluss der Anzahl der reservierten Zeitfenster auf die Optimalität der Route

Auf diese Weise kann für jedes Shuttle die Anzahl der reservierten Zeitfenster minimiert werden, wodurch der Optimierungsgrad des Systems erhöht wird. Die Logik ist wie folgt:

---

#### Algorithmus von Nachbearbeitung aller Shuttles nach dem Umtausch der Aufträge

---

- |   |                                                                                           |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <b>Auslöser:</b> nach dem Umtausch von Aufträge einen neuen Zielknoten erhalten           |
| 1 | Für alle Shuttles schleifen                                                               |
| 2 | Für alle Knoten in der Route des Shuttles                                                 |
| 3 | Wenn der Knoten nicht von diesem Shuttle beansprucht wird                                 |
| 4 | Der Knoten aus der Tabelle „Route“ des Shuttles und das entsprechende Zeitfenster löschen |
- 

Abbildung 5-36: Algorithmus von Nachbearbeitung aller Shuttles nach dem Umtausch der Aufträge

Dieser Algorithmus kann als ein Variante des WHCA\*-Algorithmus genannte werden. Das Routingfenster wird nicht nur von der Kollision, sondern auch vom Auftragssystem, was in diesem Modell die Zuweisung und Umtausch der Aufträge ist, beeinflusst. In dieser Arbeit wird diese Variante von WHCA\* als CO/ EO-WHCA\* (Conflict-Oriented and Event-Oriented Windowed Hierarchical Cooperative A\*) bezeichnet.

#### ( 2 ) Verfolgungsproblem (Chasing Problem) zum ungültigen Halteknoten

Befindet sich das Shuttle im letzten Segment der ursprünglichen Route, ist der Endpunkt der ersten Route der Zielknoten. Wie in der folgenden Abbildung gezeigt, muss Shuttle A am nächsten Knoten (Knoten 2) eine neue Route planen, wenn der Zielknoten von Shuttle A zu diesem Zeitpunkt vom ursprünglichen Knoten 5 zu Knoten 6 wechselt. Aufgrund der Notwendigkeit des Anhaltens an einem Zwischenknoten ist das vom Zwischenknoten benötigte Zeitfenster größer als das Zeitfenster für das Durchfahren mit konstanter Geschwindigkeit. Wenn jedoch Shuttle A einen Knoten vollständig ver-

lässt, beginnt Shuttle B, in diesen Knoten einzutreten, wodurch das von Shuttle A reservierte Zeitfenster und das von Shuttle B reservierte Zeitfenster auf jedem Knoten eng miteinander verbunden sind, wie in der folgenden Abbildung gezeigt wird.

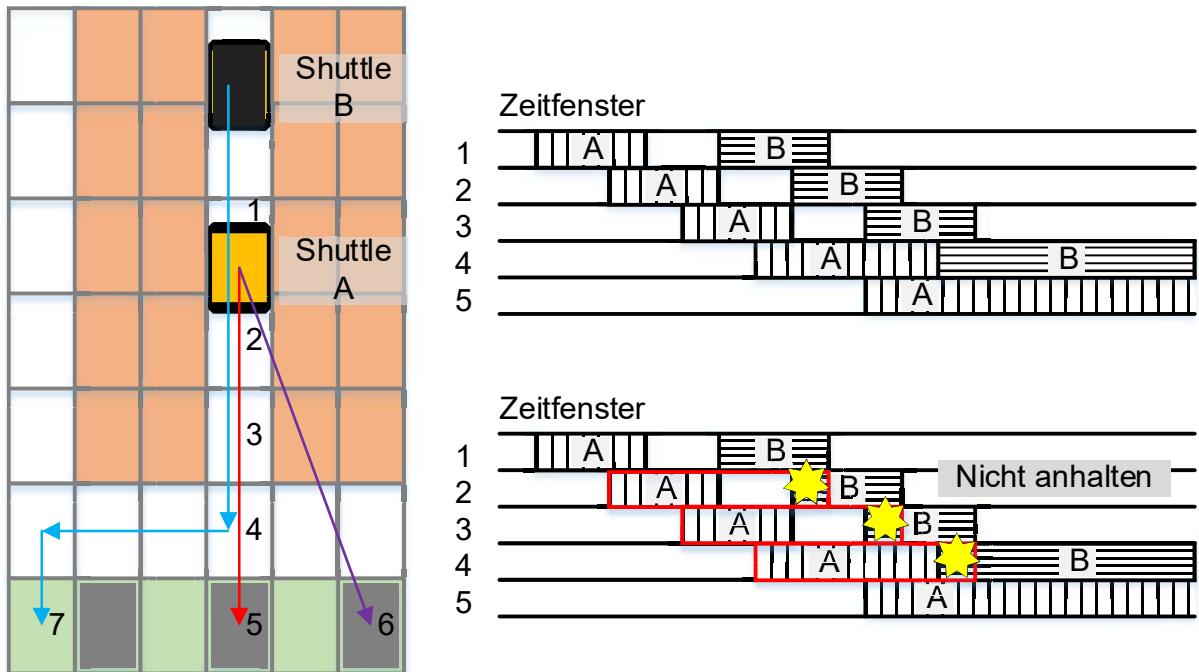


Abbildung 5-37: Darstellung des Verfolgungsproblems (Chasing Problem)

Der einzige mögliche Halteknoten von Shuttle A ist also Knoten 5. Da der Knoten 5 ein Funktionsknoten (IO\_LKW oder IO\_RBG) ist, wie oben erwähnt, kann der Shuttle den Knoten nicht betreten, wenn der Zielknoten des Shuttles nicht der Funktionsknoten ist, da er sonst einen Unfall verursachen kann. In diesem Fall kann kein gültiger Zwischenknoten für Shuttle A gefunden werden, sodass das zweistufige Routing fehlschlägt.

Dieses Problem tritt nicht nur auf, wenn sich Shuttle A auf dem letzten Segment der ursprünglichen Route befindet. Wenn die ursprüngliche Route des Shuttles von vielen anderen Shuttles beeinflusst wird, kann sich Shuttle A nur entlang der ursprünglichen Route bewegen. Es kann immer noch unvermeidlich sein, den ursprünglichen Zielknoten zu betreten. Diese Situation ähnelt der Verfolgung von Shuttle B durch Shuttle A, wodurch Shuttle A gezwungen wird, einen Knoten zu betreten, der nicht betreten werden soll. Dieses Phänomen wird als Verfolgungsproblem (Chasing Problem) bezeichnet.

Eine der Behandlungsmethoden verwendet die Idee der ID (Independence Detection). Wenn Shuttle A einen neuen Auftrag erhält, werden Shuttle A und verwandte Shuttle B in eine Gruppe eingeteilt und die ursprünglichen Routen und Zeitfenster von Shuttle A und Shuttle B gelöscht.

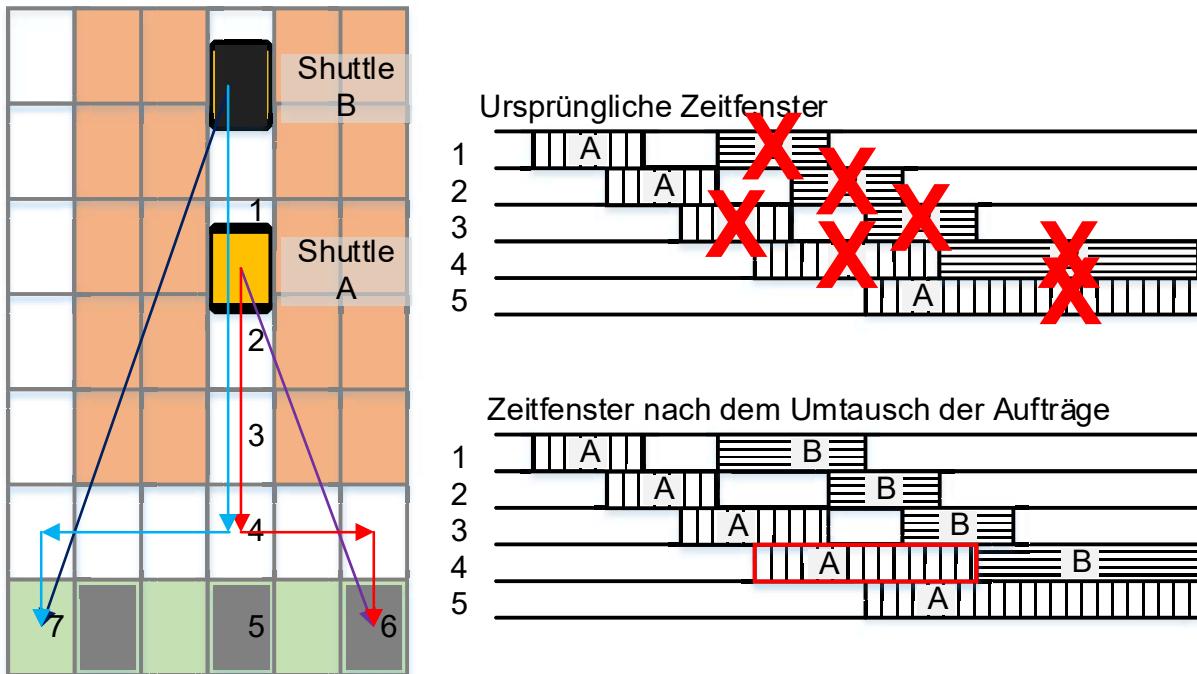


Abbildung 5-38: Lösung des Verfolgungsproblems durch Löschen aller relevante Route und Zeitfenster

Zu diesem Zeitpunkt, wenn Shuttle A Knoten 2 erreicht, kann die Route zum Zielknoten 6 erfolgreich geplant werden; wenn Shuttle B Knoten 1 erreicht, da der letzte Knoten der Route von Shuttle B zu diesem Zeitpunkt nicht mit seinem Zielknoten übereinstimmt, wird auch eine neue Route zu dem eigenen ursprünglichen Zielknoten (Knoten 7) geplant.

Die Voraussetzung, um das Verfolgungsproblem auf diese Weise zu vermeiden, ist, dass Shuttle A Knoten 2 erreicht, bevor Shuttle B Knoten 1 erreicht, was in der Simulation und in der Praxis nicht garantiert ist. Dieses Problem kann durch Austausch von Prioritäten durch ID (Independence Detection) gelöst werden.

### ( 3 ) Pendelproblem (Pendulum Problem) zur Verringerung der Optimalität

Das Pendel-Problem wird durch häufige Auftragsänderungen verursacht. Wenn die Abstandsschätzungsmethode nicht sehr genau ist, verursacht dies einen großen Zeitverlust, wodurch die Leistung des gesamten Systems verringert wird. In diesem Modell wird die Tabelle „Minimale\_Fahrzeit“ für die Abstandsschätzung verwendet, um die Berechnungsgeschwindigkeit zu erhöhen und die CPU zu entlasten. Daher ist dieses Problem schwerwiegender. Wie unten gezeigt:

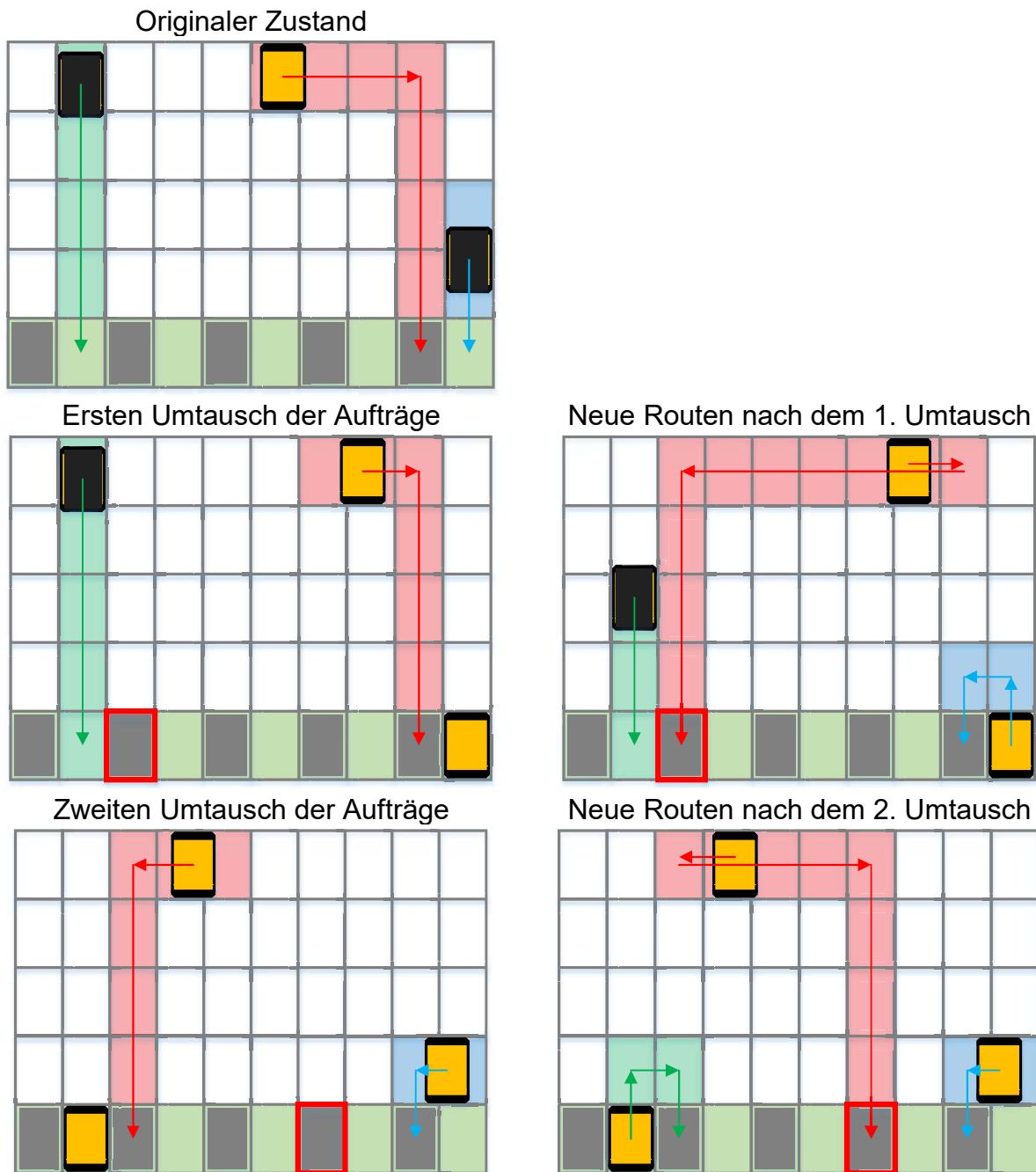


Abbildung 5-39: Darstellung des Pendelproblems (Pendulum Problem)

Der Weg zur Lösung dieses Problems besteht darin, den Abstandsschätzungsme-  
thode zu verbessern. Der Routing-basierte Abstandsschätzung kann die Genauigkeit  
der Vorhersage unter den Bedingungen anderer Zeitfenster erhöhen, kann jedoch im-  
mer noch nicht die volle Genauigkeit erreichen, sodass immer noch Pendelprobleme  
auftreten können.

Da für den CO/EO-WHCA\*-Algorithmus nach dem Auftragsumtausch grundsätzlich  
kein Zeitfenster reserviert ist, kann der Abstandsschätzungsme-  
thode durch die Tabelle

„Minimale\_Fahrzeit“ oder durch Routing verwendet werden, um die Genauigkeit des Vorhersagealgorithmus effektiv zu erhöhen, Pendelprobleme zu reduzieren und die Systemeffizienz zu erhöhen.

### 3. Behandlung des fehlgeschlagenen Routings: Methode „bei\_Ankunft\_Knoten“

Die Nachbearbeitungsphase wird in die Methode „bei\_Ankunft\_Knoten“ gestellt. Wenn das Routing nach dem Ändern des Zielknotens fehlschlägt, wird die Behandlungsfunktion wie unten gezeigt ausgelöst:

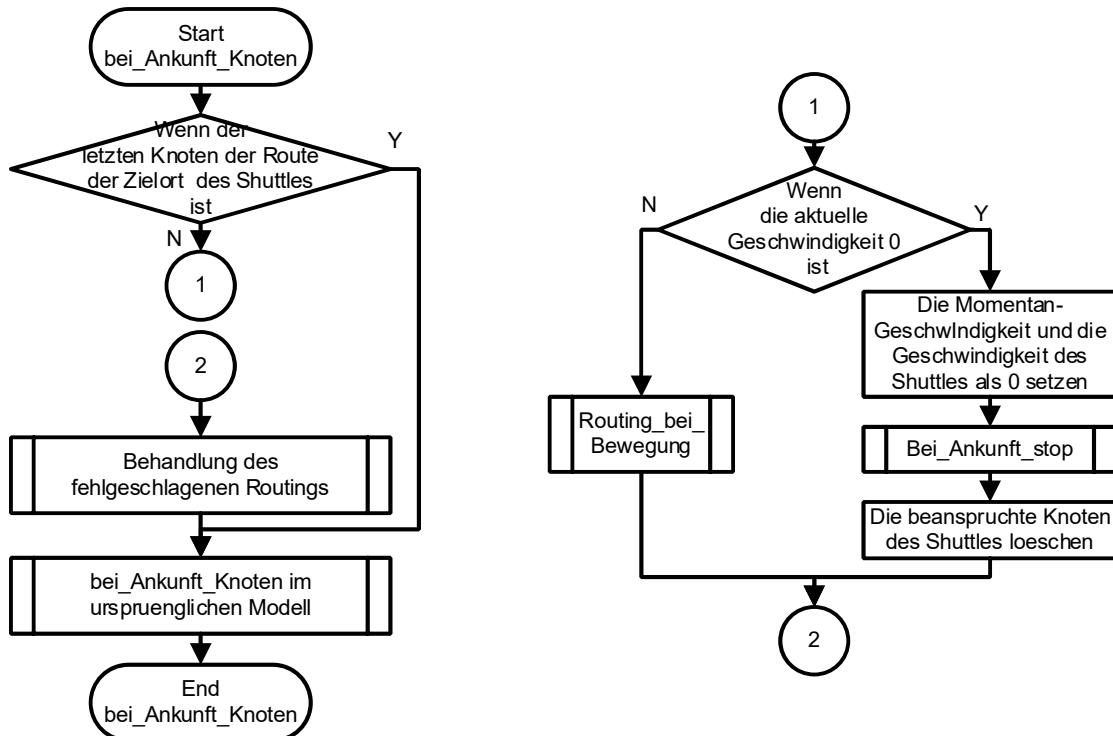


Abbildung 5-40: Flussdiagramm der Methode „bei\_Ankunft\_Knoten“ für die Optimierung durch den Umtausch der Aufträge mit Behandlung des fehlgeschlagenen Routings

Gemäß der obigen Analyse wird der Grund für ein Fehlschlagen bei dem Routing häufig die reservierten Zeitfenster ist. Entsprechend der Idee von ID (Independence Detection) sollten das aktuelle Shuttle und andere Shuttles, die mit dem Fehlschlagen der Routing zusammenhängen, gruppiert werden, und die Routen für diese Gruppe neu geplant werden. Da es jedoch schwierig ist zu unterscheiden, welche Shuttles mit dem Fehlschlagen des Routings zusammenhängen, können in diesem Modell die Routen aller Shuttles neu geplant werden. Die Logik ist wie folgt

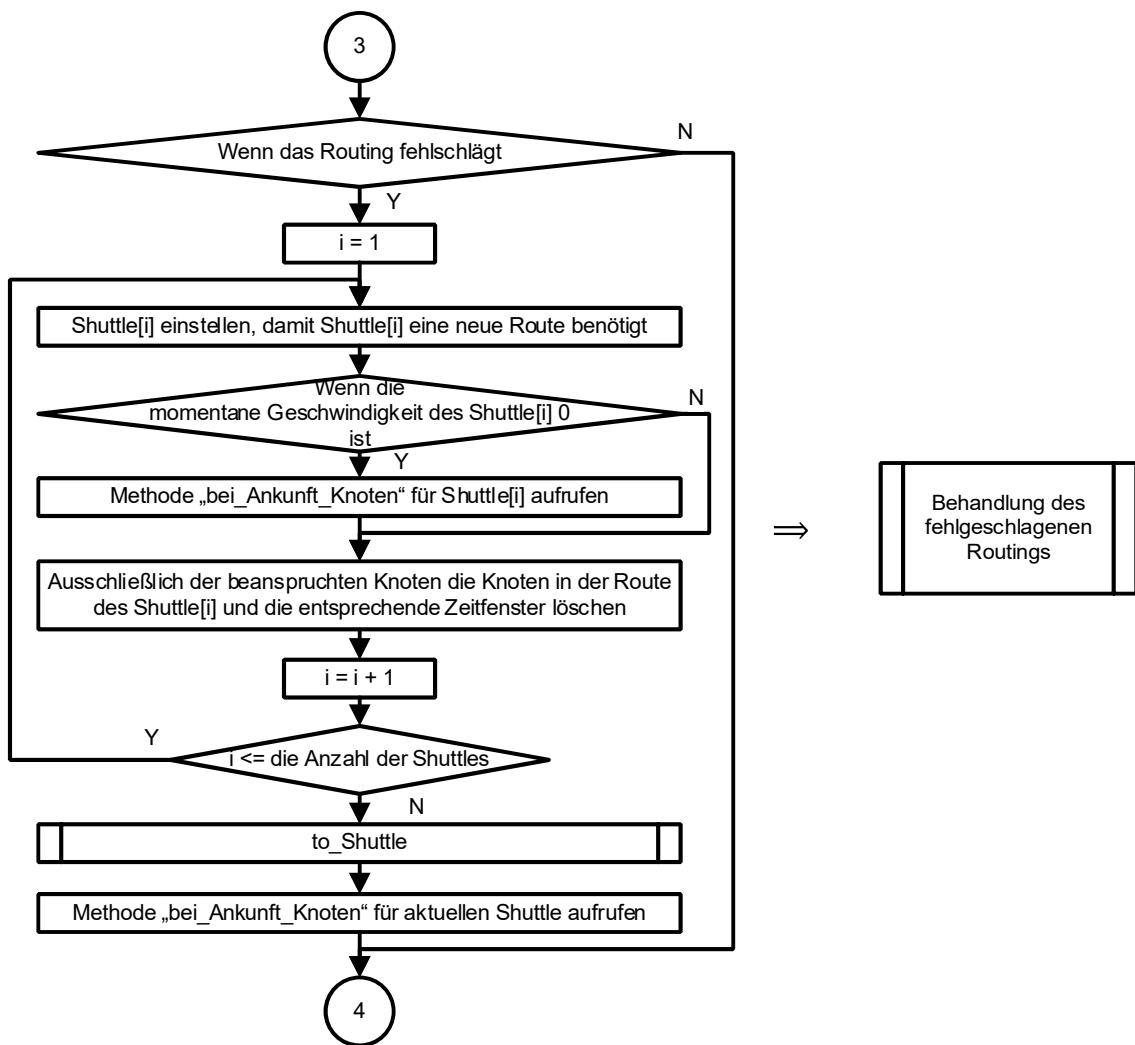


Abbildung 5-41: Flussdiagramm der Behandlung des fehlgeschlagenen Routings

Es ist zu beachten, dass nach dem Ändern aller vom Shuttle reservierten Zeitfenster die Methode „bei\_Aankunft\_Knoten“ für das aktuelle Shuttle erneut aktiviert werden muss, damit die neue Route für das aktuelle Shuttle rechtzeitig geplant werden kann.



## 6 Auswertung der Algorithmen für globale Optimierung

---

Der Hauptzweck dieses Kapitels besteht darin, die verschiedenen oben genannten globale Routingstrategien durch Änderung der Systemeingang (Kombination der Kriterien, Anzahl der Shuttles) zu bewerten und die Auswirkungen jedes Routingalgorithmus auf das Systemverhalten (Systemstabilität, Systemleistung) zu analysieren.

In Abschnitt 5.1 werden hauptsächlich die relevanten Informationen des Experiments beschrieben. In dieser Arbeit wird die Kombination verschiedener Auswahlkriterien der Aufträge und die Anzahl der Shuttles im System als Haupteingang verwendet. Durch die Anzahl der Aus- und Einlagerung und deren Änderungen im Laufe der Zeit wird die globale Routingalgorithmen ausgewertet. Um die Verhalten des Routingalgorithmus genauer beurteilen zu können, wurde jeder Gruppe von Eingangsvariablen viele Male getestet, wodurch die Auswirkungen des Auftragssystems auf die Auswertung des Algorithmus verringert wurden. Um die Schwierigkeit der Datenverarbeitung später zu verringern, werden in diesem Abschnitt außerdem die relevante Datenverarbeitungssoftware vorgestellt

Danach werden die Algorithmen der Optimierung bei der Zuweisung des Auftrags und durch den Umtausch der Aufträge anhand der Eingang des Experiments ausgewertet.

Die Algorithmen der Optimierung bei der Zuweisung des Auftrags werden in Abschnitt 5.2 ausgewertet. Zunächst werden die Auswirkungen jeder Kombination der Kriterien auf die Systemverhalten in diesem Abschnitt auf den beiden Algorithmen, nämlich individuale Optimierung und Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles, separat ausgewertet und dann die beste Kombination daraus ausgewählt. Als Nächstes wird die Auswirkung der Anzahl der Shuttles auf dem Ausgang für die optimale Kombination der jeweiligen Algorithmen untersucht.

Die Auswertung der Optimierung durch den Umtausch der Aufträge wird in Abschnitt 5.3 durchgeführt. Da der Routingalgorithmus bei der Bewegung für mehrere Shuttles noch nicht perfekt ist, wird in diesem Abschnitt nicht die Langfristige Betriebsfähigkeit des Algorithmus analysiert, sondern nur die Effizienz des Algorithmus im Kurzzeitbetrieb berücksichtigt. Wenn die Anzahl der Shuttles gering ist, kann es nicht leicht zu Kollisionen kommen. In diesem Dokument wird daher der Einfluss der Anzahl der Shuttles auf die Systemleistung bei geringerer Systemlast analysiert.

## 6.1 Auswertungsmodell, -kriterien und –verfahren

### 6.1.1 Einflussgrößen der Leistung von Algorithmen und Systemen

#### 1. Verschiedene Algorithmen mit den Kombinationen verschiedener Kriterien

In jedem der oben genannten Algorithmen muss ein Auftrag für das Shuttle ausgewählt, damit unterschiedliche Kombinationen von Auswahlkriterien verwendet werden. Um die Beschreibung und Analyse zu vereinfachen, werden die folgenden Abkürzungen von nun an verwendet, um die verschiedenen Optionen jedes Kriteriums anzugeben, wie in der folgenden Tabelle gezeigt:

Tabelle 6-1: *Abkürzung von verschiedene Kriterien und verschiedene Optionen*

| Kriterium         | Option   | Abkürzung       | Beschreibung                                                                           |
|-------------------|----------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Zeit-Kriterium    | -        | Zeit            | Die Erstellungszeit des Auftrags berücksichtigen                                       |
| Abstand-Kriterium | Option 3 | Minim           | Abstand-Kriterium durch die Tabelle „Minimale_Fahrzeit“                                |
| Sequenz-Kriterium | Option 4 | Route           | Routingbasierter Abstand-Kriterium                                                     |
|                   | Option 2 | Sequ(M)         | Sequenz-Kriterium durch „Big M“-Prinzip ohne Berücksichtigung vergebener Aufträge      |
| Sequenz-Kriterium | Option 3 | Sequ(aver)      | Sequenz-Kriterium durch Durchschnitt-Prinzip ohne Berücksichtigung vergebener Aufträge |
|                   | Option 4 | Sequ(M,alle)    | Sequenz-Kriterium durch „Big M“-Prinzip mit Berücksichtigung vergebener Aufträge       |
|                   | Option 5 | Sequ(aver,alle) | Sequenz-Kriterium durch Durchschnitt-Prinzip mit Berücksichtigung vergebener Aufträge  |

Die Kombinationen der Auswahlkriterien für jeden Algorithmus sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

**Tabelle 6-2:** Index und Beschreibung verschiedener Kombinationen der Kriterien bei verschiedenen Optimierungsalgorithmen

| Optimierung bei Zuweisung des Auftrags |                            |    | Optimierung durch den Umtausch der Aufträge         |    |                          |   |       |
|----------------------------------------|----------------------------|----|-----------------------------------------------------|----|--------------------------|---|-------|
| Individuelle Optimierung               |                            |    | Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles |    |                          |   |       |
| 1                                      | Zeit(Original Model)       | 20 | Route+Sequ(M,alle)+Zeit                             | 1  | Zeit                     | 1 | Minim |
| 2                                      | Minim                      | 21 | Route+Sequ(aver,alle)+Zeit                          | 2  | Mini                     |   |       |
| 3                                      | Minim+Zeit                 | 22 | Sequ(M)                                             | 3  | Mini+Zeit                |   |       |
| 4                                      | Minim+Sequ(M)              | 23 | Sequ(aver)                                          | 4  | Mini+Seq(M)              |   |       |
| 5                                      | Minim+Sequ(aver)           | 24 | Sequ(M,alle)                                        | 5  | Mini+Seq(aver)           |   |       |
| 6                                      | Minim+Sequ(M,alle)         | 25 | Sequ(aver,alle)                                     | 6  | Mini+Seq(M,alle)         |   |       |
| 7                                      | Minim+Sequ(aver,alle)      | 26 | Sequ(M)+Zeit                                        | 7  | Mini+Seq(aver,alle)      |   |       |
| 8                                      | Minim+Sequ(M)+Zeit         | 27 | Sequ(aver)+Zeit                                     | 8  | Mini+Seq(M)+Zeit         |   |       |
| 9                                      | Minim+Sequ(aver)+Zeit      | 28 | Sequ(M,alle)+Zeit                                   | 9  | Mini+Seq(aver)+Zeit      |   |       |
| 10                                     | Minim+Sequ(M,alle)+Zeit    | 29 | Sequ(aver,alle)+Zeit                                | 10 | Mini+Seq(M,alle)+Zeit    |   |       |
| 11                                     | Minim+Sequ(aver,alle)+Zeit |    |                                                     | 11 | Mini+Seq(aver,alle)+Zeit |   |       |
| 12                                     | Route                      |    |                                                     | 12 | Seq(M)                   |   |       |
| 13                                     | Route+Zeit                 |    |                                                     | 13 | Seq(aver)                |   |       |
| 14                                     | Route+Sequ(M)              |    |                                                     | 14 | Seq(M,alle)              |   |       |
| 15                                     | Route+Sequ(aver)           |    |                                                     | 15 | Seq(aver,alle)           |   |       |
| 16                                     | Route+Sequ(M,alle)         |    |                                                     | 16 | Seq(M)+Zeit              |   |       |
| 17                                     | Route+Sequ(aver,alle)      |    |                                                     | 17 | Seq(aver)+Zeit           |   |       |
| 18                                     | Route+Sequ(M)+Zeit         |    |                                                     | 18 | Seq(M,alle)+Zeit         |   |       |
| 19                                     | Route+Sequ(aver)+Zeit      |    |                                                     | 19 | Seq(aver,alle)+Zeit      |   |       |

Alle oben genannten Kombinationen der Auswahlkriterien werden getestet.

## 2. Der Einfluss der Anzahl der Shuttles (Kosten)

Im Logistiksystem sind neben der Effizienz auch die Kosten ein Schlüsselfaktor. Die Kosten umfassen Fläche, Hardware, Steuerungssystem, Managementsystem usw. In dieser Arbeit wird die Verhalten des Systems mit demselben Layout untersucht. Die Hauptauswirkung auf die Kosten ist daher die Anzahl der Shuttles.

Gemäß der obigen Analyse hat die Anzahl der Shuttles ihre Obergrenze. In diesem Modell beträgt die maximale Anzahl der Shuttles 12. Daher wird das Verhalten des Systems mit von 1 Shuttle auf 12 Shuttles untersucht.

### 3. Der Einfluss des Auftragssystems

Beim Versuche der obigen Optimierungsalgorithmen spielte das Auftragssystem eine wichtige Rolle. Unterschiedliche Auftragssysteme führen zu geringfügigen Änderungen der Systemleistung.

Für einen bestimmten Optimierungsalgorithmus sollte die Untersuchung des Verhaltens der Algorithmus vom Auftragssystem nicht beeinflusst werden. Bei der Untersuchung eines bestimmten Optimierungsalgorithmus werden daher mehrere verschiedene Auftragssysteme verwendet, um Störungen von Auftragssystemen durch mehrere Experimente zu eliminieren. Entsprechend des Verhalten des Algorithmus unter verschiedenen Auftragssystemen kann die tatsächliche Leistung des Algorithmus geschätzt werden.

Für den Vergleich zwischen Algorithmen müssen sichergestellt, dass die Algorithmen unter denselben Bedingungen ausgeführt werden, d.h. dass dasselbe Auftragssystem erforderlich ist. Durch Vergleichen der Leistung jedes Algorithmus unter mehreren Gruppen desselben Auftragssystems kann der Vergleich der Optimalität zwischen den Algorithmen sinnvoll sein.

Zusammenfassend muss das Auftragssystem gesteuert werden, um unterschiedliche experimentelle Anforderungen zu erfüllen. In diesen Versuchen wird das Auftragssystem durch den Startwert der Zufallszahl (seed) gesteuert.

#### 6.1.2 Auswertungskriterien zum Systemstabilität und -leistung

##### 1. Langfristigen Systemstabilität und –Robustheit durch die Anzahl der Ausgangsmenge im Laufe der Zeit

Die langfristige Stabilität des Systems ist ein wichtiger Indikator zur Auswertung des Optimierungsalgorithmus. Die Einflussfaktoren, die zu Systeminstabilität führen, werden oben logisch schon nachgewiesen. In diesem Kapitel wird die Stabilität jedes Algorithmus anhand der tatsächlichen Simulationsergebnisse weiter überprüft. Daie Auswertungskriterien berücksichtigen hauptsächlich die Langfristige Betriebsfähigkeit des Systems und die Linearitätsbeziehung zwischen der Ausgangsmenge des Systems und Zeit.

##### Langfristige Betriebsfähigkeit des Systems

Die Langfristige Betriebsfähigkeit des Systems für Logistik bedeutet, dass die Transportfähigkeit des Systems nach einem unbegrenzten Zeitraum noch existieren. Dies

umfasst die Einlagerung in das Logistiksystem und Auslagerung aus dem Logistiksystem.

In dieser Arbeit spiegelt sich die Langfristige Betriebsfähigkeit des Systems mit dem Verhältnis der Abschlusszeit der letzten Auftrag und der Gesamtzeit über einen unbegrenzten Zeitraum wider, wie unten gezeigt:

$$\text{Index}_{LB,\infty} = \lim_{\text{Simulation\_Zeit} \rightarrow \infty} \frac{\text{Abschlusszeit des letzten Auftrags}}{\text{simulation\_Zeit}} \quad (6-1)$$

$\text{Index}_{LB,\infty}$  liegt zwischen 0 und 1. Wenn  $\text{Index}_{LB,\infty} = 1$ , kann das System langfristig laufen. Wenn andernfalls  $\text{Index}_{LB,\infty} = 0$ , verliert das System zu einem bestimmten Zeitpunkt die Auftragsabwicklungskapazität. Da die tatsächliche Simulationszeit nicht unendlich sein kann, kann der tatsächliche Index für langfristigen Betrieb  $\text{Index}_{LB}$  nach folgender Formel berechnet werden:

$$\text{Index}_{LB,Aus/Ein} = \frac{\text{Abschlusszeit des letzten Auftrags für Auslagerung/Einlagerung}}{\text{Simulation\_Zeit}} \quad (6-2)$$

$$\text{Index}_{LB,Ges} = \frac{\text{Abschlusszeit des letzten Auftrags}}{\text{Simulation\_Zeit}} = \max(\text{Index}_{LB,Aus}, \text{Index}_{LB,Ein}) \quad (6-3)$$

### Linearität zwischen der Ausgangsmenge des Systems und Zeit

Die Linearität zwischen Systemausgangsmenge und Zeit spiegelt die Auswirkung des Auftragssystems und des Layouts auf dem System wider. Die Berechnungsformel der Linearität lautet wie folgt:

$$\text{Linearität}_{Aus/Ein/Ges} = 1 - \frac{\Delta N_{max,Aus/Ein/Ges}}{N_{max,Aus/Ein/Ges}} \quad (6-4)$$

Wobei  $\Delta N_{max}$  die maximale Abweichung zwischen der tatsächlichen t-n-Kurve und ihrem linearen Anpassungsergebnis ist,  $N_{max}$  der Maximalwert der tatsächlichen t-n-Kurve ist. Wie unten gezeigt:

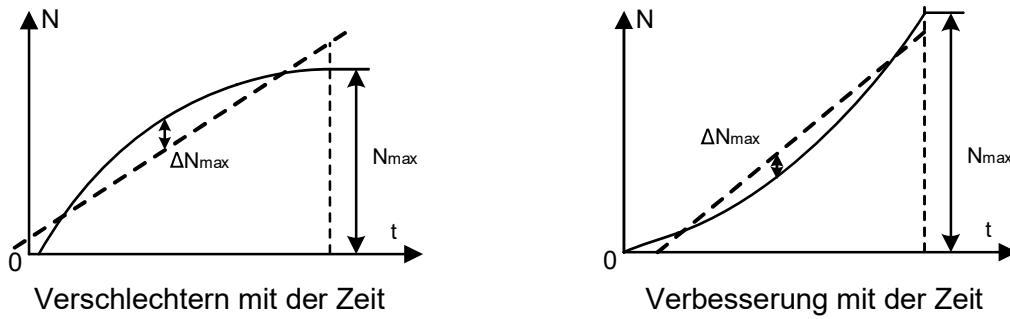


Abbildung 6-1: Berechnungsmethode der Linearität und mögliche Situationen

Die schlechte Linearität der Systemleistung mit der Zeit bedeutet normalerweise, dass die Geschwindigkeit der Zunahme der Ausgangsmenge des Systems abnimmt. Das darauf hinweist, dass das System nach einer langen Betriebsdauer zum Verlust der Effizienz neigt. Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass mit einigen Algorithmen im Anfangsstadium eine schlechte Leistung, aber nach einer langen Laufzeit eine bessere Leistung erbringen können.

### Zeitaufwand pro Ausgangseinheit basierend auf linearer Anpassung

Durch lineares Anpassen der Ausgangskurve im n-t-Diagramm kann schließlich die folgende Gleichung erhalten werden:

$$t(n) = a_1 n + a_2 \quad (6-5)$$

Zeitaufwand pro Ausgangseinheit ist definiert als die Steigung der linearen Anpassungsgeraden im n-t-Graphen, d.h. der Koeffizient des ersten Terms  $a_1$  von  $n$  in der  $t(n)$ -Funktion. Dies spiegelt die Zeit wider, die zum Abschließen eines Auftrags erforderlich ist. Wenn  $a_1$  klein ist, bedeutet dies, dass jeder Auftrag weniger Zeit benötigt und die Systemeffizienz höher ist, andernfalls ist die Systemeffizienz niedriger.



Abbildung 6-2: Berechnungsmethode von Zeitaufwand pro Ausgangseinheit und Startzeit des stabilen Ausgangs

## Startzeit des stabilen Ausgangs basierend auf linearer Anpassung

Die Startzeit ist definiert als der Schnittpunkt der linear angepassten Geraden und der vertikalen Achse  $t$  im n-t-Diagramm, d.h. der Koeffizient nullter Ordnung  $a_2$  von  $n$  in der Funktion  $t(n)$ . Es stellt die hypothetische Zeit dar, zu der das System mit einer konstanten Ausgangsrate beginnt. Es kann davon angenommen werden, dass das System zwischen dem Zeitpunkt  $t = 0$  und  $t = a_2$  keine Ausgang hat und das System eine konstante Ausgangsrate  $a_1$  nach  $t = a_2$  erzeugt.

Wenn  $a_2$  groß ist, bedeutet dies, dass das System lange Zeit keine Ausgabe hat und die Effizienz der Anfangsstufe des Systems gering ist. Andernfalls kann im System der erste Auftrag schnell abgeschlossen werden und die Anfangsstufe ist effizienter.

Die vier Kriterien zur Beurteilung der langfristigen Systemstabilität und –Robustheit sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

*Tabelle 6-3: Symbol und Berechnungsformel für die Kriterien der langfristigen Systemstabilität und –Robustheit*

| Symbol       | Beschreibung                                                     | Formel zur Berechnung                                                                     |
|--------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Index_{LB}$ | Index für langfristige Betriebsfähigkeit                         | $Index_{LB} = \frac{Abschlusszeit\ des\ letzten\ Auftrags}{Simulation\_Zeit}$             |
| $Linearität$ | Linearität zwischen der Ausgangsmenge des Systems und Zeit       | $Linearität_{Aus/Ein/Ges} = 1 - \frac{\Delta N_{max\ Aus/Ein/Ges}}{N_{max\ Aus/Ein/Ges}}$ |
| $Startzeit$  | Startzeit des stabilen Ausgangs basierend auf linearer Anpassung | $a_1$ aus $t(n) = a_1n + a_2$                                                             |
| $\Delta t$   | Zeitaufwand pro Ausgangseinheit basierend auf linearer Anpassung | $a_2$ aus $t(n) = a_1n + a_2$                                                             |

Im Folgenden wird die langfristige Systemstabilität und -Robustheit anhand der oben genannten Kriterien analysiert.

### 2. Systemleistung durch die Anzahl der Ausgangsmenge pro Stunde

Neben der langfristigen Stabilität jedes Optimierungsalgorithmus ist die Systemleistung auch ein sehr wichtiges Bewertungskriterium. In dieser Arbeit wird die Systemleistung mit verschiedenem Optimierungsalgorithmen anhand der Ausgangsmenge pro Zeiteinheit beurteilt. Da unterschiedliche Auftragssysteme die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit beeinflussen, werden in dieser Arbeit die Systeme zufällig mit mehreren Auftragssystemen getestet, um den Durchschnittswert und die Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Zeiteinheit zu erhalten und die Leistung der Optimierungsalgorithmen vorherzusagen.

## Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde

Der Durchschnittswert der Ausgangsmenge ist ein wichtiges Kriterium, der den Optimierungsgrad der Algorithmen widerspiegelt. Durch den Durchschnittswert mehrerer Experimente können die erwartete Ausgangsmenge jedes Algorithmus im Allgemeinen erhalten werden. Die Berechnungsmethode lautet wie folgt:

$$\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein} = \sum_{i=1}^N \dot{n}_{Aus/Ein,i} \quad (6-6)$$

$$\dot{n}_{Ges} = \sum_{i=1}^N \dot{n}_{Ges,i} = \sum_{i=1}^N (\dot{n}_{Aus,i} + \dot{n}_{Ein,i}) = \dot{\bar{n}}_{Aus} + \dot{\bar{n}}_{Ein} \quad (6-7)$$

Wobei  $N$  die Anzahl der Versuche,  $\dot{n}_{Aus/Ein,i}$  die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit von Auslagerung und Einlagerung des  $i$ -ten Experiments,  $\dot{n}_{Ges,i}$  die gesamten Ausgangsmenge pro Zeiteinheit des  $i$ -ten Experiments repräsentiert.  $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein}$  repräsentiert die durchschnittliche Ausgangsmenge pro Zeiteinheit von Auslagerung und Einlagerung von  $N$  Experimenten,  $\dot{n}_{Ges}$  repräsentiert die durchschnittliche gesamten Ausgangsmenge pro Zeiteinheit von  $N$  Experimenten.

## Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde

Einige Algorithmen können möglicherweise zu einer höheren durchschnittlichen Ausgangsmenge pro Zeiteinheit führen, aber ihre Ausgangsmenge pro Zeiteinheit kann mit dem Auftragssystem stark schwanken. Daher wird die Standardabweichung eingeführt, um den Einfluss verschiedener Auftragssysteme auf den Optimierungsalgorithmen zu definieren. Die Berechnungsmethode lautet wie folgt:

$$\sigma_{Aus/Ein} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\dot{n}_{Aus/Ein,i} - \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein})^2} \quad (6-8)$$

Wobei  $\sigma_{Aus/Ein}$  die Standardabweichungen der Ausgangsmenge pro Zeiteinheit von Auslagerung und Einlagerung in  $N$  Experimenten sind. Nach  $\dot{n}_{Ges} = \dot{\bar{n}}_{Aus} + \dot{\bar{n}}_{Ein}$  können die Standardabweichung des gesamten Ausgangsvolumens wie folgt erhalten werden:

$$\sigma_{Ges} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\dot{n}_{Ges,i} - \dot{n}_{Ges})^2} \approx \sqrt{\sigma_{Aus}^2 + \sigma_{Ein}^2} \quad (6-9)$$

$\sigma_{Ges}$  repräsentiert die Standardabweichung der gesamten Ausgangsmenge pro Zeiteinheit in  $N$  Experimenten.

## Die geschätzten Maximal- und Minimalwerte der Ausgangsmenge pro Stunde basieren auf dem $6\sigma$ -Prinzip

Da die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit des ursprünglichen Modells auch eine gewisse Abweichung aufweist, werden die Maximal- und Minimalwerte der Ausgangsmenge pro Zeiteinheit unter Bezugnahme auf  $6\sigma$ -Prinzip auf der Grundlage der Durchschnitts- und Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Zeiteinheit wie folgt geschätzt, um die Vorteile des neuen Optimierungsalgorithmen widerzuspiegeln:

$$\dot{\tilde{n}}_{Aus/Ein/Ges,max} = \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges} + 3\sigma_{Aus/Ein/Ges} \quad (6-10)$$

$$\dot{\tilde{n}}_{Aus/Ein/Ges,min} = \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges} - 3\sigma_{Aus/Ein/Ges} \quad (6-11)$$

Wobei  $\dot{\tilde{n}}_{Aus/Ein/Ges,max}$  repräsentiert den geschätzten Maximalwert der Ausgangsmenge pro Zeiteinheit;  $\dot{\tilde{n}}_{Aus/Ein/Ges,min}$  repräsentiert den geschätzten Minimalwert der Ausgangsmenge pro Zeiteinheit.

Wenn der geschätzte Minimalwert der Ausgangsmenge pro Zeiteinheit des neuen Optimierungsalgoritmus größer als der geschätzte Maximalwert der Ausgangsmenge pro Zeiteinheit des ursprünglichen Modells ist, können das Optimierungsalgoritmus als absolut optimal bezeichnet werden.

$$\dot{\tilde{n}}_{Aus/Ein/Ges,min} > \dot{\tilde{n}}_{Aus/Ein/Ges,max} \text{ des ursprünglichen Modells} \quad (6-12)$$

Es gibt jedoch immer noch eine Situation: Obwohl der Minimalwert der Ausgangsmenge pro Zeiteinheit der neuen Optimierungsalgorithmen kleiner als der Maximalwert der Minimalwert der Ausgangsmenge pro Zeiteinheit des ursprünglichen Modells ist, ist für jedes Auftragssystem die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit der neuen Optimierungsalgorithmen immer größer als die des ursprünglichen Modells. In diesem Fall sind die neuen Optimierungsalgorithmen immer noch besser als das ursprüngliche Modell. Diese Situation ist schwer streng zu beweisen, daher wird hier nicht darauf eingegangen.

## Der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung

Zusätzlich zu der Zahl der Auslagerung und Einlagerung pro Zeiteinheit ist es in einigen Fällen auch wünschenswert, dass der Unterschied zwischen der Zahl der Auslagerung und Einlagerung nicht zu groß ist oder dass ein kontrollierter Unterschied zwischen der Zahl der Auslagerung und Einlagerung besteht.

Für das Logistiksystem kann die absolute Differenz zwischen der Zahl der Auslagerung und Einlagerung eine Grundlage für die Anzahl der im Lager eingerichteten Pufferbereiche bilden. In dieser Arbeit wird daher die absolute Differenz zwischen den beiden als Bewertungsindex eingeführt. Die Berechnungsmethode lautet wie folgt:

$$\Delta\dot{n} = \dot{n}_{Ein} - \dot{n}_{Aus} \quad (6-13)$$

$\Delta\dot{n}$  stellt die Differenz zwischen dem Durchschnittswert der Zahl der Auslagerung und Einlagerung dar, und sein Wert kann größer als 0 oder kleiner als 0 sein. Wenn  $\Delta\dot{n} > 0$ , ist die Anzahl der Einlagerung größer als die der Auslagerung, was zur Erhöhung des Lagerbestand führt. Wenn  $\Delta\dot{n} < 0$ , ist die Anzahl der Auslagerung größer als die der Einlagerung, was zum Reduzieren des Lagerbestands verwendet wird.

### Durchschnittswert und Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde pro Shuttle

Die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit pro Shuttle wird im Experiment auf die Anzahl der Shuttles verwendet, um den Einfluss der Anzahl der Shuttles auf die Systemleistung zu untersuchen. Die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit pro Shuttle bezieht sich auf das Verhältnis der Ausgangsmenge pro Zeiteinheit zur Anzahl der Shuttles im aktuellen System. Die Berechnungsmethode für den Mittelwert und die Standardabweichung lautet wie folgt:

$$\bar{\dot{n}}'_{Aus/Ein} = \frac{1}{M} \dot{n}_{Aus/Ein} \quad (6-14)$$

$$\sigma'_{Aus/Ein} = \frac{1}{\sqrt{M}} \sigma_{Aus/Ein} \quad (6-15)$$

Wobei  $M$  die Anzahl der Shuttles ist. Die Berechnungsformel der gesamten Ausgangsmenge pro Zeiteinheit zur Anzahl lautet wie folgt:

$$\bar{\dot{n}}'_{Ges} = \frac{1}{M} \dot{n}_{Ges} = \bar{\dot{n}}'_{Aus} + \bar{\dot{n}}'_{Ein} \quad (6-16)$$

$$\sigma'_{Ges} = \frac{1}{\sqrt{M}} \sqrt{\sigma_{Aus}^2 + \sigma_{Ein}^2} \quad (6-17)$$

Die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit pro Shuttle kann verwendet werden, um die Effizienz jedes Shuttles im System widerzuspiegeln.

Zusammenfassend sind die fünf Kriterien zur Beurteilung der Systemleistung in der folgenden Tabelle aufgelistet:

*Tabelle 6-4: Symbol und Berechnungsformel für die Kriterien der Systemleistung*

| Symbol                                                                 | Beschreibung                                                                                  | Formel zur Berechnung                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein}$<br>$\dot{\bar{n}}_{Ges}$                     | Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde                                                | $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein} = \sum_{i=1}^N \dot{n}_{Aus/Ein,i}$<br>$\dot{\bar{n}}_{Ges} = \dot{\bar{n}}_{Aus} + \dot{\bar{n}}_{Ein}$                                                                                                                                            |
| $\sigma_{Aus/Ein}$<br>$\sigma_{Ges}$                                   | Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde                                               | $\sigma_{Aus/Ein} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\dot{n}_{Aus/Ein,i} - \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein})^2}$<br>$\sigma_{Ges} = \sqrt{\sigma_{Aus}^2 + \sigma_{Ein}^2}$                                                                                                            |
| $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,max}$<br>$\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,min}$ | Die geschätzten Minimalwerte der Ausgangsmenge pro Stunde basieren auf dem <b>6σ</b> -Prinzip | $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,max} = \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges} + 3\sigma_{Aus/Ein/Ges}$<br>$\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,min} = \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges} - 3\sigma_{Aus/Ein/Ges}$                                                                                           |
| $\Delta n$                                                             | Der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung                         | $\Delta \dot{n} = \dot{\bar{n}}_{Ein} - \dot{\bar{n}}_{Aus}$                                                                                                                                                                                                                 |
| $\dot{\bar{n}}'_{Aus/Ein/Ges}$<br>$\sigma'_{Aus/Ein/Ges}$              | Durchschnittswert und Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde pro Shuttle             | $\dot{\bar{n}}'_{Aus/Ein} = \frac{1}{M} \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein}, \sigma'_{Aus/Ein} = \frac{1}{\sqrt{M}} \sigma_{Aus/Ein}$<br>$\dot{\bar{n}}'_{Ges} = \dot{\bar{n}}'_{Aus} + \dot{\bar{n}}'_{Ein}, \sigma'_{Ges} = \frac{1}{\sqrt{M}} \sqrt{\sigma_{Aus}^2 + \sigma_{Ein}^2}$ |

Im Folgenden wird die Systemleistung anhand der oben genannten Kriterien analysiert.

### 6.1.3 Versuchsplan

In diesem Abschnitt wird der Versuchsplan auf der Grundlage der obigen Einflussgrößen und Auswertungskriterien formuliert, und der Versuchsplan wird nachstehend anhand verschiedener Auswertungskriterien ausführlich beschrieben.

#### 1. Versuchsplan für die langfristige Systemstabilität

Der Zweck dieses Experiments ist es, die langfristige Systemstabilität und -Robustheit mit verschiedener Algorithmen zu untersuchen. Die experimentellen Parameter sind in der folgenden Tabelle gezeigt:

Tabelle 6-5: Versuchsplan für die langfristige Systemstabilität

|                     | Umtauschbarkeit              | Wert oder Wertbereich                             |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| Konstante Parameter | <b>Layout</b>                | Layout des originalen Modells                     |
|                     | <b>Anzahl der Versuche</b>   | 1                                                 |
|                     | <b>Simulationszeit</b>       | 86400 Sekunden = 24 Stunden = 1 Tag               |
|                     | <b>Anzahl der Shuttles</b>   | 12                                                |
|                     | <b>Reservierungsform</b>     | Treppe                                            |
| Variable Parameter  | <b>Störungsstrategie</b>     | 0 – Idealbetrieb (keine Störung)                  |
|                     | <b>Auftragssystem</b>        | 5 Auftragssysteme nach der Nummer des Experiments |
|                     | <b>Optimierungsstrategie</b> | Optimierung bei Zuweisung des Auftrags            |

Gemäß der obigen Analyse können erfahren werden, dass bei einer großen Anzahl von Shuttles im System der globale Deadlock des Systems möglicher auftreten kann, wodurch die Stabilität des Systems verringert wird. Um die Grenzstabilität des Systems mit globalen Optimierungsalgorithmus zu untersuchen, wird in diesem Modell die maximale Anzahl von Shuttles 12 zur Überprüfung der langfristigen Betriebsfähigkeit ausgewählt.

Da die Simulation der unendlichen Zeit nicht durchgeführt werden kann, wird entsprechend der tatsächlichen Situation und der Simulationsgeschwindigkeit 24 Stunden als Simulationszeit für die Versuche der langfristigen Betriebsfähigkeit des Systems ausgewählt.

Aufgrund der erforderlichen langen Simulationszeit für viele Experimente wird dieses Experiment für jeden Optimierungsalgorithmus nur einmal wiederholt. Dies kann aufgrund des schwer zu überprüfenden Auftragssystem zur Instabilität einiger Algorithmen führen, aber dieses Experiment kann dennoch eine bestimmte Grundlage für das Filtern des Algorithmus liefern.

## 2. Versuchsplan für Durchschnitt und Abweichung der Anzahl des Ausgangs pro Stunde

Der Zweck dieses Experiments besteht darin, die Auswirkung verschiedener Algorithmen mit verschiedener Kombinationen der Kriterien desselben Algorithmus auf die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit zu untersuchen. Die experimentellen Parameter sind in der folgenden Tabelle gezeigt:

**Tabelle 6-6:** Versuchsplan für Durchschnitt und Abweichung der Anzahl des Ausgangs pro Stunde

|                     | Umtauschbarkeit              | Wert oder Wertbereich                             |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| Konstante Parameter | <b>Layout</b>                | Layout des originalen Modells                     |
|                     | <b>Anzahl der Versuche</b>   | 5                                                 |
|                     | <b>Simulationszeit</b>       | 3600 Sekunden = 1 Stunde                          |
|                     | <b>Anzahl der Shuttles</b>   | 12                                                |
|                     | <b>Reservierungsform</b>     | Treppe                                            |
| Variable Parameter  | <b>Störungsstrategie</b>     | 0 – Idealbetrieb (keine Störung)                  |
|                     | <b>Auftragssystem</b>        | 5 Auftragssysteme nach der Nummer des Experiments |
|                     | <b>Optimierungsstrategie</b> | Optimierung bei Zuweisung des Auftrags            |

Eine Stunde wird hier als Zeiteinheit verwendet, daher setzt dieses Experiment die Simulationszeit auf eine Stunde. Und dann führt 5 Experimente mit jedem Algorithmus gemäß verschiedenen Auftragssystemen durch. Wie im vorherigen Experiment wird auch in diesem Experiment die Anzahl der Shuttles auf ihren Maximalwert von 12 gesetzt, wodurch die Grenzeffizienz des Algorithmus untersucht wird.

### 3. Versuchsplan für die Einfluss der Anzahl des Shuttles

Der Zweck dieses Experiments besteht darin, den Einfluss der Anzahl der Shuttles auf die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit jedes Algorithmus zu untersuchen. In diesem Experiment wird 1 Stunde als Simulationszeit ausgewählt. Gemäß der obigen Analyse wird die Anzahl der Shuttle von 1 bis zum Maximalwert von 12 ausgewählt, was insgesamt 12 Shuttle-Nummern entspricht. Die anderen Parameter sind wie folgt:

**Tabelle 6-7:** Versuchsplan für die Einfluss der Anzahl des Shuttles

|                     | Umtauschbarkeit              | Wert oder Wertbereich                                                                                       |
|---------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Konstante Parameter | <b>Layout</b>                | Layout des originalen Modells                                                                               |
|                     | <b>Anzahl der Versuche</b>   | 5                                                                                                           |
|                     | <b>Simulationszeit</b>       | 3600 Sekunden = 1 Stunde                                                                                    |
|                     | <b>Reservierungsform</b>     | Treppe                                                                                                      |
|                     | <b>Störungsstrategie</b>     | 0 – Idealbetrieb (keine Störung)                                                                            |
| Variable Parameter  | <b>Auftragssystem</b>        | 5 Auftragssysteme nach der Nummer des Experiments                                                           |
|                     | <b>Anzahl der Shuttles</b>   | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12                                                                       |
|                     | <b>Optimierungsstrategie</b> | Ausgewählte Optimierungsstrategie bei Zuweisung des Auftrags<br>Optimierung durch den Umtausch der Aufträge |

Wenn jede Kombination von Kriterien experimentiert werden, ist die Anzahl der Experimente sehr groß. Daher wird vor Durchführung dieses Experiments durch die beiden vorherigen Experimente eine bessere Kombination von Kriterien ausgewählt, wodurch

die Anzahl der Experimente effektiv reduziert und relevante wichtige Informationen erhalten werden können.

#### 6.1.4 Hilfssoftware zur Auswertung

Um Experimente und Datenverarbeitung zu erleichtern, werden in diesem Abschnitt verwandte Hilfssoftware vorgestellt.

Die Experimente werden hauptsächlich von Tecnomatix Plant Simulation durchgeführt, und ein automatisches Schleifensimulationsprogramm wird eingerichtet, damit Tecnomatix den gesamten experimentellen Inhalt nach einer künstlichen Aktivierung vervollständigen und die erhaltenen Daten in Excel-Tabellen speichern können.

Um die Datenverarbeitung zu vereinfachen, wird das Software MatLab verwendet, damit die Excel-Daten gelesen und die entsprechende Berechnungsverarbeitung durchgeführt werden. Um Daten bequemer und intuitiver anzuzeigen, wurde auch eine GUI-Benutzeroberfläche entwickelt.

Im Folgenden werden diese Hilfssoftware ausführlich erläutert.

##### 1. Einstellungen für die automatische Schleifensimulation von Tecnomatix Plant Simulation

#### Einstellungen für die Schleifensimulation

Durch den Schleifensimulationsalgorithmus kann nach einmaligen manuellen Drucken von „Start“ mehrere Simulationen aller Algorithmen mit unterschiedlichen Simulationszeitraum durchzuführen. Die beteiligten Module sind wie folgt:

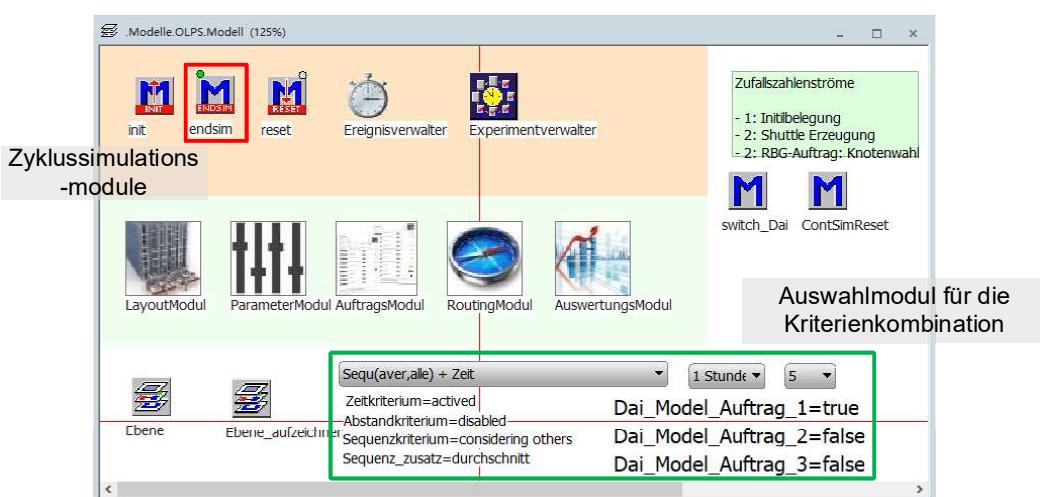


Abbildung 6-3: Relevante Objekte und Methode für Einstellung der Schleifensimulation

Der Kern der Schleifensimulation besteht darin, festzustellen, ob am Ende jeder Simulation alle Algorithmen ausgeführt wurden. Wenn nicht, wird die Simulation zurückgesetzt, die nächsten Simulationsparameter werden eingesetzt und die Simulation wird neu gestartet. Die Logik der Kernmethode „endsim“ lautet wie folgt:

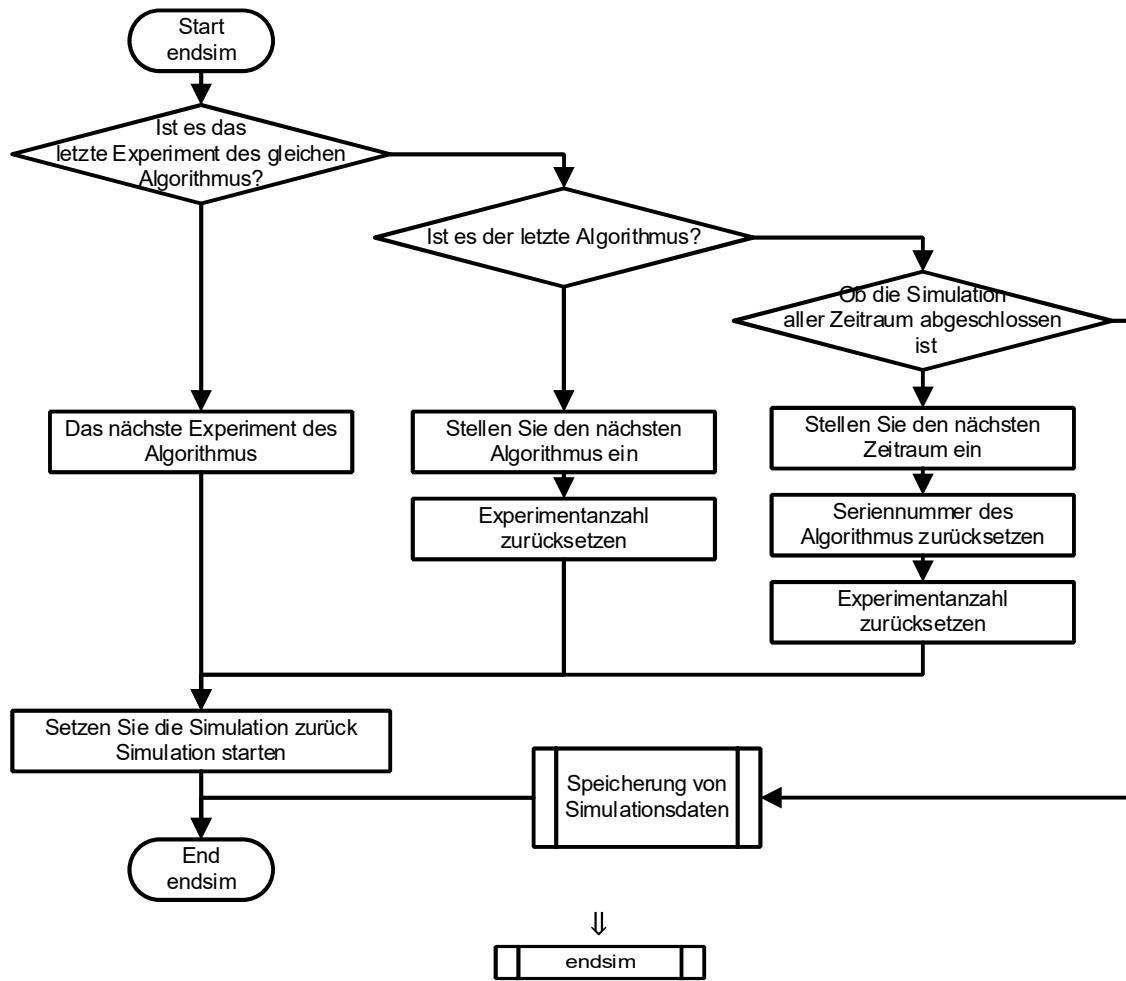


Abbildung 6-4: Flussdiagramm der Methode „endsim“ für Schleifensimulation

Durch die Schleifensimulation kann jeder Algorithmus schnell eingestellt und eine kontinuierliche Simulation durchgeführt werden. Wenn alle Experimente abgeschlossen sind, werden die erhaltenen Daten in Excel-Dateien gespeichert. Das Datenspeichermodul wird als nächstes besprochen.

### Datenprotokollierungsmodul

Im ursprünglichen Modell werden die Simulationsergebnisse beim Ende einer Simulation in der Tabelle "Protokoll" aufgezeichnet, die hauptsächlich die Anzahl der Auslagerung und die Anzahl der Einlagerung enthält. Da keine Daten über die Ausgangsmenge mit der Zeit im Originalmodell jedoch vorliegen, wurden in diesem Modell zwei

Zeitlisten für Aufzeichnung der Ausgangsmenge mit der Zeit erstellt. Wenn sich die Anzahl der Auslagerung und die Anzahl der Einlagerung ändert, werden in der entsprechenden Zeitliste die Anzahl und die aktuelle Zeit aufgezeichnet. Wie unten gezeigt:

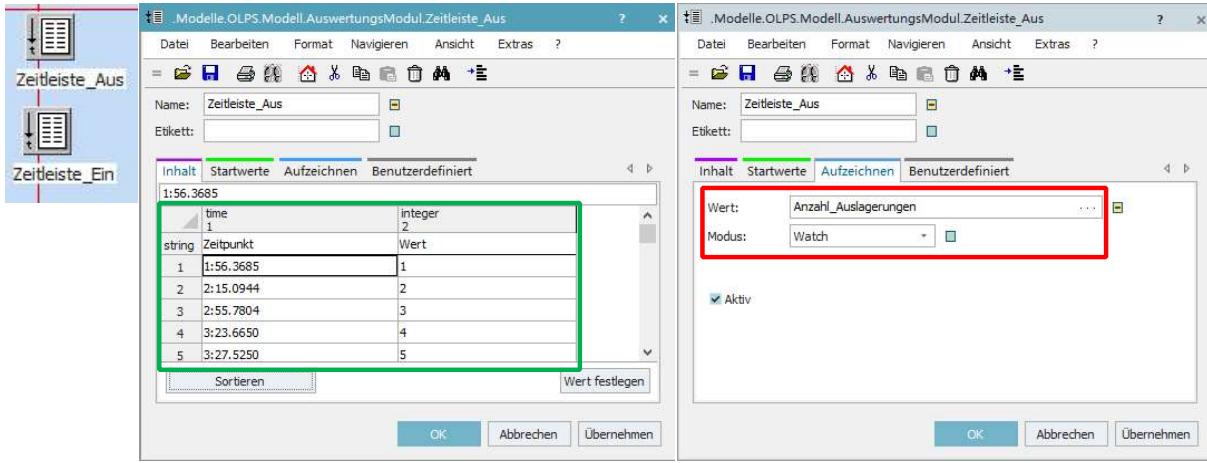


Abbildung 6-5: Zeitliste zur Aufzeichnung der Änderung der Ausgangsmenge mit der Zeit“

Wenn die Simulation endet, werden die Informationen in den beiden Zeitlisten entsprechend dem aktuellen Algorithmus und der Nummer der Experimente in die Tabelle „real\_format“ eingetragen. Die Struktur der Tabelle „real\_format“ ist wie unten dargestellt:

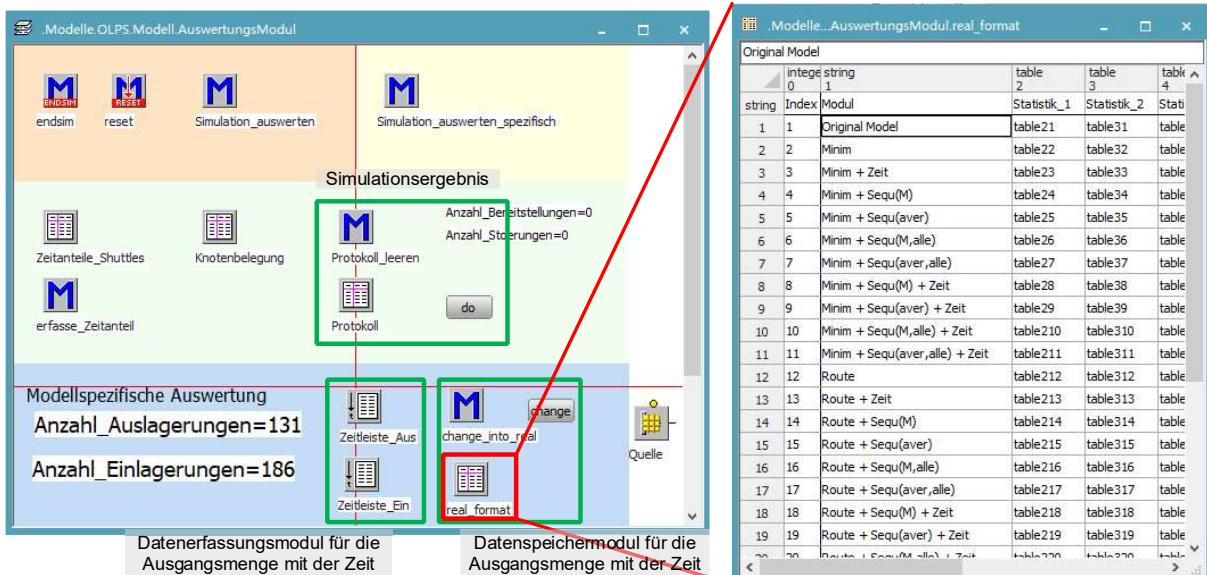


Abbildung 6-6: Relevante Tabelle, Objekte und Methode zur Aufzeichnung der Ergebnisse jeder Simulation

Die Ergebnisse jeder Simulation werden in der Tabelle „Protokoll“ und der Tabelle „real\_format“ gespeichert. Wenn alle Experimente abgeschlossen sind, wird der Inhalt dieser beiden Tabellen in Excel-Dateien gespeichert.

## Speichern in Excel-Dateien

Gemäß der obigen Beschreibung müssen nach Abschluss aller Experimente die Daten in der Tabelle „Protokoll“ und der Tabelle „real\_format“ als Excel-Dateien gespeichert werden. Da das Experiment viele Algorithmen und Experimente enthält, wird die Excel-Datei gemäß dem Algorithmus erstellt, und in jeder Excel-Datei wird ein Formular gemäß der Seriennummer des Experiments erstellt, um die Daten des Experiments zu speichern. Wie unten gezeigt:

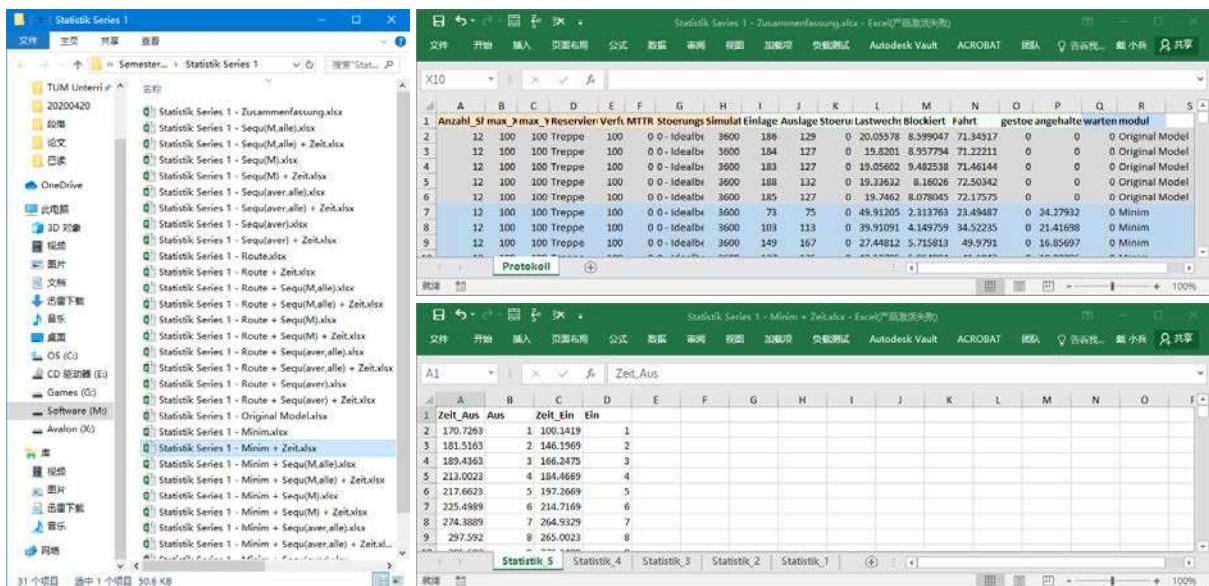


Abbildung 6-7: Die Excel-Dateien zur Speicherung der Ergebnisse aller Experimente

Zusätzlich zum Speichern der zeitvariablen Ausgangsmenge jedes Experiments werden auch die Endergebnisse aller Experimente gespeichert, wie in der rechten Abbildung oben gezeigt.

## 2. Lesen und Abbilden von Daten über die MatLab GUI

Um die Analyse der Daten in den Excel-Dateien zu erleichtern, wird die technische Mathematik-Software MatLab verwendet. Nach dem Lesen aller Daten in der Excel-Datei in MatLab können die erforderlichen Werte (wie Durchschnittswert, Standardabweichung usw.) und die entsprechende Bild schnell in Form von Code generiert werden.

Um die Bedienung und Anzeige von MatLab benutzerfreundlicher zu gestalten, wird über die MatLab GUI auch eine Mensch-Maschine-Schnittstelle eingerichtet, wie in der folgenden Abbildung dargestellt:

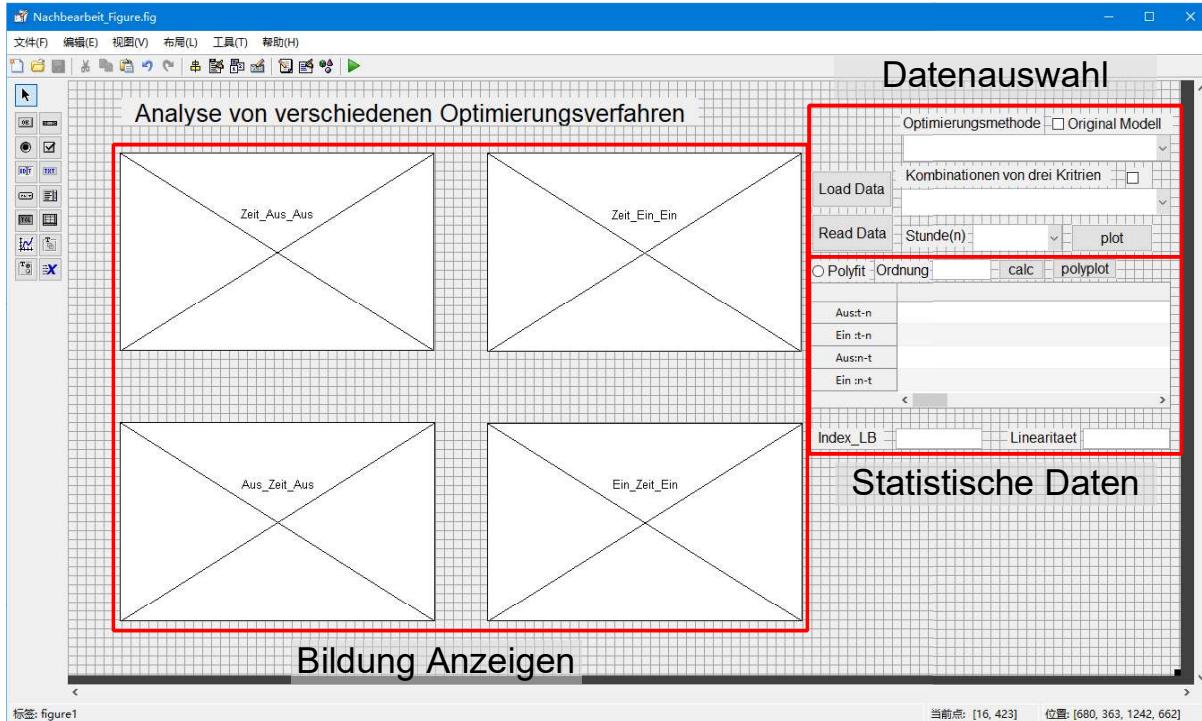


Abbildung 6-8: MatLab GUI für die Vereinfachung des Lesens und Abbildens von Ausgangsmenge mit der Zeit

Die Hauptfunktion der Mensch-Maschine-Schnittstelle besteht darin, die Beziehung zwischen Ausgangsmenge und Zeit zu analysieren. Diese GUI enthält hauptsächlich drei Funktionsgruppen. Das erste Funktionsgrupp ist das Datenauswahlmodul, dessen Funktion darin besteht, die entsprechenden experimentellen Daten gemäß dem Algorithmus, der Kombination von Kriterien und der Simulationszeit auszuwählen. Das Statistikmodul wird zur Datenverarbeitung verwendet. Dadurch können der Index für langfristigen Betrieb, die Linearität und die Polynomannpassungskurve des Experiments berechnet werden. Mit dem Bildanzeigemodul kann die t-n- und n-t-Kurven des Algorithmus und des Originalmodells sowie dessen Polynomannpassungskurve angezeigt werden.

Die spezifische Betriebsmethode dieser MatLab GUI wird im Anhang vorgestellt.

## 6.2 Auswertung der Optimierung bei der Zuweisung des Auftrags

### 6.2.1 Auswertung verschiedener Kombinationen von drei Auswahlkriterien für Aufträge auf langfristige Systemstabilität

- Auswertung verschiedener Kombinationen auf langfristige Systemstabilität bei individueller Optimierung

#### Langfristige Betriebsfähigkeit des Systems

Zunächst müssen die langfristigen Betriebsfähigkeiten der Algorithmen berücksichtigt werden.

Gemäß dem oben eingeführten Index für langfristige Betriebsfähigkeit  $Index_{LB}$  werden festgestellt, dass ausschließlich der Kombinationen der Kriterien in der folgenden Tabelle der Index anderer Kombinationen der Kriterien größer als 99% ist, was zeigt, dass mit dieser Algorithmen die Ausgang auch nach 24 Stunden beibehalten kann. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Algorithmen stabil sind. In der folgenden Tabelle sind alle instabilen Kombinationen der Kriterien aufgelistet:

Tabelle 6-8: Index für langfristige Betriebsfähigkeit aller Kombinationen der Kriterien für individuelle Optimierung

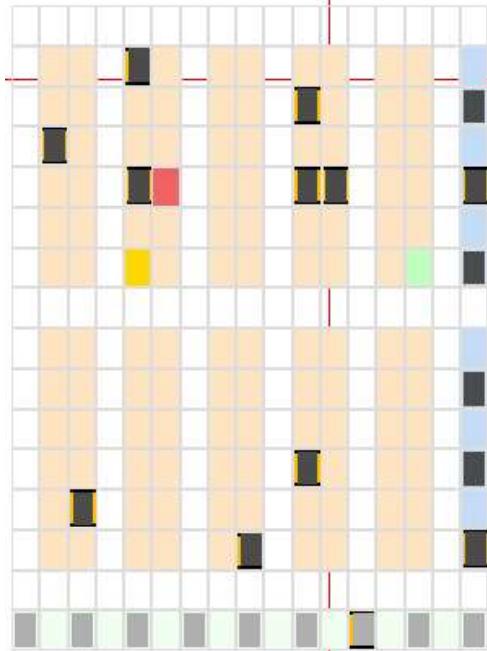
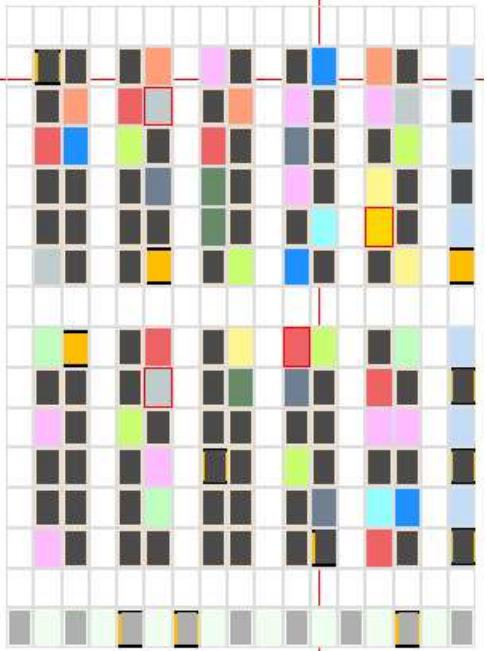
| Index | Modul                       | $Index_{LB}$ |             |        | Langfristige Betriebsfähigkeit |
|-------|-----------------------------|--------------|-------------|--------|--------------------------------|
|       |                             | Auslagerung  | Einlagerung | Gesamt |                                |
| 2     | Minim                       | 2.92%        | 3.01%       | 3.01%  | X                              |
| 6     | Minim + Sequ(M,alle)        | 27.57%       | 27.66%      | 27.66% | X                              |
| 7     | Minim + Sequ(aver,alle)     | 27.57%       | 27.66%      | 27.66% | X                              |
| 10    | Minim + Sequ(M,alle) + Zeit | 54.17%       | 53.84%      | 54.17% | X                              |
| 12    | Route                       | 2.46%        | 2.58%       | 2.58%  | X                              |
| 14    | Route + Sequ(M)             | 25.56%       | 25.62%      | 25.62% | X                              |
| 15    | Route + Sequ(aver)          | 25.56%       | 25.62%      | 25.62% | X                              |
| 16    | Route + Sequ(M,alle)        | 19.44%       | 19.55%      | 19.55% | X                              |
| 17    | Route + Sequ(aver,alle)     | 19.44%       | 19.55%      | 19.55% | X                              |

Gemäß der obigen Tabelle können feststellt werden, dass, wenn nur das Abstandskriterium übernommen wird, es leicht zu einem globalen Deadlock kommt, was zu einem raschen Rückgang der langfristigen Betriebsfähigkeit des Algorithmus führt. Daher ist es im Auftragssystem mit der Anforderung an Sequenz unmöglich, nur das Abstandskriterium zu berücksichtigen.

Darüber hinaus hat das Zeitkriterium eine starke Fähigkeit, einen langfristigen Betrieb für das Auftragssystem mit der Anforderung an Sequenz zu gewährleisten. Wie aus der obigen Tabelle ersichtlich ist, haben mit Ausnahme von 10-ten Experiment andere Algorithmen ohne langfristige Betriebsfähigkeit das Zeitkriterium nicht eingeführt. Das 10-te Experiment hat die längste Laufzeit unter den Experimenten in der obigen Tabelle, die etwa doppelt so lang ist wie die anderer Algorithmen.

Entsprechend dem Zustand des globalen Deadlocks können die Gründe für das geringen langfristige Betriebsfähigkeit auf zwei Punkte zusammengefasst werden: das Sequenzproblem und die Anzahl der Speicherknoten, wie unten gezeigt:

Tabelle 6-9: *Zwei Gründe für das geringen langfristige Betriebsfähigkeit*

| Ursachen<br>des globalen<br>Deadlocks | Aufgrund der Sequenz                                                               | Aufgrund der Anzahl der Lagerplätze                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bildanzeige                           |  |                                                                                                            |
|                                       | 2 Minim<br>12 Route                                                                | 6 Minim + Sequ(M,alle)<br>7 Minim + Sequ(aver,alle)<br>10 Minim + Sequ(M,alle) + Zeit<br>14 Route + Sequ(M)<br>15 Route + Sequ(aver)<br>16 Route + Sequ(M,alle)<br>17 Route + Sequ(aver,alle) |
| Bezogene<br>Kombination               |                                                                                    |                                                                                                                                                                                               |

Die oben nicht gezeigten Algorithmen können auch nach verschiedenen Auftragssystemen oder nach längeren Läufen zu globalen Deadlock-Problemen führen. Aufgrund der obigen Informationen können die langfristigen Fähigkeiten der folgenden Algorithmen bezweifelt werden:

*Tabelle 6-10: Bestätigte und zweifelhafte Algorithmen ohne langfristige Betriebsfähigkeit*

| Index | Algorithmen ohne Langfristige Betriebsfähigkeit (bestätigt) | Index | Algorithmen ohne Langfristige Betriebsfähigkeit (zweifelhaft) |
|-------|-------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------|
| 2     | Minim                                                       | 4     | Minim + Sequ(M)                                               |
| 6     | Minim + Sequ(M,alle)                                        | 11    | Minim + Sequ(aver,alle) + Zeit                                |
| 7     | Minim + Sequ(aver,alle)                                     | 20    | Route + Sequ(M,alle) + Zeit                                   |
| 10    | Minim + Sequ(M,alle) + Zeit                                 | 21    | Route + Sequ(aver,alle) + Zeit                                |
| 12    | Route                                                       |       |                                                               |
| 14    | Route + Sequ(M)                                             |       |                                                               |
| 15    | Route + Sequ(aver)                                          |       |                                                               |
| 16    | Route + Sequ(M,alle)                                        |       |                                                               |
| 17    | Route + Sequ(aver,alle)                                     |       |                                                               |

Bei der folgenden Analyse und Auswahl der optimalen Kombination der Kriterien sollte die Kombinationen in der obigen Tabelle so weit wie möglich vermieden werden. Die Kombinationen in der obigen Tabelle werden unten rot markiert.

### Linearität zwischen der Ausgangsmenge des Systems und Zeit

Als nächstes wird die Linearität der Systemausgangsmenge über die Zeit analysiert. Durch Experimente können festgestellt werden, dass die Linearität von Algorithmen ohne langfristige Betriebsfähigkeit ebenfalls gering ist.

Bei Algorithmen ohne langfristige Betriebsfähigkeit aufgrund des Sequenzproblems verursacht das Shuttle auch aufgrund von Sequenzproblemen nacheinander Deadlocks, sodass die Anzahl der effektiven Shuttles im System abnimmt und dadurch die Leistung des Systems verringert wird. Bei dem Algorithmus ohne langfristige Betriebsfähigkeit aufgrund der Anzahl der Lagerplatz werden die Lagerplätze lange Zeit von der Palette belegt, sodass für das Shuttle weniger Routen ausgewählten können, was einem kleineren Layout entspricht, wodurch der Systemverkehr staut und die Leistung des Systems reduziert wird.

Wie in der folgenden Tabelle gezeigt:

Tabelle 6-11: Linearität aller Kombinationen der Kriterien für individuale Optimierung

| Index | Modul                       | Linearität  |             |        | Lineare Beziehung<br>(Stabiler Anstieg) |
|-------|-----------------------------|-------------|-------------|--------|-----------------------------------------|
|       |                             | Auslagerung | Einlagerung | Gesamt |                                         |
| 2     | Minim                       | 72.50%      | 73.46%      | 84.88% | X                                       |
| 6     | Minim + Sequ(M,alle)        | 86.37%      | 90.35%      | 89.52% | X                                       |
| 7     | Minim + Sequ(aver,alle)     | 86.37%      | 90.35%      | 89.52% | X                                       |
| 10    | Minim + Sequ(M,alle) + Zeit | 90.09%      | 94.68%      | 78.31% | X                                       |
| 12    | Route                       | 83.90%      | 73.20%      | 85.56% | X                                       |
| 14    | Route + Sequ(M)             | 92.51%      | 95.78%      | 94.20% | X                                       |
| 15    | Route + Sequ(aver)          | 92.51%      | 95.78%      | 94.20% | X                                       |
| 16    | Route + Sequ(M,alle)        | 87.25%      | 91.39%      | 92.18% | X                                       |
| 17    | Route + Sequ(aver,alle)     | 87.25%      | 91.39%      | 92.18% | X                                       |
| 24    | Sequ(M,alle)                | 93.87%      | 97.79%      | 84.69% | X                                       |
| 28    | Sequ(M,alle) + Zeit         | 93.87%      | 97.79%      | 84.69% | X                                       |

Gemäß der obigen Analyse bedeutet eine geringe Linearität nicht notwendigerweise, dass die Effizienz des Systems nach einer langen Betriebsdauer abnimmt. Es kann sein, dass das System in der Anfangsphase zu lang ist und die Effizienz des Systems nach einer langen Zeit langsam zunimmt. Daher werden für diese Algorithmen mit geringerer Linearität die Methode der Polynomianpassung zweiter Ordnung verwendet, um den Änderungstrend zu untersuchen. Wie unten gezeigt:

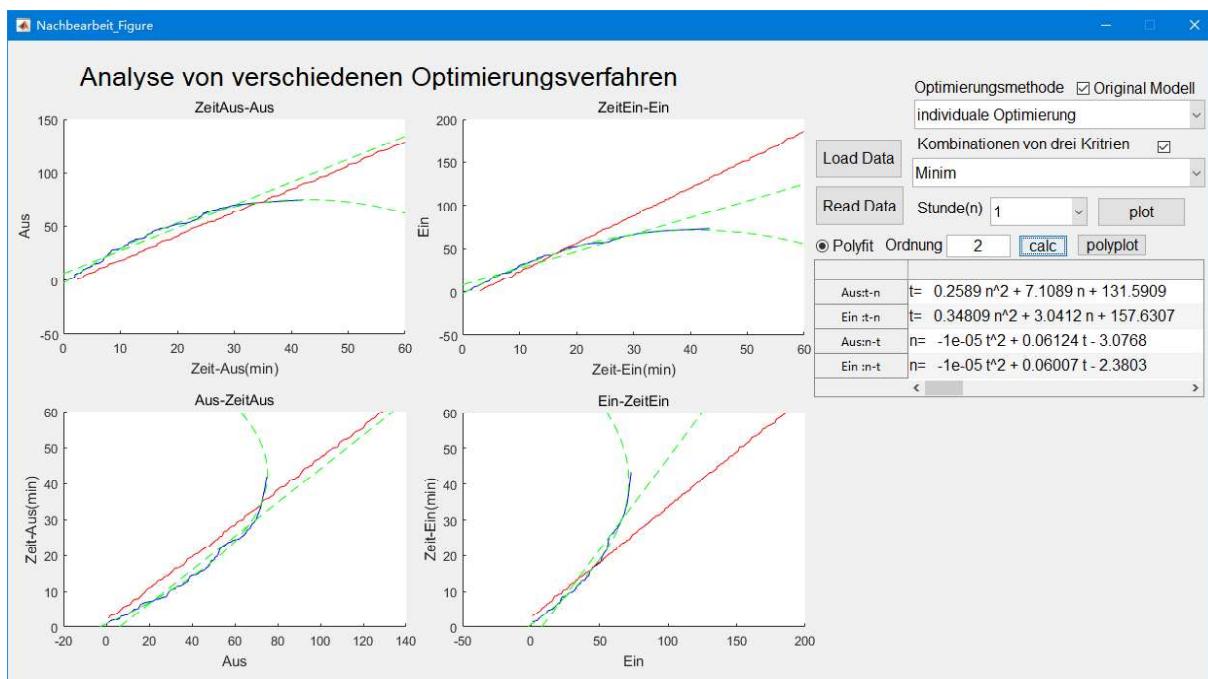


Abbildung 6-9: Lineare und parabolische Anpassung der Ausgangsmenge mit der Zeit für die Systeme mit individuale Optimierung mit geringerer Linearität

Aufgrund der Konvexität und Konkavität des Polynoms zweiter Ordnung können erfahren werden, dass die Effizienz des Systems mit der Zeit abnimmt, wenn die folgende Formel erfüllt ist:

$$n(t) = b_2 t^2 + b_1 t + b_0 \quad (6-18)$$

$$\frac{d^2 n}{dt^2} = 2b_2 < 0 \quad (6-19)$$

Durch die obige Analyse können einige Algorithmen nicht langfristig laufen, und es ist bedeutungslos, die Linearität dieser Algorithmen zu analysieren. Daher werden in diesem Abschnitt nur die Algorithmen mit langfristiger Betriebsfähigkeit aber geringe Linearität analysiert. Wie unten gezeigt:

*Tabelle 6-12: Quadratischer Koeffizient der t-n-Kurve aller Kombinationen der Kriterien für individuelle Optimierung*

| Index | Modul                       | $b_2$     |           |           | Lineare Beziehung<br>(Stabiler Anstieg) |
|-------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------------|
|       |                             | Auslage-  | Einlage-  | Gesamt    |                                         |
| 2     | Minim                       | -1.20E-05 | -1.22E-05 | -2.43E-05 | X                                       |
| 6     | Minim + Sequ(M,alle)        | -8.08E-07 | -4.70E-07 | -1.26E-06 | X                                       |
| 7     | Minim + Sequ(aver,alle)     | -8.08E-07 | -4.70E-07 | -1.26E-06 | X                                       |
| 10    | Minim + Sequ(M,alle) + Zeit | -3.37E-07 | -3.02E-07 | -6.35E-07 | X                                       |
| 12    | Route                       | -6.75E-06 | -1.19E-05 | -1.86E-05 | X                                       |
| 14    | Route + Sequ(M)             | -6.47E-07 | -4.08E-07 | -1.06E-06 | X                                       |
| 15    | Route + Sequ(aver)          | -6.47E-07 | -4.08E-07 | -1.06E-06 | X                                       |
| 16    | Route + Sequ(M,alle)        | -1.08E-06 | -8.59E-07 | -1.94E-06 | X                                       |
| 17    | Route + Sequ(aver,alle)     | -1.08E-06 | -8.59E-07 | -1.94E-06 | X                                       |
| 24    | Sequ(M,alle)                | -7.07E-08 | -4.13E-08 | -1.14E-07 | X                                       |
| 28    | Sequ(M,alle) + Zeit         | -7.07E-08 | -4.13E-08 | -1.14E-07 | X                                       |

Wie aus der obigen Tabelle ersichtlich ist, sind alle Werte von  $b_2$  kleiner als 0, was anzeigt, dass alle obigen Algorithmen die Effizienz des Systems mit der Zeit verringern. Je größer der Absolutwert von  $b_2$  ist, desto schlechter ist die Linearität und desto schneller nimmt die Systemeffizienz ab.

**Zeitaufwand pro Ausgangseinheit und Startzeit des stabilen Ausgangs basierend auf linearer Anpassung**

Gemäß den Ergebnissen der linearen Anpassung erster Ordnung des n-t-Graphen können festgestellt werden, dass der Algorithmus mit geringere Zeitaufwand pro Ausgangseinheit eine spätere Startzeit hat. Für ein System mit langer Laufzeit ist jedoch die für den Zeitaufwand pro Ausgangseinheit wichtiger als die Startzeit. Daher werden bei der Beurteilung der langfristigen Leistung des Systems hauptsächlich die für den Zeitaufwand pro Ausgangseinheit verwendet, wie in der folgenden Tabelle gezeigt:

*Tabelle 6-13: Zeitaufwand pro Ausgangseinheit aller Kombinationen der Kriterien für individuelle Optimierung*

| Index | Modul                          | Zeitaufwand pro Ausgangseinheit |             |          | Optimalität<br>(absteigend) |
|-------|--------------------------------|---------------------------------|-------------|----------|-----------------------------|
|       |                                | Auslagerung                     | Einlagerung | Gesamt   |                             |
| 1     | Original Model                 | 27.11178                        | 18.46238    | 10.98317 | -                           |
| 4     | Minim + Sequ(M)                | 24.32213                        | 17.09171    | 10.03788 | ✓                           |
| 8     | Minim + Sequ(M) + Zeit         | 24.32213                        | 17.09171    | 10.03788 | ✓                           |
| 5     | Minim + Sequ(aver)             | 24.40768                        | 17.07229    | 10.04573 | ✓                           |
| 9     | Minim + Sequ(aver) + Zeit      | 24.40768                        | 17.07229    | 10.04573 | ✓                           |
| 3     | Minim + Zeit                   | 24.65357                        | 17.15323    | 10.11532 | ✓                           |
| 18    | Route + Sequ(M) + Zeit         | 24.91919                        | 17.20451    | 10.17772 | ✓                           |
| 11    | Minim + Sequ(aver,alle) + Zeit | 24.76502                        | 17.29274    | 10.18256 | ✓                           |
| 19    | Route + Sequ(aver) + Zeit      | 24.91544                        | 17.2289     | 10.18564 | ✓                           |
| 13    | Route + Zeit                   | 25.15688                        | 17.27682    | 10.24261 | ✓                           |
| 20    | Route + Sequ(M,alle) + Zeit    | 25.16742                        | 17.46713    | 10.31095 | ✓                           |
| 22    | Sequ(M)                        | 26.74368                        | 18.29658    | 10.86403 | ✓                           |
| 23    | Sequ(aver)                     | 26.74368                        | 18.29658    | 10.86403 | ✓                           |
| 26    | Sequ(M) + Zeit                 | 26.74368                        | 18.29658    | 10.86403 | ✓                           |
| 27    | Sequ(aver) + Zeit              | 26.74368                        | 18.29658    | 10.86403 | ✓                           |
| 25    | Sequ(aver,alle)                | 26.90118                        | 18.40482    | 10.9282  | ✓                           |

Die obige Tabelle ist in aufsteigender Reihenfolge nach dem Zeitaufwand pro gesamten Ausgangseinheit angeordnet, der für die Gesamtleistung des Systems erforderlich ist. Es kann festgestellt werden, dass der Algorithmus mit Verwendung des Abstandskriteriums im Allgemeinen eine bessere Leistung als der Algorithmus ohne das Abstandskriterium aufweist. Alle besseren Algorithmen verwenden das Sequenzkriterium oder das Zeitkriterium, um das Sequenzproblem zu lösen.

Das Seltsame ist, dass im Abstandskriterium der Algorithmus basierend auf „Minimale\_Fahrzeit“ besser ist als der Routing-basierten Algorithmus. In dieser Arbeit werden die Gründe nicht beschrieben, die in nachfolgenden Studien diskutiert werden können.

## 2. Auswertung verschiedener Kombinationen auf langfristige Systemstabilität bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

### **Langfristige Betriebsfähigkeit des Systems**

Zunächst muss die langfristige Betriebsfähigkeit des Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles überprüft werden.

Nach dem obigen Index für die Betriebsfähigkeitsfähigkeit  $Index_{LB}$  wird festgestellt, dass der Index für die Betriebsfähigkeitsfähigkeit  $Index_{LB}$  der Algorithmen mit allen Kombinationen von Auswahlkriterien sehr hoch sind, was zeigt, dass Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles lange laufen können. In diesem Abschnitt werden einige Fälle ausgewählt, in denen  $Index_{LB}$  klein ist (siehe folgende Tabelle):

*Tabelle 6-14: Index für langfristige Betriebsfähigkeit aller Kombinationen der Kriterien für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles*

| Index | Modul                        | $Index_{LB}$ |             |         | Langfristige Betriebsfähigkeit |
|-------|------------------------------|--------------|-------------|---------|--------------------------------|
|       |                              | Auslagerung  | Einlagerung | Gesamt  |                                |
| 1     | Zeit                         | 96.81%       | 100.00%     | 100.00% | X                              |
| 3     | Mini + Zeit                  | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | X                              |
| 8     | Mini + Seq(M) + Zeit         | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | X                              |
| 9     | Mini + Seq(aver) + Zeit      | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | X                              |
| 10    | Mini + Seq(M,alle) + Zeit    | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | X                              |
| 11    | Mini + Seq(aver,alle) + Zeit | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | X                              |
| 12    | Seq(M)                       | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | X                              |
| 16    | Seq(M) + Zeit                | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | X                              |
| 17    | Seq(aver) + Zeit             | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | X                              |
| 18    | Seq(M,alle) + Zeit           | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | X                              |
| 19    | Seq(aver,alle) + Zeit        | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | X                              |

Die oben genannten Kombinationen der Kriterien werden über die MatLab-GUI getestet. Es zeigt sich, dass die Algorithmen mit allen Kombinationen lange laufen können, wie in der folgenden Abbildung dargestellt:

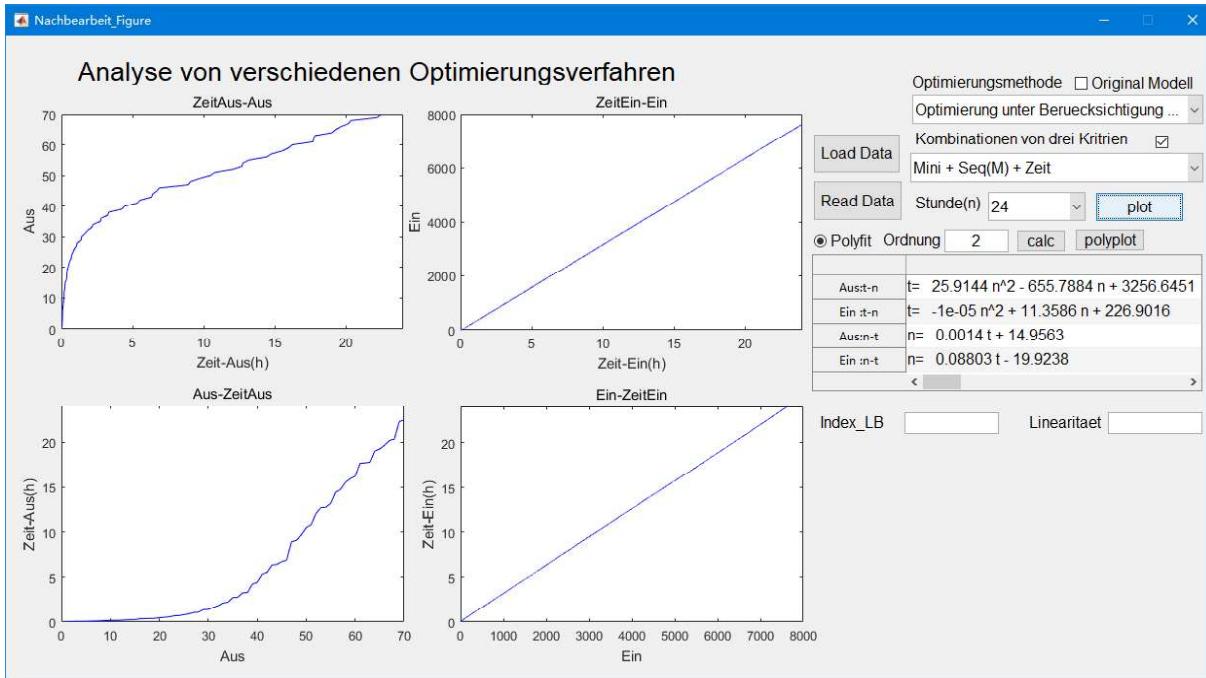


Abbildung 6-10: Überprüfung der langfristigen Stabilität des Systems mit Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles mit geringerer Index für langfristige Betrieb

Jedes Algorithmus in der obigen Tabelle führt zu weniger Ausgangsmenge für Auslagerung, so dass die durchschnittliche Zeit, die für jeden Auftrag für Auslagerung benötigt wird, länger ist. Dadurch wird der Differenz zwischen die Abschlusszeit des letzten Auftrag für Auslagerung in der Simulationszeitraum und der Endzeitpunkt der Simulation möglicherweise länger, was zu einem kleineren Wert des Index für die Betriebsfähigkeit  $Index_{LB}$  führt

Aufgrund der geringen Anzahl der Auslagerung (Aufträge mit der Anforderung der Sequenz) ist das System aufgrund von Sequenzproblemen nicht anfällig für globale Deadlocks, was die Stabilität des Systems erhöht. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles langfristig ausgeführt werden können.

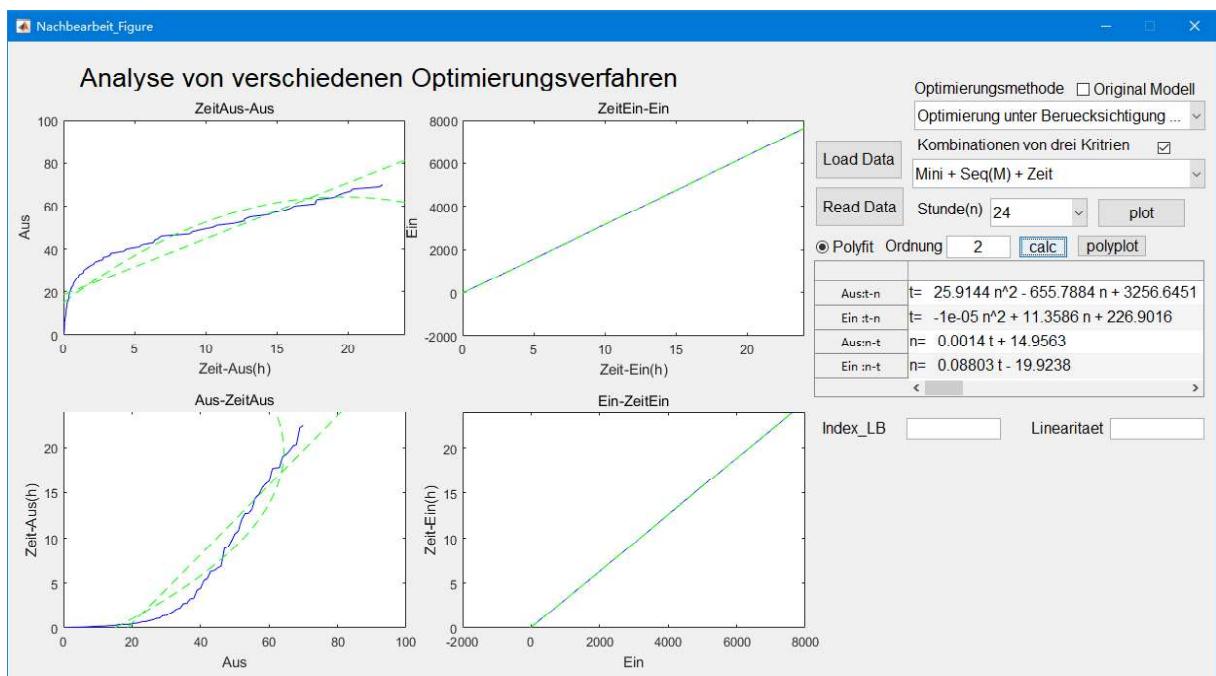
### Linearität zwischen der Ausgangsmenge des Systems und Zeit

Als Nächstes wird die Linearität zwischen Ausgangsmenge und Zeit durch Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles mit verschiedene Kombinationen der Kriterien analysiert. In der folgenden Tabelle sind die Algorithmen mit geringe Linearität aufgelistet:

**Tabelle 6-15:** Linearität aller Kombinationen der Kriterien für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

| Index | Modul                        | Linearität  |             |        | Lineare Beziehung<br>(Stabiler Anstieg) |
|-------|------------------------------|-------------|-------------|--------|-----------------------------------------|
|       |                              | Auslagerung | Einlagerung | Gesamt |                                         |
| 1     | Zeit                         | 67.70%      | 99.65%      | 99.71% | X                                       |
| 3     | Mini + Zeit                  | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                                       |
| 8     | Mini + Seq(M) + Zeit         | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                                       |
| 9     | Mini + Seq(aver) + Zeit      | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                                       |
| 10    | Mini + Seq(M,alle) + Zeit    | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                                       |
| 11    | Mini + Seq(aver,alle) + Zeit | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                                       |
| 12    | Seq(M)                       | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                                       |
| 16    | Seq(M) + Zeit                | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                                       |
| 17    | Seq(aver) + Zeit             | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                                       |
| 18    | Seq(M,alle) + Zeit           | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                                       |
| 19    | Seq(aver,alle) + Zeit        | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                                       |

Aus der obigen Tabelle geht hervor, dass die geringe Linearität im Allgemeinen bei Auslagerung auftritt, während die Linearität bei Einlagerung und der Gesamtleistung im Allgemeinen höher ist. In dem Folgende ist eine eingehende Analyse jeder Kombination von Kriterien mit geringerer Linearität. Wie unten gezeigt:



**Abbildung 6-11:** Lineare und parabolische Anpassung der Ausgangsmenge mit der Zeit für die Systeme mit Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles mit geringerer Linearität

In diesem Abschnitt wird auch eine quadratische Kurvenanpassung für die Kombination der Kriterien in der obigen Tabelle durchgeführt und die zeitliche Änderung der Systemleistung anhand der quadratischen Koeffizienten bestimmt.

Gemäß der obigen Abbildung wird festgestellt, dass die n-t-Kurve möglicherweise eher mit der quadratischen Kurve übereinstimmt, sodass die quadratischen Kurvenanpassungen sowohl an der t-n-Kurve als auch an der n-t-Kurve durchgeführt werden. Im Gegensatz zur t-n-Kurve nimmt die Leistung des Systems mit der Zeit ab, wenn die n-t-Kurve eine konvexe Kurve ist. Die Bestimmungsmethode des quadratischen Koeffizienten ist wie folgt:

$$t(n) = a_2 n^2 + a_1 n + a_0 \quad (6-20)$$

$$\frac{d^2 t}{dn^2} = 2a_2 > 0 \quad (6-21)$$

Gemäß der obigen Theorie werden die quadratische Kurvenanpassungen an die Zahl der Auslagerung und Zeit bei Optimierungsalgorithmen mit aller Kombinationen der Kriterien mit schlechter Linearität durchgeführt. Die Koeffizienten der quadratischen Terme sind in der folgenden Tabelle gezeigt:

**Tabelle 6-16:** Quadratischer Koeffizient der t-n-Kurve und n-t-Kurve aller Kombinationen der Kriterien für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

| Index | Modul                        | Auslagerung |           | Lineare Beziehung<br>(Stabiler Anstieg) |
|-------|------------------------------|-------------|-----------|-----------------------------------------|
|       |                              | $a_2$       | $b_2$     |                                         |
| 1     | Zeit                         | 51.09       | -1.38E-08 | X                                       |
| 3     | Mini + Zeit                  | 25.91       | -9.96E-09 | X                                       |
| 8     | Mini + Seq(M) + Zeit         | 25.91       | -9.96E-09 | X                                       |
| 9     | Mini + Seq(aver) + Zeit      | 25.91       | -9.96E-09 | X                                       |
| 10    | Mini + Seq(M,alle) + Zeit    | 25.91       | -9.96E-09 | X                                       |
| 11    | Mini + Seq(aver,alle) + Zeit | 25.91       | -9.96E-09 | X                                       |
| 12    | Seq(M)                       | 25.91       | -9.96E-09 | X                                       |
| 16    | Seq(M) + Zeit                | 25.91       | -9.96E-09 | X                                       |
| 17    | Seq(aver) + Zeit             | 25.91       | -9.96E-09 | X                                       |
| 18    | Seq(M,alle) + Zeit           | 25.91       | -9.96E-09 | X                                       |
| 19    | Seq(aver,alle) + Zeit        | 25.91       | -9.96E-09 | X                                       |

Gemäß der obigen Tabelle können festgestellt werden, dass die Effizienz der Auslagerung aller oben genannten Systeme mit der Zeit abnimmt, was mit der Abnahme der

Wahrscheinlichkeit der Auswahl der Aufträge für Auslagerung zusammenhängen kann. Die spezifischen Untersuchungen werden in dieser Arbeit nicht erörtert.

### **Zeitaufwand pro Ausgangseinheit und Startzeit des stabilen Ausgangs basierend auf linearer Anpassung**

Nach den obigen Untersuchungen zeichnet sich der Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles durch eine ausreichend hohe Anzahl für die Aufträge ohne die Anforderung der Sequenz aus. Daher müssen zunächst die Algorithmen ausgeschlossen werden, die in Rahmen der Einlagerung (Aufträge ohne Sequenzanforderung) schlechter als das ursprüngliche Modell sind. Die Ergebnisse sind wie folgt:

*Tabelle 6-17: Zeitaufwand pro Ausgangseinheit aller Kombinationen der Kriterien für Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles*

| Index | Modul                 | Zeitaufwand pro Ausgangseinheit |             |          | Optimaler in jedem Aspekt |
|-------|-----------------------|---------------------------------|-------------|----------|---------------------------|
|       |                       | Auslagerung                     | Einlagerung | Gesamt   |                           |
| 0     | Original Model        | 27.11178                        | 18.46238    | 10.98317 | -                         |
| 2     | Mini                  | 30.34269                        | 19.1564     | 11.74596 | X                         |
| 4     | Mini + Seq(M)         | 30.34269                        | 19.1564     | 11.74596 | X                         |
| 5     | Mini + Seq(aver)      | 30.34269                        | 19.1564     | 11.74596 | X                         |
| 6     | Mini + Seq(M,alle)    | 30.34269                        | 19.1564     | 11.74596 | X                         |
| 7     | Mini + Seq(aver,alle) | 30.34269                        | 19.1564     | 11.74596 | X                         |
| 13    | Seq(aver)             | 30.34269                        | 19.1564     | 11.74596 | X                         |
| 14    | Seq(M,alle)           | 30.34269                        | 19.1564     | 11.74596 | X                         |
| 15    | Seq(aver,alle)        | 30.34269                        | 19.1564     | 11.74596 | X                         |

Als nächstes werden alle andere Kombinationen der Kriterien in aufsteigender Reihenfolge nach Zeitaufwand pro Einlagerung sortieren. Die Ergebnisse sind wie folgt:

*Tabelle 6-18: Startzeit und Zeitaufwand pro Einlagerung und pro gesamte Ausgangseinheit aller Kombinationen der Kriterien für Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles*

| Index | Modul                   | Zeitaufwand pro Einlagerung |            | Zeitaufwand pro Ausgangsmenge |            | Optimaler in Einlagerung |
|-------|-------------------------|-----------------------------|------------|-------------------------------|------------|--------------------------|
|       |                         | Startzeit                   | $\Delta t$ | Startzeit                     | $\Delta t$ |                          |
| 0     | Original Model          | 83.21                       | 18.46      | 44.37                         | 10.98      | ✓                        |
| 3     | Mini + Zeit             | 329.57                      | 11.28      | 3.53                          | 11.21      | ✓                        |
| 8     | Mini + Seq(M) + Zeit    | 329.57                      | 11.28      | 3.53                          | 11.21      | ✓                        |
| 9     | Mini + Seq(aver) + Zeit | 329.57                      | 11.28      | 3.53                          | 11.21      | ✓                        |

| Index | Modul                        | Zeitaufwand pro Einlagerung |            | Zeitaufwand pro Ausgangsmenge |            | Optimaler in Einlagerung |
|-------|------------------------------|-----------------------------|------------|-------------------------------|------------|--------------------------|
|       |                              | Startzeit                   | $\Delta t$ | Startzeit                     | $\Delta t$ |                          |
| 0     | Original Model               | 83.21                       | 18.46      | 44.37                         | 10.98      | ✓                        |
| 10    | Mini + Seq(M,alle) + Zeit    | 329.57                      | 11.28      | 3.53                          | 11.21      | ✓                        |
| 11    | Mini + Seq(aver,alle) + Zeit | 329.57                      | 11.28      | 3.53                          | 11.21      | ✓                        |
| 12    | Seq(M)                       | 329.57                      | 11.28      | 3.53                          | 11.21      | ✓                        |
| 16    | Seq(M) + Zeit                | 329.57                      | 11.28      | 3.53                          | 11.21      | ✓                        |
| 17    | Seq(aver) + Zeit             | 329.57                      | 11.28      | 3.53                          | 11.21      | ✓                        |
| 18    | Seq(M,alle) + Zeit           | 329.57                      | 11.28      | 3.53                          | 11.21      | ✓                        |
| 19    | Seq(aver,alle) + Zeit        | 329.57                      | 11.28      | 3.53                          | 11.21      | ✓                        |
| 1     | Zeit                         | 407.12                      | 11.83      | 35.95                         | 11.78      | ✓                        |

Alle Kombinationen der Kriterien in der obigen Tabelle haben eine gute Verarbeitungsleistung für Aufträge ohne Sequenzanforderung und werden wahrscheinlich zur optimalen Kombination. Da die Kriterien in der obigen Tabelle in fast jeder Aspekt eine ähnliche Leistung aufweisen, ist es schwierig, die Auswahl hinsichtlich der langfristigen Systemstabilität zu treffen, und es sind weitere Kriterien erforderlich.

### 6.2.2 Auswertung verschiedener Kombinationen von drei Auswahlkriterien für Aufträge auf Systemleistung

#### 1. Auswertung verschiedener Kombinationen auf Systemleistung bei individualer Optimierung

In diesem Abschnitt wird der Optimalität jeder Kombination der Kriterien analysiert, indem die Anzahl der Ein- und Auslagerung des Systems pro Zeiteinheit unter jeder Kombination der Kriterien verglichen werden. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang aufgeführt. Dieser Abschnitt zieht die folgenden Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen und fasst nur die Daten in einigen Tabellen für jede Schlussfolgerung zusammen.

#### Schlussfolgerung 1: Nur die Verwendung des Abstandskriteriums ist anfällig für globale Deadlocks

Dies liegt hauptsächlich daran, dass es kein Kriterium gibt, um die Sequenz der Aufträge zu steuern. Der Auftrag mit größerer Sequenz kann zuerst übernommen werden, und der Auftrag mit kleinerer Sequenz wird nicht vom Shuttle übernommen, was das System zu einem globalen Deadlock macht. Die relevanten Daten lauten wie folgt:

**Tabelle 6-19:** Ausgangsmenge pro Zeiteinheit nur bei der Verwendung des Abstandskriteriums bei individueller Optimierung

| Plan<br>Index | Beschreibung | Einlagerung     |                | Auslagerung     |                | Gesamt          |                | optimaler |
|---------------|--------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------|
|               |              | $\bar{n}_{Ein}$ | $\sigma_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ | $\sigma_{Ges}$ |           |
| 1             | Zeit         | 185.20          | 1.92           | 128.40          | 2.19           | 313.60          | 2.92           | -         |
| 2             | Minim        | 116.40          | 29.25          | 126.20          | 34.48          | 242.60          | 45.22          | X         |
| 12            | Route        | 87.40           | 40.92          | 92.40           | 44.47          | 179.80          | 60.44          | X         |

Aus den Daten ist ersichtlich, dass die Schwankung der Ausgangsmenge pro Zeiteinheit sehr groß ist, was durch die unterschiedlichen Zeitpunkte des globalen Deadlocks des Systems verursacht wird. Wenn ein solches System lange läuft, tendiert die durchschnittliche Leistung pro Zeiteinheit allmählich gegen Null. Daher können für individuelle Optimierung diese beiden Kombinationen nicht verwendet werden.

### Schlussfolgerung 2: Die Algorithmen mit der Kombination ohne Abstandskriterien verbessert fast nicht im Vergleich zum ursprünglichen Modell

Gemäß den Informationen in der folgenden Tabelle können festgestellt werden, obwohl sich mit einigen Algorithmen die Ausgangsschwankung verringert, dass für dem Algorithmen ohne Abstandskriterium der Gesamtoptimalität des Systems gering ist.

**Tabelle 6-20:** Ausgangsmenge pro Zeiteinheit nur bei der individueller Optimierungsalgorithmen mit der Kombination ohne Abstandskriterien

| Plan<br>Index | Beschreibung           | Einlagerung     |                | Auslagerung     |                | Gesamt          |                | optimaler |
|---------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------|
|               |                        | $\bar{n}_{Ein}$ | $\sigma_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ | $\sigma_{Ges}$ |           |
| 1             | Zeit                   | 185.20          | 1.92           | 128.40          | 2.19           | 313.60          | 2.92           | -         |
| 22            | Sequ(M)                | 187.20          | 0.45           | 129.20          | 1.48           | 316.40          | 1.55           | X         |
| 23            | Sequ(aver)             | 187.20          | 0.45           | 129.20          | 1.48           | 316.40          | 1.55           | X         |
| 24            | Sequ(M,alle)           | 186.00          | 2.12           | 130.80          | 2.86           | 316.80          | 3.56           | X         |
| 25            | Sequ(aver,alle)        | 185.40          | 1.34           | 130.40          | 2.61           | 315.80          | 2.93           | X         |
| 26            | Sequ(M) + Zeit         | 187.20          | 0.45           | 129.20          | 1.48           | 316.40          | 1.55           | X         |
| 27            | Sequ(aver) + Zeit      | 187.20          | 0.45           | 129.20          | 1.48           | 316.40          | 1.55           | X         |
| 28            | Sequ(M,alle) + Zeit    | 186.00          | 2.12           | 130.80          | 2.86           | 316.80          | 3.56           | X         |
| 29            | Sequ(aver,alle) + Zeit | 186.20          | 0.84           | 129.80          | 1.92           | 316.00          | 2.10           | X         |

Dies liegt daran, dass der Kern des Optimierungsalgoritmus darin besteht, bei der Auswahl der Aufträge den Auftrag mit dem nächstgelegenen Startknoten auszuwählen. Wenn es kein Abstandskriterium gibt, können der Abstand zwischen dem Startknoten der Aufträge und dem aktuellen Knoten des Shuttles nicht bekannt werden, sodass keine große Änderung der Leistung des Systems verständlich ist

### Schlussfolgerung 3: Die Verwendung von Big-M-Prinzip und Durchschnitt-Prinzip in individuale Optimierung ändert das Systemleistung nicht wesentlich

In der folgenden Tabelle wird die Kombinationen mit demselben Typ aber unterschiedlichen Sequenzkriterien verglichen. Dann werden die Auswirkungen der Verwendung der Big-M-Prinzip und Durchschnitt-Prinzip auf die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit des Systems untersucht. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 6-21: Ausgangsmenge pro Zeiteinheit nur bei der Verwendung von Big-M-Prinzip und Durchschnitt-Prinzip in individuale Optimierung

| Plan<br>Index | Beschreibung                   | Einlagerung     |                | Auslagerung     |                | Gesamt          |                | optimaler |
|---------------|--------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------|
|               |                                | $\bar{n}_{Ein}$ | $\sigma_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ | $\sigma_{Ges}$ |           |
| 4             | Minim + Sequ(M)                | 201.00          | 2.24           | 141.60          | 1.14           | 342.60          | 2.51           |           |
| 5             | Minim + Sequ(aver)             | 202.40          | 2.88           | 143.00          | 2.55           | 345.40          | 3.85           | X         |
| 6             | Minim + Sequ(M,alle)           | 172.00          | 15.73          | 191.40          | 25.39          | 363.40          | 29.87          |           |
| 7             | Minim + Sequ(aver,alle)        | 172.00          | 15.73          | 191.40          | 25.39          | 363.40          | 29.87          | X         |
| 8             | Minim + Sequ(M) + Zeit         | 201.00          | 2.24           | 141.60          | 1.14           | 342.60          | 2.51           |           |
| 9             | Minim + Sequ(aver) + Zeit      | 202.40          | 2.88           | 143.00          | 2.55           | 345.40          | 3.85           | X         |
| 10            | Minim + Sequ(M,alle) + Zeit    | 199.00          | 1.87           | 142.80          | 1.64           | 341.80          | 2.49           |           |
| 11            | Minim + Sequ(aver,alle) + Zeit | 199.20          | 1.79           | 143.00          | 1.58           | 342.20          | 2.39           | X         |
| 14            | Route + Sequ(M)                | 189.00          | 9.57           | 193.20          | 17.71          | 382.20          | 20.13          |           |
| 15            | Route + Sequ(aver)             | 189.00          | 9.57           | 193.20          | 17.71          | 382.20          | 20.13          | X         |
| 16            | Route + Sequ(M,alle)           | 177.00          | 6.67           | 199.60          | 15.66          | 376.60          | 17.02          |           |
| 17            | Route + Sequ(aver,alle)        | 178.20          | 6.30           | 201.20          | 16.36          | 379.40          | 17.53          | X         |
| 18            | Route + Sequ(M) + Zeit         | 201.40          | 2.30           | 140.20          | 0.84           | 341.60          | 2.45           |           |
| 19            | Route + Sequ(aver) + Zeit      | 200.60          | 1.82           | 140.20          | 1.10           | 340.80          | 2.12           | X         |
| 20            | Route + Sequ(M,alle) + Zeit    | 192.80          | 9.78           | 139.20          | 1.92           | 332.00          | 9.97           |           |
| 21            | Route + Sequ(aver,alle) + Zeit | 193.80          | 7.33           | 140.00          | 2.83           | 333.80          | 7.85           | X         |

Wie aus der obigen Tabelle ersichtlich ist, haben die Verwendung des Big-M-Prinzips und des Durchschnitt-Prinzip nur geringe Auswirkungen auf die Gesamtleistung des Systems. Da das Durchschnitt-Prinzip mehr Datenaustausch und Berechnung erfordert als das Big-M-Prinzip, ist in diesem Modell Big-M-Prinzip mit weniger Berechnung aber ähnlichem Effekt geneigt.

Basierend auf den drei obigen Schlussfolgerungen werden schließlich 10 Kombinationen von Kriterien ausgewählt. Entsprechend dem Durchschnitt und der Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde wird die durch das 6  $\sigma$ -Kriterium geschätzte Minimalwert der Ausgangsmenge pro Stunde der Optimierungsalgorithmen mit dem

geschätzten Maximalwert der Ausgangsmenge pro Stunde des ursprünglichen Modells verglichen. Alles absolut optimale Kombination von Kriterien werden ausgewählt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 6-22: Optimale Kombinationen der Kriterien bei individualer Optimierung

| Plan Index | Beschreibung                | Einlagerung     |                | Auslagerung     |                | Gesamt          |                | Absolut optimaler |
|------------|-----------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|
|            |                             | $\bar{n}_{Ein}$ | $\sigma_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ | $\sigma_{Ges}$ |                   |
| 1          | Original Model              | 185.20          | 1.92           | 128.40          | 2.19           | 313.60          | 2.92           | -                 |
| 3          | Minim + Zeit                | 199.80          | 2.95           | 141.20          | 3.03           | 341.00          | 4.23           | X                 |
| 4          | Minim + Sequ(M)             | 201.00          | 2.24           | 141.60          | 1.14           | 342.60          | 2.51           | ✓                 |
| 6          | Minim + Sequ(M,alle)        | 172.00          | 15.73          | 191.40          | 25.39          | 363.40          | 29.87          | X                 |
| 8          | Minim + Sequ(M) + Zeit      | 201.00          | 2.24           | 141.60          | 1.14           | 342.60          | 2.51           | ✓                 |
| 10         | Minim + Sequ(M,alle) + Zeit | 199.0           | 1.87           | 142.80          | 1.64           | 341.80          | 2.49           | ✓                 |
| 13         | Route + Zeit                | 200.60          | 1.82           | 141.60          | 1.34           | 342.20          | 2.26           | ✓                 |
| 14         | Route + Sequ(M)             | 189.00          | 9.57           | 193.20          | 17.71          | 382.20          | 20.13          | X                 |
| 16         | Route + Sequ(M,alle)        | 177.00          | 6.67           | 199.60          | 15.66          | 376.60          | 17.02          | X                 |
| 18         | Route + Sequ(M) + Zeit      | 201.40          | 2.30           | 140.20          | 0.84           | 341.60          | 2.45           | ✓                 |
| 20         | Route + Sequ(M,alle) + Zeit | 192.80          | 9.78           | 139.20          | 1.92           | 332.00          | 9.97           | X                 |

In der obigen Tabelle ist anzumerken, dass unter die 6-te und 14-te Kombination der Kriterien die Ausgangsmenge der Auslagerung des Systems größer ist als die Ausgangsmenge der Einlagerung. Dies bedeutet, dass die Abschlussanzahl der Aufträge mit der Anforderung der Sequenz größer ist als die Abschlussanzahl der Aufträge ohne die Anforderung der Sequenz, was bei allen Optimierungsalgorithmen sehr selten vorkommt. Diese Eigenschaft kann in zukünftigen Forschungen verwendet werden.

Da einige der Algorithmen in der obigen Tabelle nicht die Anforderungen für den langfristigen Betrieb erfüllen, werden zusätzlich unter Berücksichtigung der Schwierigkeit des Algorithmus und der Berechnungszeit berücksichtigen schließlich eine 4 Kombinationen von Kriterien aus den Algorithmen in der obigen Tabelle als optimale Kriterien für den Algorithmus ausgewählt. Wie unten gezeigt:

Tabelle 6-23: Ausgewählte optimale Kombinationen der Kriterien bei individualer Optimierung

| Plan<br>Index | Beschreibung           | Einlagerung     |                | Auslagerung     |                | Gesamt          |                | optimaler |
|---------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------|
|               |                        | $\bar{n}_{Ein}$ | $\sigma_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ | $\sigma_{Ges}$ |           |
| 1             | Original Model         | 185.20          | 1.92           | 128.40          | 2.19           | 313.60          | 2.92           | -         |
| 4             | Minim + Sequ(M)        | 201.00          | 2.24           | 141.60          | 1.14           | 342.60          | 2.51           | ✓         |
| 8             | Minim + Sequ(M) + Zeit | 201.00          | 2.24           | 141.60          | 1.14           | 342.60          | 2.51           | ✓         |
| 13            | Route + Zeit           | 200.60          | 1.82           | 141.60          | 1.34           | 342.20          | 2.26           | ✓         |
| 18            | Route + Sequ(M) + Zeit | 201.40          | 2.30           | 140.20          | 0.84           | 341.60          | 2.45           | ✓         |

In dieser Arbeit wird die 8-te Kombination der Kriterien, nämlich „Minim + Sequ (M) + Zeit“, als optimale Kombination der Kriterien für individuelle Optimierung ausgewählt. Die ausgewählte Kombination wird später auf eine unterschiedliche Anzahl von Shuttles und strengere Stabilitätstests getestet.

## 2. Auswertung verschiedener Kombinationen auf Systemleistung bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

In diesem Abschnitt wird weiterhin die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit des Systems analysiert, um die Auswirkungen der verschiedenen Kriterien des Algorithmus auf die Systemleistung zu bestimmen.

Nach den experimentellen Ergebnissen kann die Verwendung von Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles die Gesamtleistung des Systems nicht verbessern, aber bei einige Kombinationen von Kriterien kann die Abschlussanzahl der Aufträge ohne Sequenzanforderung erheblich erhöhen und gleichzeitig die Abschlussanzahl der Aufträge mit Sequenzanforderung erheblich reduzieren. Daher kann dieser Algorithmus verwendet werden, um die Differenz zwischen den Aufträgen mit und ohne Sequenzanforderung anzupassen.

Alle experimentellen Ergebnisse sind im Anhang zusammengefasst. In diesem Abschnitt werden einige Schlussfolgerungen basierend auf den experimentellen Ergebnissen zusammengefasst.

**Schlussfolgerung 1: Nur die in der Kombination enthaltenen Kriterien sind relevant zu der Systemleistung. Die von den einzelnen Kriterien gewählten Optionen haben gleiche Auswirkung.**

Gemäß den experimentellen Daten im Anhang können festgestellt werden, dass im Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles die verschiedenen Optionen jedes Kriteriums dieselbe Funktion haben, sodass in diesem Abschnitt nur berücksichtigt

wird, welches Kriterium verwendet wird, und nicht die verwendete spezifische Option. Alle experimentellen Daten können in der folgenden Tabelle zusammengefasst werden:

**Tabelle 6-24:** Zusammenfassung der experimentellen Daten anhand der Kombination der Kriterien bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

| Anzahl | Kriterien                | Optionen        | Einlagerung     |                | Auslagerung     |                | Gesamt          |                |
|--------|--------------------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
|        |                          |                 | $\bar{n}_{Ein}$ | $\sigma_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ | $\sigma_{Ges}$ |
| -      | -                        | Original Modell | 185.20          | 1.92           | 128.40          | 2.19           | 313.60          | 2.92           |
| 1      | Zeit                     | -               | 272.60          | 2.19           | 25.40           | 0.89           | 298.00          | 2.37           |
|        | Abstand                  | Minim           | 177.20          | 11.63          | 114.00          | 5.10           | 291.20          | 12.70          |
|        |                          | Sequ(M)         | 285.00          | 3.54           | 26.20           | 1.30           | 311.20          | 3.77           |
|        | Sequenz                  | andere          | 177.20          | 11.63          | 114.00          | 5.10           | 291.20          | 12.70          |
| 2      | Abstand + Zeit           | Minim + Zeit    | 285.00          | 3.54           | 26.20           | 1.30           | 311.20          | 3.77           |
|        | Abstand + Sequenz        | alle            | 177.20          | 11.63          | 114.00          | 5.10           | 291.20          | 12.70          |
|        | Sequenz + Zeit           | alle            | 285.00          | 3.54           | 26.20           | 1.30           | 311.20          | 3.77           |
| 3      | Zeit + Abstand + Sequenz | alle            | 285.00          | 3.54           | 26.20           | 1.30           | 311.20          | 3.77           |

Die Auswirkung jedes Kriteriums auf den Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles wird nachstehend ausführlich erörtert.

### Schlussfolgerung 2: Das Sequenzkriterium hat nur minimale Auswirkungen auf die Systemleistung.

Die Kombinationen mit dem Sequenzkriterium und die Kombinationen ohne das Sequenzkriterium werden zusammen verglichen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

**Tabelle 6-25:** Auswirkung der Verwendung des Sequenzkriteriums bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

| Kriterien                | Optionen     | Einlagerung     |                | Auslagerung     |                | Gesamt          |                | Optimaler |
|--------------------------|--------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------|
|                          |              | $\bar{n}_{Ein}$ | $\sigma_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ | $\sigma_{Ges}$ |           |
| Zeit                     | -            | 272.60          | 2.19           | 25.40           | 0.89           | 298.00          | 2.37           | X         |
| Sequenz + Zeit           | alle         | 285.00          | 3.54           | 26.20           | 1.30           | 311.20          | 3.77           |           |
| Abstand                  | Minim        | 177.20          | 11.63          | 114.00          | 5.10           | 291.20          | 12.70          |           |
| Abstand + Sequenz        | alle         | 177.20          | 11.63          | 114.00          | 5.10           | 291.20          | 12.70          | X         |
| Abstand + Zeit           | Minim + Zeit | 285.00          | 3.54           | 26.20           | 1.30           | 311.20          | 3.77           |           |
| Zeit + Abstand + Sequenz | alle         | 285.00          | 3.54           | 26.20           | 1.30           | 311.20          | 3.77           | X         |

Wie aus der obigen Tabelle ersichtlich ist, kann das Sequenzkriterium nur ohne Verwendung des Abstandskriteriums die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit bei Verwendung nur des Zeitkriteriums um etwa 5% erhöhen. In Kombination mit dem Abstandskriterium hat die Einführung des Sequenzkriteriums keinen Einfluss auf die Leistung des Systems.

Aufgrund der Ergebnisse und der Komplexität des Algorithmus ist dieses Papier der Ansicht, dass die Einführung des Sequenzkriteriums in Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles bedeutungslos ist, sodass das Sequenzkriterium nicht in diesem Optimierungsalgorithmus berücksichtigt wird.

### **Schlussfolgerung 3: Das Zeitkriterium hat den größten Einfluss auf die Systemleistung**

Durch die Einführung des Zeitkriteriums wurde die Anzahl der abgeschlossenen Aufträge ohne Sequenzanforderung pro Zeiteinheit erheblich erhöht, während die Anzahl der abgeschlossenen Aufträge mit Sequenzanforderung pro Zeiteinheit erheblich reduziert wurde. Die gesamte Ausgangsmenge pro Zeiteinheit bei der Verwendung des Zeitkriteriums ist höher als die ohne Zeitkriterium. Wie in der folgenden Tabelle gezeigt:

*Tabelle 6-26: Auswirkung der Verwendung des Zeitkriteriums bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles*

| Kriterien      | Optionen     | Einlagerung     |                | Auslagerung     |                | Gesamt          |                |
|----------------|--------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
|                |              | $\bar{n}_{Ein}$ | $\sigma_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ | $\sigma_{Ges}$ |
| Abstand        | Minim        | 177.20          | 11.63          | 114.00          | 5.10           | 291.20          | 12.70          |
| Sequenz        | Sequ(M)      | 285.00          | 3.54           | 26.20           | 1.30           | 311.20          | 3.77           |
|                | andere       | 177.20          | 11.63          | 114.00          | 5.10           | 291.20          | 12.70          |
| Abstand + Zeit | Minim + Zeit | 285.00          | 3.54           | 26.20           | 1.30           | 311.20          | 3.77           |
| Sequenz + Zeit | alle         | 285.00          | 3.54           | 26.20           | 1.30           | 311.20          | 3.77           |

Basierend auf der Analyse der langfristigen Stabilität des Systems und den Ergebnissen dieses Experiments werden keinen Algorithmus ausgewählt, bei dem sowohl die Anzahl der Einlagerung pro Zeiteinheit als auch die Anzahl der Auslagerung pro Zeiteinheit kleiner als die beim ursprüngliche Modell sind. Aus oben gezeigte Kombinationen wird mit den obigen Schlussfolgerungen die Kombination „Minim + Zeit“ als optimale Kombination der Kriterien für den Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles ausgewählt.

**Tabelle 6-27:** Ausgewählte optimale Kombinationen der Kriterien bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

| Kriterien             | Optionen        | Einlagerung     |                | Auslagerung     |                | Gesamt          |                |
|-----------------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
|                       |                 | $\bar{n}_{Ein}$ | $\sigma_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ | $\sigma_{Ges}$ |
| -                     | Original Modell | 185.20          | 1.92           | 128.40          | 2.19           | 313.60          | 2.92           |
| <b>Abstand + Zeit</b> | Minim + Zeit    | 285.00          | 3.54           | 26.20           | 1.30           | 311.20          | 3.77           |

Obwohl bei der Kombination „Minim + Zeit“ die gesamte Ausgangsmenge pro Zeiteinheit geringfügig kleiner als die beim ursprünglichen Modell ist, ist die Anzahl der abgeschlossenen Aufträge pro Zeiteinheit für die Einlagerung viel größer als die des ursprünglichen Modells. Im Gegensatz dazu ist die Anzahl der abgeschlossenen Aufträge pro Zeiteinheit für die Auslagerung äußerst gering. Der Algorithmus mit dieser Kombination wird später auf unterschiedliche Anzahlen von Shuttles getestet.

### 6.2.3 Auswirkung der Anzahl der Shuttles auf der Ausgangsmenge bei verschiedene Optimierungsstrategie

#### 1. Auswertung der Anzahl der Shuttles auf Ausgangsmenge pro Stunde bei individueller Optimierung

In diesem Abschnitt wird die Beziehung zwischen der Anzahl der Shuttles und der Systemleistung unter dem individuellen Optimierungsalgorithmus basierend auf der besten Kombination der oben ausgewählten 8-ten Kriterien (nämlich „Minim + Sequ (M) + Zeit“) erörtert. Nach dem obigen Versuchsplan können die folgenden Ergebnisse erhalten werden.

Die folgende Abbildung zeigt die Beziehung zwischen der Anzahl der Shuttles und der Systemleistung pro Zeiteinheit. Die Grafik in der oberen linken Ecke, die Grafik in der oberen rechten Ecke und die Grafik in der unteren linken Ecke zeigen jeweils die Beziehung zwischen der Anzahl der Ein-, Auslagerung sowie gesamten Ausgangsmenge pro Zeiteinheit des Systems und der Anzahl der Shuttles. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Systemleistung mit dem individuellen Optimierungsalgorithmus bei einer beliebigen Anzahl von Shuttles größer ist als die des ursprünglichen Modells. Und je mehr Shuttles vorhanden sind, desto deutlicher verbessert sich die Systemleistung mit dem individuellen Optimierungsalgorithmus.

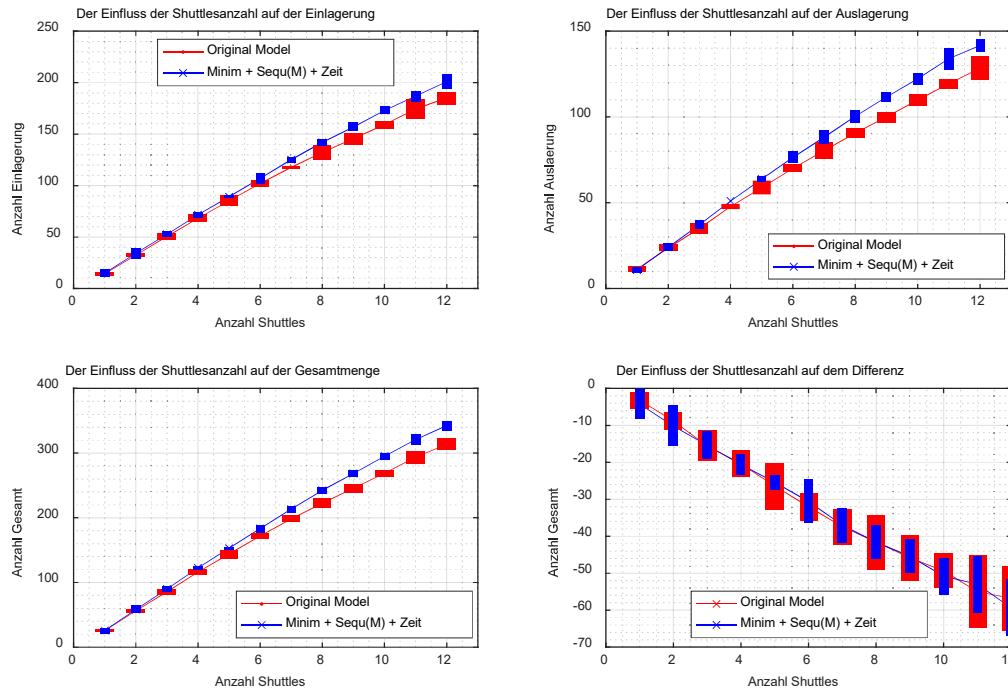


Abbildung 6-12: *Diagramm der Systemleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttles bei individueller Optimierung unter optimaler Kombination der Auswahlkriterien der Aufträge*

Das Bild in der unteren rechten Ecke zeigt die Differenz zwischen der Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass der Differenz zwischen der Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung im Originalmodell und im individuellen Optimierungsalgorithmus ähnlich ist. Daraus kann geschlossen werden, dass die Steigerung der Systemeffizienz durch individuellen Optimierung gleichmäßig ist, d.h. die Anzahl der Auslagerung und Einlagerung um den gleichen Betrag zunimmt und die Differenz im Wesentlichen unverändert bleibt.

Da die Anzahl der Shuttles mit den Betriebskosten des Systems zusammenhängt, ist es häufig erforderlich, die Betriebseffizienz jedes Shuttles zu berücksichtigen. Daher wird die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit pro Shuttle eingeführt, um die durchschnittliche Effizienz des Shuttles im System zu berücksichtigen.

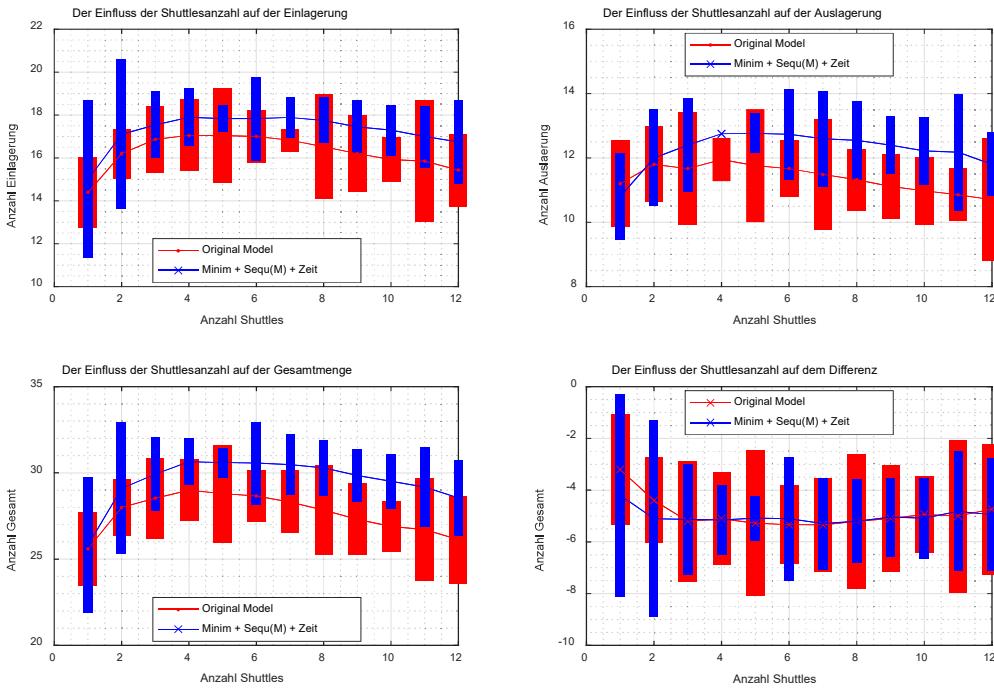


Abbildung 6-13: Diagramm der Effizienz jedes Shuttles in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttles bei individuale Optimierung unter optimaler Kombination der Auswahlkriterien der Aufträge

Die obige Abbildung zeigt die Beziehung zwischen der Leistung pro Shuttle pro Zeiteinheit und der Anzahl der Shuttles. Die Grafik in der oberen linken Ecke, die Grafik in der oberen rechten Ecke und die Grafik in der unteren linken Ecke zeigen jeweils die Beziehung zwischen der Anzahl der Ein-, Auslagerung sowie gesamten Ausgangsmenge pro Shuttle pro Zeiteinheit des Systems und der Anzahl der Shuttles. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass der Individuale Optimierungsalgorithmus die Effizienz jedes Shuttles im System verbessert.

Aber die Effizienz des Shuttles hat seinen Maximalwert. Wenn die Anzahl der Shuttles weniger als 4 beträgt, steigt die Effizienz des Shuttles mit der Anzahl der Shuttles. Dies liegt daran, dass die Anzahl der Aufträge, die das System gleichzeitig ausführen kann, zunimmt, sodass für jedes Shuttle ein besserer Auftrag für sich selbst ohne die Auswirkungen der Sequenz der Aufträge ausgewählt werden kann. Wenn das System 4 bis 6 Shuttles enthält, ist die Effizienz eines einzelnen Shuttles am höchsten. Wenn die Anzahl der Shuttles größer als 6 ist, nimmt die Effizienz eines einzelnen Shuttles mit zunehmender Anzahl der Shuttles leicht ab, aber die Abnahme der Effizienz der einzelnen Shuttles bei individuale Optimierung ist langsamer als die beim ursprünglichen Modells. Die Abnahme der Effizienz des Shuttles kann durch die Systemblockierung werden, die zu viele Shuttles im System verursachen.

Aus der Differenz in der Anzahl der Ein- und Auslagerung pro Shuttle pro Zeiteinheit, die in der Grafik unten rechts gezeigt ist, kann festgestellt werden, dass die Differenz der Anzahl zwischen der Auslagerung und der Einlagerung pro Shuttle pro Zeiteinheit grundsätzlich ein fester Wert ist und sich nicht mit der Anzahl der Shuttles ändert. Je größer die Anzahl der Shuttles ist, desto größer ist der Differenz zwischen der Anzahl der Auslagerung und Einlagerung pro Zeiteinheit und nahezu proportional zur Anzahl der Shuttles.

## 2. Auswertung der Anzahl der Shuttles auf Ausgangsmenge pro Stunde bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

Das optimale Kombination der Kriterien für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles ist die 3-te Kombination, nämlich „Minim + Zeit“. Der ausgewählte optimale Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles wird mit dem Originalmodell unten verglichen, um die Auswirkung der Anzahl der Shuttles auf die beiden Algorithmen zu untersuchen. Die Ergebnisse sind wie folgt:

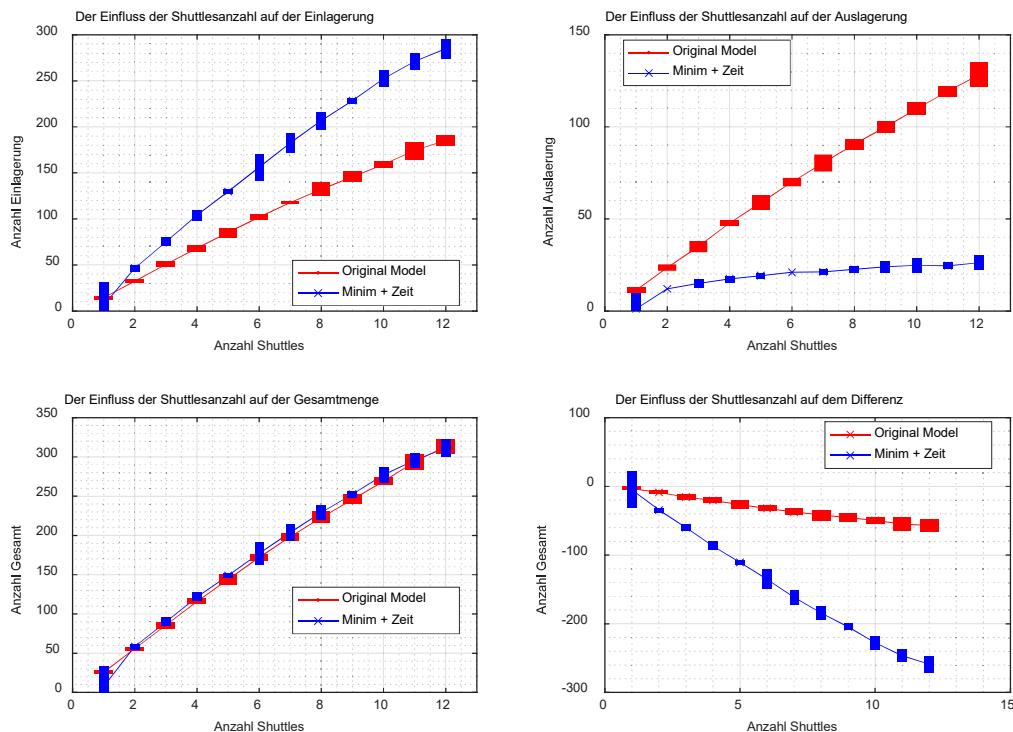


Abbildung 6-14: Diagramm der Systemleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttles bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles unter optimaler Kombination der Auswahlkriterien der Aufträge

Wie aus der Grafik in der unteren linken Ecke ersichtlich, liegt die Gesamteffizienz des Shuttles bei der Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles nahe an die Gesamteffizienz des Shuttles im Originalmodell und in einigen Bereichen sogar geringfügig besser als die im Originalmodell.

Gemäß der Grafik in der oberen linken Ecke ist die Anzahl der Einlagerung pro Zeiteinheit bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles jedoch viel höher als beim ursprünglichen Modell. Und je mehr Shuttles vorhanden sind, desto höher ist die Anzahl der Einlagerung pro Zeiteinheit. Laut Grafik in der oberen rechten Ecke ist die Anzahl der Auslagerung pro Zeiteinheit jedoch viel geringer als beim Originalmodell. Aus der Abbildung in der unteren rechten Ecke ist ersichtlich, dass mit zunehmender Anzahl der Shuttles der Differenz zwischen der Anzahl der Einlagerung und der Auslagerung pro Zeiteinheit deutlicher wird.

Sie Als Nächstes wird die Auswirkung des Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles auf die Effizienz jedes Shuttles im System analysiert. Das Ergebnis ist unten dargestellt:

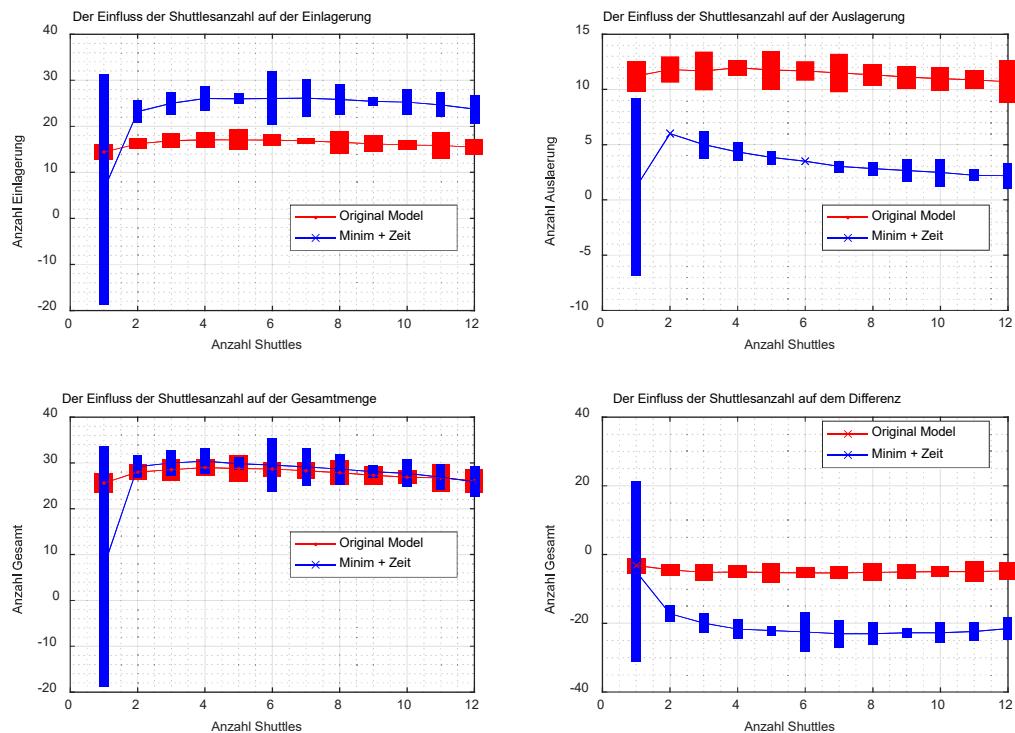


Abbildung 6-15: Diagramm der Effizienz jedes Shuttles in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttles bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles unter optimaler Kombination der Auswahlkriterien der Aufträge

Gemäß der Grafik in der unteren linken Ecke können festgestellt werden, dass das gesamte Auftragsabwicklungsvolumen pro Shuttle pro Zeiteinheit bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles nahe oder sogar besser als das beim ursprünglichen Modell ist. Das Verhältnis der Anzahl der Einlagerung und Auslagerung pro Shuttle pro Zeiteinheit sich jedoch vom ursprünglichen Modell unterscheidet.

Gemäß der Grafik in der oberen linken Ecke beträgt die Anzahl der Einlagerung pro Shuttle pro Zeiteinheit etwa das 1,5-fache der Anzahl beim ursprünglichen Modells. Gemäß der Grafik in der oberen rechten Ecke beträgt die Anzahl der Auslagerung pro Shuttle pro Zeiteinheit jedoch nur etwa 25% der Anzahl beim ursprünglichen Modells. Und mit der Zunahme der Anzahl der Shuttles zeigt die Anzahl der Auslagerung pro Shuttle pro Zeiteinheit einen starken Abwärtstrend.

Die Grafik in der unteren rechten Ecke zeigt den Differenz in der Anzahl zwischen der Einlagerung und der Auslagerung pro Shuttle pro Zeiteinheit. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass der Differenz etwa zehnmal so groß ist wie der des Originalmodells. Dies beweist, dass der Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles dazu neigt, dass für das Shuttle ein Auftrag ohne Sequenzanforderung ausgewählt wird.

### **6.3 Auswertung der Optimierung des Gesamtsystems durch den Umtausch von Aufträgen**

Der Optimierungsalgorithmus durch den Umtausch von Aufträgen zum Planen von Routen für mehrere Shuttles in Bewegung ist noch nicht perfekt, so dass sich der Algorithmus logischerweise als nicht lange Zeit lauffähig erwiesen hat. Daher wird dieser Algorithmus nicht auf langfristige Systemstabilität getestet.

Wenn jedoch die Anzahl der Shuttles im System gering ist, ist der Algorithmus nicht anfällig für Probleme und kann lange ausgeführt werden. In diesem Abschnitt wirkt sich auf die Leistung und Stabilität des Systems mit Optimierungsalgorithmus durch den Umtausch von Aufträgen aus, wenn die Systemlast gering ist, d.h. die Anzahl der Shuttles im System gering ist.

### 6.3.1 Auswertung des Einflusses der Anzahl an Shuttles auf der Stabilität des Gesamtsystems

Für jede Anzahl von Shuttles wurden fünf Experimente durchgeführt. Aufgrund des unvollständigen Algorithmus schlagen einige Experimente fehl. In der folgenden Tabelle ist die Anzahl der erfolgreichen Experimente für jede Anzahl von Shuttles aufgeführt:

Tabelle 6-28: Definition und Beschreibung von Symbolen und Variablen im Auftrag

| Anzahl der Shuttles | Systemlastrate | Anzahl erfolgreicher Experimente |              |
|---------------------|----------------|----------------------------------|--------------|
|                     |                | Erfolgsanzahl / Experimentanzahl | Erfolgsquote |
| 1                   | 8.33%          | 5 / 5                            | 100.00%      |
| 2                   | 16.67%         | 5 / 5                            | 100.00%      |
| 3                   | 25.00%         | 5 / 5                            | 100.00%      |
| 4                   | 33.33%         | 5 / 5                            | 100.00%      |
| 5                   | 41.67%         | 3 / 5                            | 60.00%       |
| 6                   | 50.00%         | 5 / 5                            | 100.00%      |
| 7                   | 58.33%         | 3 / 5                            | 60.00%       |
| 8                   | 66.67%         | 1 / 5                            | 20.00%       |
| >=9                 | >=75.00%       | 0 / 5                            | 0.00%        |

Systemlastrate repräsentiert das Verhältnis der aktuellen Anzahl von Shuttles im System zur maximal zulässigen Anzahl von Shuttles im System (nämlich 12). Gemäß der obigen Tabelle können festgestellt, dass die Erfolgsquote des Algorithmus schnell abfällt, wenn die Systemlastrate 50% überschreitet. Dies zeigt, dass unter hoher Systemlast die oben genannten Probleme wie Verfolgungsproblem häufig auftreten, wodurch die Stabilität des Systems schnell abnimmt.

Gemäß den Daten in der obigen Tabelle sind nur Experimente mit weniger als 6 Shuttles (Systemlastrate weniger als 50%) sinnvoll.

### 6.3.2 Auswertung des Einflusses der Anzahl an Shuttles auf den Durchsatz des Gesamtsystems

Als Nächstes wird die Auswirkungen der Anzahl der Shuttles auf die Systemleistung analysiert. Da einige Experimente fehlschlagen, werden nur die Ergebnisse erfolgreicher Experimente als Grundlage für die Auswertung ausgewählt. Die Änderung der Systemleistung mit der Anzahl der Shuttles wird wie in der folgenden Abbildung dargestellt:

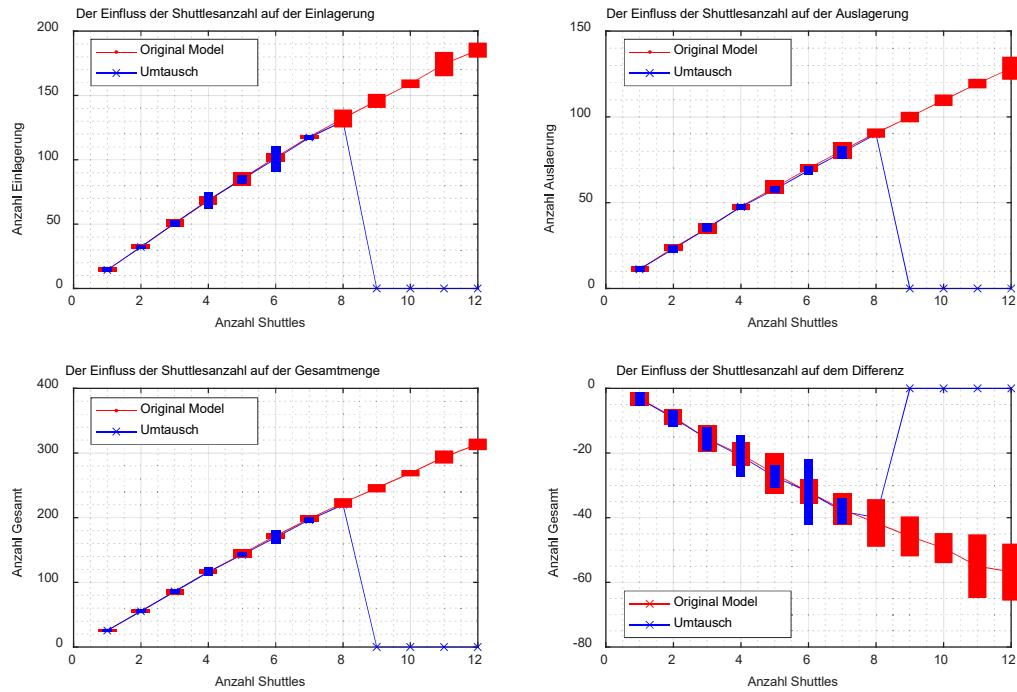


Abbildung 6-16: Diagramm der Systemleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttles bei Optimierung durch den Umtausch der Aufträge

Aus der obigen Abbildung geht hervor, dass die Ausgangsmenge pro Zeiteinheit bei System mit Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen bei geringer Systemlast des Originalmodells ähnlich ist. Dies liegt daran, dass bei einer geringen Anzahl von Shuttles im System die Anzahl der Situationen mit den Bedingungen für den Auftragsumtausch und die Anzahl des Auftragsumtauschs geringer ist, sodass der Optimierungsalgorithmus nicht vollständig genutzt werden kann.

Darüber hinaus kann aufgrund der ungenauen Auftragsumtauskriterien des Algorithmus selbst die Leistung des Systems nach dem Auftragsumtausch nicht unbedingt verbessert werden, was die Auswirkung jedes Auftragsumtauschs auf die Systemleistung instabil macht.

Als nächstes wird die Effizienz jedes Shuttles unter dem Optimierungsalgorithmus durch den Umtausch von Aufträgen analysiert. Die Ergebnisse sind wie folgt:

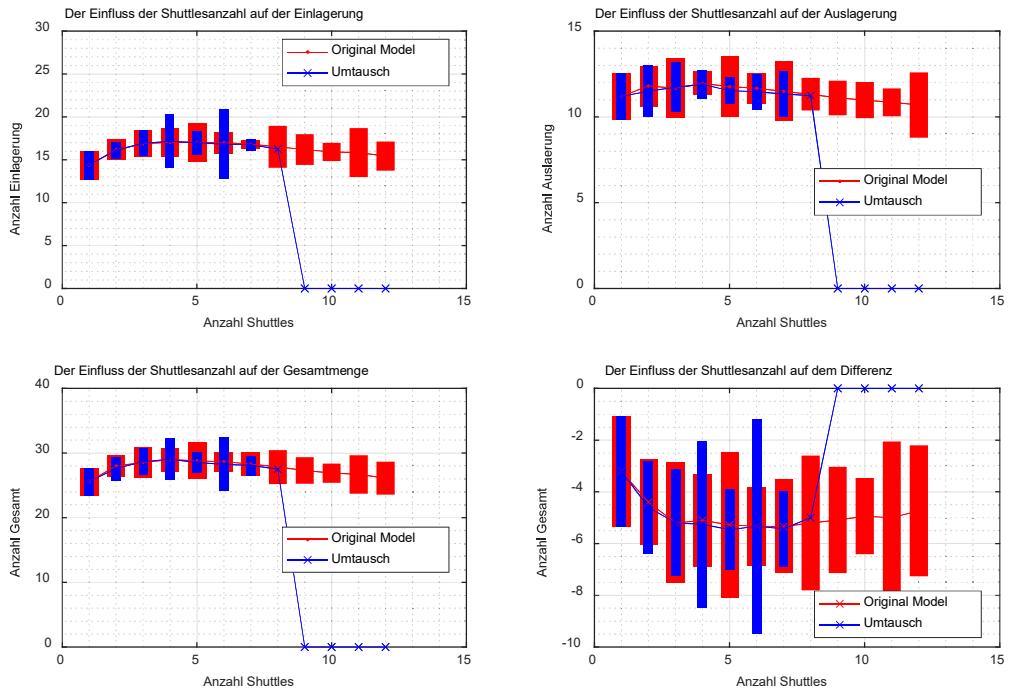


Abbildung 6-17: Diagramm der Effizienz jedes Shuttles in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttles bei Optimierung durch den Umtausch der Aufträge

Wie bei der Gesamtleistung des Systems ist die Effizienz jedes Shuttles bei geringer Systemlast fast gleich wie beim Originalmodell. Der Grund hierfür wurde oben ausführlich beschrieben.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

---

### 7.1 Zusammenfassung

Der Hauptzweck dieser Arbeit besteht darin, einen globalen Optimierungsalgorithmus für das MAPF-Problem vom OLPS-System zu finden. Basierend auf das bestehende Layout und CA\*-Algorithmus für zeitkontinuierliches System werden die Stabilität und die Leistung des Systems durch die Optimierung des Auftragsmoduls und des Routingmoduls verbessert.

Zu diesem Zweck werden zwei globale Optimierungsalgorithmen vorgeschlagen, nämlich Optimierung bei der Zuweisung des Auftrags und Optimierung durch den Umtausch der Aufträge.

Zunächst werden drei Auswahlkriterien der Aufträge und die möglichen Optionen für jedes Kriterium in Optimierung bei der Zuweisung des Auftrags angegeben. Anschließend werden zwei Optimierungsalgorithmen der Auftragsauswahl für Shuttle gemäß den verschiedenen Auswahlmethoden vorgeschlagen, nämlich individuelle Optimierung und Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles. Basierend auf die Kombinationen verschiedener Kriterien und Auswahlmethoden werden verschiedene Varianten des Optimierungsalgorithmus erhalten und spezifische Implementierungsmethoden gemäß dem ursprünglichen Modell beschrieben.

Der kritische Teil von Optimierung durch den Umtausch der Aufträge ist die Notwendigkeit, dass die Route des Shuttles in Bewegung geändert werden kann. In dieser Arbeit wird daher der zweistufige Routingalgorithmus vorgeschlagen, um den allgemeinen statischen Routingalgorithmus basierend auf dem CA\*-Algorithmus auf das sich bewegende Shuttle angewendet. In dieser Arbeit wird eine spezielle Implementierungsmethode für ein Shuttle angegeben. Wenn mehrere Shuttles gleichzeitig die Routen wechseln, werden in dieser Arbeit die möglichen Probleme und einige Lösungen beschrieben.

Schließlich werden die Simulationsexperimente für die langfristige Systemstabilität, Systemleistung und Effizienz des Shuttles von jedem Optimierungsalgorithmus durch Tecnomatix Plant Simulation durchgeführt. Durch die obigen Auswertungskriterien werden jedes Auftragsauswahlkriterium und jeder Optimierungsalgorithmus analysiert. Somit werden die beste Kombination von Kriterien für die Optimierung bei Zuweisung der Aufträge gefunden.

## 7.2 Ausblick

### 7.2.1 Die Kombination verschiedener Optimierungsmethoden zur Verbesserung der Gesamtleistung des Systems

In dieser Arbeit werden nur die Auswirkungen eines einzelnen Optimierungsalgoritmus auf das System untersucht. In tatsächlicher Situation können sich die Anforderungen an das Logistiksystem jedoch mit der Zeit ändern. Daher kann als nächstes untersucht werden, wie verschiedene Optimierungsalgorithmen kombiniert werden können, um die Anforderungen des Logistiksystems zu erfüllen.

Die Kombination von Optimierungsalgorithmen kann zwischen verschiedenen Optimierungsmethoden oder zwischen verschiedenen Kriterien desselben Optimierungsalgoritmus erfolgen. Der Schwerpunkt liegt auf der Probleme beim Umschalten des Algorithmus sowie deren Auswirkungen auf die Systemleistung.

### 7.2.2 Einsatz der dynamischen MAPF-Algorithmen in einem zeitkontinuierlichen System durch den zweistufigen Routingalgorithmus

Im Kapitel „Stand der Technik“ werden viele Kollisions- und Deadlocks-freier Multi-Agent-Path-Finding-Algorithmen für globale Optimierung vorgestellt, aber die meisten Algorithmen erfordern, dass das Shuttle in Ruhe oder das System zeitdiskret ist. Da dieses Modell zeitkontinuierlich ist und die Beschleunigung und Verzögerung des Shuttles berücksichtigt werden, ist das obige Optimierungsalgorithmen wie WHCA\* in diesem Modell schwierig zu implementieren.

In dieser Arbeit wird jedoch der zweistufige Routingalgorithmus vorgeschlagen, mit dem das System die Route für das Shuttle in Bewegung planen kann, sodass die globalen Optimierungsalgorithmen angewandt werden können. Es lohnt sich zu untersuchen, wie diese globalen Optimierungsalgorithmen im Modell verwendet werden und welche Probleme und Lösungen bei der Verwendung generiert werden.

### 7.2.3 Kostenanalyse des Systems mit verschieden globalen Optimierungsalgorithmen

Im Kapitel „Auswertung der Algorithmen für globale Optimierung“ wird die Beziehung zwischen der Ausgangsmenge pro Shuttle pro Zeiteinheit und der Anzahl der Shuttles unter jedem Optimierungsalgoritmus beschrieben. Die Anzahl der Shuttles hängt von den Betriebskosten des Logistiksystems des Systems ab, während die Anzahl der Ausgang von dem Absatz des Logistiksystems abhängt. Wie das Gleichgewicht zwischen Kosten und Absatz gefunden wird, um der Gewinn des Logistiksystems zu maximieren, kann eine praktische Forschungsrichtung werden.

## Literaturverzeichnis

---

- [Ain-2012] Aini, A.; Salehipour, A.: Speeding up the Floyd–Warshall algorithm for the cycled shortest path problem. In: Applied Mathematics Letters, Jg. 25 (2012) Nr. 1, S. 1–5.
- [Bna-2014] Bnaya, Z.; Felner, A. (Hrsg.): Conflict-oriented windowed hierarchical cooperative A\*, 2014.
- [Cul-1994] Culberson, J.; Schaeffer, J.: Efficiently searching the 15-puzzle (1994)
- [Duc-2014] Duchoř, F.; Babinec, A.; Kajana, M.; Bečvář, P.; Floreka, M.; Ficoa, T.; Jurišica, L.: Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot. In: Procedia Engineering, Jg. 96 (2014), S. 59–69.
- [Fra-2017] Francis, S.: Suning launches ‘basically unmanned’ automated warehouse with plans to use 1,000 robots. <https://roboticsandautomationnews.com/2017/12/04/suning-launches-basically-unmanned-automated-warehouse-with-plans-to-use-1000-robots/15272/>, Aufruf am 08.05.2020.
- [GEB-2020] GEBHARDT: Hohe Dynamik und Flexibilität mit StoreBiter® 500-OLPS. <https://www.gebhardt-foerdertechnik.de/de/de/produkte/lagertechnik/shuttle-systeme/paletten-storebiter-500-olps.html>, Aufruf am 11.05.2020.
- [Ger-2006] Geramifard, A.; Chubak, P.; Bulitko, V. (Hrsg.): Biased Cost Pathfinding, 2006.
- [Hol-1996] Holte, R. C.; Perez, M. B.; Zimmer, R. M.; MacDonald, A. J. (Hrsg.): Hierarchical A\*: Searching abstraction hierarchies efficiently, 1996.
- [Hvě-2018] Hvězda, J.; Rybecký, T.; Kulich, M.; Přeučil, L. (Hrsg.): Context-aware route planning for automated warehouses, 2018.
- [Kor-1990] Korf, R. E.: Real-time heuristic search. In: Artificial Intelligence, Jg. 42 (1990) Nr. 2-3, S. 189–211.
- [Lat-2012] Latombe, J.-C.: Robot motion planning. Springer Science & Business Media, 2012.

- [Lie-2017] Lienert, T.; Fottner, J. (Hrsg.): No More Deadlocks-Applying The Time Window Routing Method To Shuttle Systems, 2017.
- [Lie-2018a] Lienert, T.; Wenzler, F.; Fottner, J. (Hrsg.): Robust integration of acceleration and deceleration processes into the time window routing method, 2018.
- [Lie-2018b] Lienert, T.; Fottner, J. (Hrsg.): Routing-based Sequencing Applied to Shuttle Systems, 2018.
- [Mer-2017] Merschformann, M.; Xie, L.; Erdmann, D.: Path planning for robotic mobile fulfillment systems. In: arXiv preprint arXiv:1706.09347 (2017)
- [Sha-2015] Sharon, G.; Stern, R.; Felner, A.; Sturtevant, N. R.: Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding. In: Artificial Intelligence, Jg. 219 (2015), S. 40–66.
- [Sho-1970] Shore, H. H.: The transportation problem and the Vogel approximation method. In: Decision Sciences, Jg. 1 (1970) Nr. 3-4, S. 441–457.
- [Sie-2020] Siemens PLM: Tecnomatix Release Notes-Tecnomatix Release Notes 14.1.2. <https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/tecnomatix/14.1.2>, Aufruf am 29.04.2020.
- [Sil-2005] Silver, D.: Cooperative Pathfinding. In: AIIDE, Jg. 1 (2005), S. 117–122.
- [Sta-2010] Standley, T. S. (Hrsg.): Finding optimal solutions to cooperative pathfinding problems, 2010.
- [Ter-2010] Ter Mors, A. W.; Witteveen, C.; Zutt, J.; Kuipers, F. A. (Hrsg.): Context-aware route planning, 2010.
- [TUM-2020] Siciliano, G.: Paletten Aufnehmen Lagern Sequenzieren Abgeben - Entwicklung eines Lagersystems zur Speicherung und sequenzierten Abgabe von Paletten. <https://www.mw.tum.de/fml/forschung/aktuelle-forschungsprojekte/palsa-entwicklung-eines-lagersystems-zur-speicherung-und-sequenzierten-abgabe-von-paletten/>, Aufruf am 29.04.2020.
- [Wan-2008] Wang, K.-H. C.; Botea, A. (Hrsg.): Fast and Memory-Efficient Multi-Agent Pathfinding, 2008.

- [Wan-2011] Wang, H.; Yu, Y.; Yuan, Q. (Hrsg.): Application of Dijkstra algorithm in robot path-planning, 2011.
- [Yu-2013] Yu, J.; LaValle, S. M.: Multi-agent path planning and network flow. In: Frazzoli, E., et al. (Hrsg.): Algorithmic foundations of robotics X. Springer, 2013, S. 157–173.
- [Zel-1992] Zelinsky, A.: A mobile robot navigation exploration algorithm. In: IEEE Transactions of Robotics and Automation, Jg. 8 (1992) Nr. 6, S. 707–717.



# Abbildungsverzeichnis

---

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1-1: Das OLPS-Systeme [GEB-2020]                                                                                                                                             | 1  |
| Abbildung 1-2: Tecnomatix Plant Simulation [Sie-2020]                                                                                                                                  | 4  |
| Abbildung 2-1: Die Konfigurationen des Shuttle-Systems [Lie-2017]                                                                                                                      | 8  |
| Abbildung 2-2: Die Zeitfenster unter oder ohne Berücksichtigung der Beschleunigung und Verzögerung                                                                                     | 12 |
| Abbildung 2-3: Das qualifizierte Zeitfenster am Startknoten                                                                                                                            | 14 |
| Abbildung 2-4: Aufbau eines Zeitfensters (Eintritt-, Durchfahren- und Austritts-Teil)                                                                                                  | 14 |
| Abbildung 2-5: Zeitfenster benachbarter Knoten während der Bewegung des Shuttles                                                                                                       | 15 |
| Abbildung 2-6: Erklärung des beanspruchten Knotens                                                                                                                                     | 16 |
| Abbildung 2-7: Die Entfernung des Shuttles am Startknoten                                                                                                                              | 18 |
| Abbildung 2-8: Die Entfernung des Shuttles am Endknoten                                                                                                                                | 21 |
| Abbildung 2-9: Allgemeiner Bewegungszustand des Zwischenknotens mit der maximalen Geschwindigkeit $v = v_{max}$                                                                        | 24 |
| Abbildung 2-10: Zwei Typen von Pufferknoten [Lie-2018b]                                                                                                                                | 29 |
| Abbildung 2-11: Deadlock für Aufträge mit zwei voneinander unabhängige Sequenz [Lie-2018b]                                                                                             | 29 |
| Abbildung 2-12: Das Shuttle mit dem Auftrag mit falscher Sequenz verlässt vorübergehend den Zielknoten, um auf das Shuttle mit dem Auftrag mit richtiger Sequenz zu warten [Lie-2018b] | 30 |
| Abbildung 2-13: Algorithmus für der Sequenz-basierter Anpassung beim Zielort                                                                                                           | 30 |
| Abbildung 2-14: Algorithmus für der Sequenz-basierter Anpassung beim Startort                                                                                                          | 31 |
| Abbildung 2-15: Struktur und Topologie des Netzwerkproblems                                                                                                                            | 32 |
| Abbildung 2-16: Algorithmus der Initialisierungsphase von Dijkstra                                                                                                                     | 33 |
| Abbildung 2-17: Algorithmus der Iterationsphase von Dijkstra                                                                                                                           | 33 |
| Abbildung 2-18: Algorithmus der Initialisierungsphase von Floyd-Warshall-Algorithmus                                                                                                   | 34 |
| Abbildung 2-19: Algorithmus der Iterationsphase von Floyd-Warshall-Algorithmus                                                                                                         | 35 |
| Abbildung 2-20: Algorithmus der Iterationsphase von A*                                                                                                                                 | 36 |
| Abbildung 2-21: Algorithmus von LRA*                                                                                                                                                   | 37 |
| Abbildung 2-22: Eine Situation des Deadlocks im OLPS-System                                                                                                                            | 39 |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 2-23: Eine Lösung für Deadlock im OLPS-System                                              | 39 |
| Abbildung 2-24: Algorithmus der Prioritätsänderung von WHCA*                                         | 41 |
| Abbildung 2-25: WHCA* zur Lösung des durch die Sequenz verursachten Deadlocks                        | 42 |
| Abbildung 2-26: Routing für zwei Shuttle mit zwei voneinander unabhängige Aufträge mit CA* und WHCA* | 43 |
| Abbildung 2-27: Algorithmus von CO-WHCA*                                                             | 43 |
| Abbildung 2-28: Algorithmus von BCP                                                                  | 45 |
| Abbildung 2-29: Algorithmus von Bearbeitung der Kollision durch ID                                   | 46 |
| Abbildung 2-30: Algorithmus von Routing durch ID                                                     | 46 |
| Abbildung 3-1: Sechs Modul des Modells                                                               | 49 |
| Abbildung 3-2: relevante Methode und Tabelle des Initialisierungsmoduls im AuftragsModul             | 50 |
| Abbildung 3-3: die Typen aller Knoten im Layout                                                      | 52 |
| Abbildung 3-4: Algorithmus der Layout-Einstellungsphase bei Initialisierung                          | 53 |
| Abbildung 3-5: Struktur des Tabelle „IO_RBG“                                                         | 53 |
| Abbildung 3-6: Struktur des Tabelle „IO_LKW“                                                         | 54 |
| Abbildung 3-7: relevante Tabelle bei der Auswahl eines Lagerplatzes                                  | 54 |
| Abbildung 3-8: Tabelle „Shuttles“ zum Aufzeichnen der Objekten von Shuttles                          | 55 |
| Abbildung 3-9: Algorithmus der Erzeugung der Shuttles                                                | 55 |
| Abbildung 3-10: Algorithmus der Erzeugung der Aufträge bei Initialisierungsphase                     | 56 |
| Abbildung 3-11: Algorithmus der Methode „bei_Ankunft_Lagerplatz“ bei Initialisierungsphase           | 57 |
| Abbildung 3-12: Flussdiagramm der Bewegungsinitialisierungsphase                                     | 57 |
| Abbildung 3-13: Flussdiagramm der Initialisierungsphase im originalen Modell                         | 58 |
| Abbildung 3-14: Die Zusammensetzung des Submoduls „Knoten“                                           | 59 |
| Abbildung 3-15: Die Hauptparameter des Weg-Objekts                                                   | 60 |
| Abbildung 3-16: das Koordinatensystem für die Knoten                                                 | 61 |
| Abbildung 3-17: Die Parameter im Teil „Attribut“ des Shuttles                                        | 63 |
| Abbildung 3-18: Die benutzerdefinierten Variablen von Shuttle                                        | 64 |
| Abbildung 3-19: Struktur der Tabelle „Route“ im Shuttle                                              | 65 |
| Abbildung 3-20: Struktur der Tabelle „Ziele“ im Shuttle                                              | 65 |
| Abbildung 3-21: Positionen und Einstellungen der Sensoren auf dem Weg jedes Knotens                  | 66 |
| Abbildung 3-22: Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das beladene Shuttle am IO-Knoten    | 67 |

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 3-23:Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das leere<br>Shuttle am IO-Knoten                         | 68 |
| Abbildung 3-24:Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das beladene<br>Shuttle am Lagerplatz                     | 68 |
| Abbildung 3-25:Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das leere<br>Shuttle am Lagerplatz                        | 69 |
| Abbildung 3-26:alle nicht belegte Einlagerung-Knoten von IO_LKW in die Tabelle<br>„Temp_IO_LKW“ eingefügen               | 71 |
| Abbildung 3-27:Algorithmus der Methode „generiere_Auftraege_LKW“                                                         | 71 |
| Abbildung 3-28:alle nicht belegte Auslagerung-Knoten von IO_RBG in die<br>Tabelle „Temp_IO_RBG“ eingefügen               | 72 |
| Abbildung 3-29:Algorithmus der Auftragsbearbeitungsmethode für das leere<br>Shuttle am Lagerplatz                        | 73 |
| Abbildung 3-30:die maximale Sequenznummer der generierten Aufträge in der<br>Tabelle „Sequenznummern“                    | 73 |
| Abbildung 3-31:Algorithmus der Methode „weis_Auftrag_zu“ im originalen<br>Modell                                         | 75 |
| Abbildung 3-32:Struktur der Tabelle „Auftraege“                                                                          | 75 |
| Abbildung 3-33:Flussdiagramm der Methode „weis_Auftrag_zu“ im originalen<br>Model                                        | 76 |
| Abbildung 3-34:Relevante Methoden und Tabellen im Routingmodul                                                           | 77 |
| Abbildung 3-35:Flussdiagramm der Methode „Multi_Stage_Routing“ im originalen<br>Model                                    | 78 |
| Abbildung 3-36:Struktur der Tabelle „Informationen“ im Routingmodul                                                      | 79 |
| Abbildung 3-37:Struktur der Tabelle „Knoten_Route“ im Routingmodul                                                       | 81 |
| Abbildung 3-38:Relevante Methode und Tabelle im Bewegungsmodul im<br>originalen Modell                                   | 82 |
| Abbildung 3-39:Flussdiagramm der Methode „bei_Ankunft_Knoten“                                                            | 83 |
| Abbildung 3-40:Flussdiagramm der Methode „bei_Ankunft_Ziel“                                                              | 84 |
| Abbildung 4-1: Flussdiagramm des Vorbereitungsphase bei Individuale<br>Optimierung                                       | 95 |
| Abbildung 4-2: Berechnungstabelle für Individuale Optimierung                                                            | 95 |
| Abbildung 4-3: Flussdiagramm des Phase für Zeit-Kriterium bei Individuale<br>Optimierung                                 | 96 |
| Abbildung 4-4: Die minimale Fahrzeit nach der Position und Ausrichtung des<br>Knoten aus der Tabelle „Minimale_Fahrzeit“ | 96 |
| Abbildung 4-5: Flussdiagramm des Phase für Abstand-kriterium bei Individuale<br>Optimierung                              | 97 |
| Abbildung 4-6: Algorithmus für die Funktion „Multi_Stage_Routing_Test“                                                   | 97 |

|                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 4-7: Flussdiagramm des Phase für Koeffizient-Berechnungsphase für Sequenz-Kriterium bei Individuale Optimierung                       | 98  |
| Abbildung 4-8: Flussdiagramm des Phase für Sequenz-Kriterium bei Individuale Optimierung                                                        | 99  |
| Abbildung 4-9: Flussdiagramm des Nachbearbeitungsphase bei Individuale Optimierung                                                              | 100 |
| Abbildung 4-10:Gesamtflussdiagramm der Methode "weis_Auftrag_zu" bei Individuale Optimierung                                                    | 100 |
| Abbildung 4-11:Algorithmus der Suche von relative optimale Kombination durch heuristische Methode                                               | 102 |
| Abbildung 4-12:Änderung in der Methode „AuftragsModul_initialisieren“ und der Flussdiagramm der Methode „wiese_Auftrag_zu_init“                 | 103 |
| Abbildung 4-13:Relevante Methode und Tabelle für die Zuweisung der Aufträge bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles             | 104 |
| Abbildung 4-14:Flussdiagramm der Methode „Ziele_leer_Verteilung_befuellen“ bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles              | 106 |
| Abbildung 4-15:Flussdiagramm des Berechnungsphase anhand zweier Kriterien bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles               | 107 |
| Abbildung 4-16:Algorithmus von Suche des von Maximal- und Minimalwerte aus eine Reihe von Werte                                                 | 107 |
| Abbildung 4-17:Flussdiagramm der Methode „calc_max_delta“                                                                                       | 108 |
| Abbildung 4-18:Struktur der Tabelle „Ziele_leer_verteilung“                                                                                     | 109 |
| Abbildung 4-19:Flussdiagramm der Methode „get_optimal_combination“                                                                              | 110 |
| Abbildung 4-20:Struktur der Tabelle „Verteilung“                                                                                                | 111 |
| Abbildung 4-21:Algorithmus der Methode „Routing_be_iinit“                                                                                       | 111 |
| Abbildung 4-22:Flussdiagramm der Methode „weise_Auftrag_zu“ für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                             | 112 |
| Abbildung 4-23:Flussdiagramm der Methode „weise_Auftrag_zu_init“ für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                        | 112 |
| Abbildung 4-24:Flussdiagramm der Phase der Informationssammlung der Aufträge                                                                    | 113 |
| Abbildung 4-25:Flussdiagramm der Phase der Informationssammlung für Shuttles                                                                    | 114 |
| Abbildung 4-26:Flussdiagramm der Berechnungsphase der Empfangszeit für neue Auftrag                                                             | 115 |
| Abbildung 4-27:Flussdiagramm der Berechnungsphase für Aufträge bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                          | 117 |
| Abbildung 4-28:Flussdiagramm der Berechnungsphase durch die Verwendung dreier Kriterien bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles | 118 |

|                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 4-29: Flussdiagramm der Methode „Ziele_leer_Verteilung_befuellen bei_Simulation“                                                                | 118 |
| Abbildung 4-30: Algorithmus von Nachbearbeitungsphase „Verteilung_Nacharbeitung_bei_Simulation“                                                           | 119 |
| Abbildung 5-1: Unfall beim Eintritt des Funktionsknoten, die kein Zielort ist                                                                             | 122 |
| Abbildung 5-2: Flussdiagramm der Methode „weise_Auftrag_zu“ für die Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen                                          | 124 |
| Abbildung 5-3: Flussdiagramm der Methode „Auftrag_wieder_vergeben“                                                                                        | 125 |
| Abbildung 5-4: Flussdiagramm der Methode „Ziele_leer_verteilung_befuellen“ bei Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen                               | 126 |
| Abbildung 5-5: Flussdiagramm des Berechnung des Werts anhand Zeilenindex und Spaltenindex der Tabelle „Ziele_leer_verteilung“                             | 127 |
| Abbildung 5-6: Tabelle „Verteilung“ zur Aufzeichnung des Ergebnis nach dem Umtausch der Aufträge                                                          | 128 |
| Abbildung 5-7: Algorithmus von zweistufigen Routingalgorithmus                                                                                            | 129 |
| Abbildung 5-8: Kollision wegen dem erzwingenden Anhalten des Shuttles am nächsten Knoten                                                                  | 130 |
| Abbildung 5-9: Erweiterung des Zeitfensters aufgrund unbekanntes Bewegungszustand                                                                         | 131 |
| Abbildung 5-10: Die Erweiterung des anfänglichen Zeitfensters zur Verringerung der Optimalität der Route                                                  | 132 |
| Abbildung 5-11: Algorithmus von zweistufigen Routingalgorithmus                                                                                           | 133 |
| Abbildung 5-12: Der Einfluss verschiedener Zwischenknoten auf die Optimalität der Route                                                                   | 134 |
| Abbildung 5-13: Algorithmus von Auswahl des optimalen Zwischenknotens                                                                                     | 134 |
| Abbildung 5-14: Flussdiagramm der Methode „calc_first_changeable_Knoten“                                                                                  | 137 |
| Abbildung 5-15: Flussdiagramm der Methode „get_Ziel_Knoten“                                                                                               | 138 |
| Abbildung 5-16: Flussdiagramm der Methode „delete_Segment“                                                                                                | 140 |
| Abbildung 5-17: Flussdiagramm der Methode „Ankunft_Zeit_berechnen“                                                                                        | 142 |
| Abbildung 5-18: Flussdiagramm der Berechnung der reservierten Zeitfenster für alle Knoten zwischen dem aktuellen Standort des Shuttles und Zwischenknoten | 143 |
| Abbildung 5-19: Flussdiagramm der Routingphase in der zweiten Stufe für die Suche der optimalen Route                                                     | 144 |
| Abbildung 5-20: Flussdiagramm der Methode „Route_pruefen“                                                                                                 | 145 |
| Abbildung 5-21: Flussdiagramm der Methode „bei_Ankunft_Knoten“ für die Optimierung durch den Umtausch der Aufträge                                        | 147 |
| Abbildung 5-22: Methoden für zweistufige Routing                                                                                                          | 148 |
| Abbildung 5-23: Flussdiagramm der Methode „bei_Ankunft_stop“                                                                                              | 149 |

|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 5-24: Flussdiagramm der Methode „Routing_beи_Bewegung“                                                                                                | 149 |
| Abbildung 5-25: Flussdiagramm der Suchphase der optimalen Route durch zweistufige Routing                                                                       | 150 |
| Abbildung 5-26: Flussdiagramm der Aktualisierungsphase zur Suche der optimalen Route                                                                            | 151 |
| Abbildung 5-27: Flussdiagramm der Routingphase in der zweiten Stufe für die optimale Route                                                                      | 152 |
| Abbildung 5-28: Flussdiagramm der Nachbearbeitungsphase für zweistufige Routing                                                                                 | 153 |
| Abbildung 5-29: Flussdiagramm der Methode „Route_postprocessing“                                                                                                | 154 |
| Abbildung 5-30: Flussdiagramm der Phase für das Setzen der Route in ersten Stufe                                                                                | 155 |
| Abbildung 5-31: Flussdiagramm der Phase für das Setzen der Route in zweiten Stufe                                                                               | 156 |
| Abbildung 5-32: Flussdiagramm der Methode „set_Verzoegerzeitpunkt“                                                                                              | 157 |
| Abbildung 5-33: Flussdiagramm der Methode „to_Shuttle“                                                                                                          | 160 |
| Abbildung 5-34: Einfluss der reservierten Zeitfenster auf die Route                                                                                             | 161 |
| Abbildung 5-35: Einfluss der Anzahl der reservierten Zeitfenster auf die Optimalität der Route                                                                  | 162 |
| Abbildung 5-36: Algorithmus von Nachbearbeitung aller Shuttles nach dem Umtausch der Aufträge                                                                   | 162 |
| Abbildung 5-37: Darstellung des Verfolgungsproblems (Chasing Problem)                                                                                           | 163 |
| Abbildung 5-38: Lösung des Verfolgungsproblems durch Löschen aller relevante Route und Zeitfenster                                                              | 164 |
| Abbildung 5-39: Darstellung des Pendelproblems (Pendulum Problem)                                                                                               | 165 |
| Abbildung 5-40: Flussdiagramm der Methode „bei_Ankunft_Knoten“ für die Optimierung durch den Umtausch der Aufträge mit Behandlung des fehlgeschlagenen Routings | 166 |
| Abbildung 5-41: Flussdiagramm der Behandlung des fehlgeschlagenen Routings                                                                                      | 167 |
| Abbildung 6-1: Berechnungsmethode der Linearität und mögliche Situationen                                                                                       | 174 |
| Abbildung 6-2: Berechnungsmethode von Zeitaufwand pro Ausgangseinheit und Startzeit des stabilen Ausgangs                                                       | 174 |
| Abbildung 6-3: Relevante Objekte und Methode für Einstellung der Schleifensimulation                                                                            | 182 |
| Abbildung 6-4: Flussdiagramm der Methode „endsim“ für Schleifensimulation                                                                                       | 183 |
| Abbildung 6-5: Zeitliste zur Aufzeichnung der Änderung der Ausgangsmenge mit der Zeit“                                                                          | 184 |

|                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 6-6: Relevante Tabelle, Objekte und Methode zur Aufzeichnung der Ergebnisse jeder Simulation                                                                                                                  | 184 |
| Abbildung 6-7: Die Excel-Dateien zur Speicherung der Ergebnisse aller Experimente                                                                                                                                       | 185 |
| Abbildung 6-8: MatLab GUI für die Vereinfachung des Lesens und Abbildens von Ausgangsmenge mit der Zeit                                                                                                                 | 186 |
| Abbildung 6-9: Lineare und parabolische Anpassung der Ausgangsmenge mit der Zeit für die Systeme mit individuale Optimierung mit geringerer Linearität                                                                  | 190 |
| Abbildung 6-10: Überprüfung der langfristigen Stabilität des Systems mit Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles mit geringerer Index für langfristige Betrieb                                  | 194 |
| Abbildung 6-11: Lineare und parabolische Anpassung der Ausgangsmenge mit der Zeit für die Systeme mit Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles mit geringerer Linearität                         | 195 |
| Abbildung 6-12: Diagramm der Systemleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttles bei individuale Optimierung unter optimaler Kombination der Auswahlkriterien der Aufträge                                       | 206 |
| Abbildung 6-13: Diagramm der Effizienz jedes Shuttles in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttles bei individuale Optimierung unter optimaler Kombination der Auswahlkriterien der Aufträge                             | 207 |
| Abbildung 6-14: Diagramm der Systemleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttles bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles unter optimaler Kombination der Auswahlkriterien der Aufträge           | 208 |
| Abbildung 6-15: Diagramm der Effizienz jedes Shuttles in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttles bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles unter optimaler Kombination der Auswahlkriterien der Aufträge | 209 |
| Abbildung 6-16: Diagramm der Systemleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttles bei Optimierung durch den Umtausch der Aufträge                                                                                 | 212 |
| Abbildung 6-17: Diagramm der Effizienz jedes Shuttles in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttles bei Optimierung durch den Umtausch der Aufträge                                                                       | 213 |
|                                                                                                                                                                                                                         |     |
| Abbildung D-1: Lesen der Daten aus Excel-Dateien in MatLab                                                                                                                                                              | D-1 |
| Abbildung D-2: Auswahl der Optimierungsmethode, der Kombination der Kriterien und der Simulationszeit                                                                                                                   | D-2 |
| Abbildung D-3: Erzeugung von den Bildern für die ausgewählten Daten                                                                                                                                                     | D-3 |
| Abbildung D-4: Generierung und Darstellung der Anpassungskurve                                                                                                                                                          | D-4 |



# Tabellenverzeichnis

---

|               |                                                                                                                   |    |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 2-1:  | <i>Definition und Beschreibung von Symbolen und Variablen</i>                                                     | 9  |
| Tabelle 2-2:  | Definition und Beschreibung von Symbolen und Variablen                                                            | 9  |
| Tabelle 2-3:  | Definition und Beschreibung von Symbolen und Variablen im Auftrag                                                 | 10 |
| Tabelle 2-4:  | Daten im reservierten Zeitfenster                                                                                 | 10 |
| Tabelle 2-5:  | <i>Vier Darstellungsoptionen des Abstands</i>                                                                     | 17 |
| Tabelle 2-6:  | Bewegungszustände am Startknoten                                                                                  | 19 |
| Tabelle 2-7:  | Bewegungszustände am Endknoten                                                                                    | 22 |
| Tabelle 2-8:  | Bewegungszustände am Zwischenknoten mit der maximalen Geschwindigkeit $v = v_{max}$                               | 25 |
| Tabelle 2-9:  | Bewegungszustände am Zwischenknoten mit der maximalen Geschwindigkeit $v < v_{max}$                               | 27 |
| Tabelle 2-10: | Initialisierung der Berechnungstabelle für Dijkstra-Algorithmus                                                   | 32 |
| Tabelle 2-11: | Initialisierung der Berechnungstabelle für Floyd-Warshall-Algorithmus                                             | 34 |
| Tabelle 3-1:  | Bilden und Bildnamen von verschiedene Typen und Zustände des Knotens                                              | 51 |
| Tabelle 3-2:  | <i>Die Hauptobjekte des Sub-moduls „Knoten“</i>                                                                   | 60 |
| Tabelle 3-3:  | <i>Die Typen und möglichen Werte verschiedener Parameter im Weg-Objekt</i>                                        | 61 |
| Tabelle 3-4:  | <i>Größen und Parameter des Knotens</i>                                                                           | 62 |
| Tabelle 3-5:  | <i>Aktivierungsmethoden von drei Methoden zur Steuerung beim Ankunft und Verlassen des Knotens</i>                | 62 |
| Tabelle 3-6:  | <i>Die Größe und die Bewegungsparameter des Shuttles</i>                                                          | 63 |
| Tabelle 3-7:  | <i>Die wichtigsten benutzerdefinierten Variablen von Shuttle für das folgende Routingmodul und Bewegungsmodul</i> | 65 |
| Tabelle 3-8:  | verschiedene Auftragsbearbeitungsmethode nach dem Typ des Zielknotens und des Ladenzustands des Shuttles          | 69 |
| Tabelle 3-9:  | die Auftragsgenerierungsmethode verschiedener Typen der Aufträge                                                  | 70 |
| Tabelle 3-10: | Informationen für einen Auftrag                                                                                   | 74 |
| Tabelle 4-1:  | Vier Darstellungsoptionen des Abstands                                                                            | 89 |
| Tabelle 4-2:  | Fünf Schätzung-Optionen der zusätzlicher Zeit                                                                     | 92 |
| Tabelle 4-3:  | Kombination der drei Kriterien für Individuale Optimierung                                                        | 94 |

|               |                                                                                                                                 |     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 4-4:  | Berechnungstabelle für Suche der optimalen Kombination bei der Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles              | 101 |
| Tabelle 4-5:  | Kombination der drei Kriterien für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles bei Initialisierungsphase                | 105 |
| Tabelle 4-6:  | Kombination der drei Kriterien für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles während der Simulation                   | 116 |
| Tabelle 5-1:  | verschiedene Auftragsbearbeitungsmethode nach dem Typ des Zielknotens und des Ladenzustands des Shuttles                        | 121 |
| Tabelle 5-2:  | Verschiedene Situationen der Bewegung des Shuttles bei Annäherung an den Zielknoten                                             | 122 |
| Tabelle 5-3:  | die Beziehung und die Berechnungsmethode des Abstands zwischen dem aktuellen Standort des Shuttles und den beanspruchten Knoten | 135 |
| Tabelle 5-4:  | der Bewegungszustand des Shuttles in der ersten Stufe                                                                           | 141 |
| Tabelle 5-5:  | Hauptparameter für die Tabelle „Informationen“                                                                                  | 144 |
| Tabelle 5-6:  | Verschiedene Probleme in der Simulation und in der Realität                                                                     | 146 |
| Tabelle 6-1:  | Abkürzung von verschiedene Kriterien und verschiedene Optionen                                                                  | 170 |
| Tabelle 6-2:  | Index und Beschreibung verschiedener Kombinationen der Kriterien bei verschiedene Optimierungsalgorithmus                       | 171 |
| Tabelle 6-3:  | Symbol und Berechnungsformel für die Kriterien der langfristigen Systemstabilität und –Robustheit                               | 175 |
| Tabelle 6-4:  | Symbol und Berechnungsformel für die Kriterien der Systemleistung                                                               | 179 |
| Tabelle 6-5:  | Versuchsplan für die langfristige Systemstabilität                                                                              | 180 |
| Tabelle 6-6:  | Versuchsplan für Durchschnitt und Abweichung der Anzahl des Ausgangs pro Stunde                                                 | 181 |
| Tabelle 6-7:  | Versuchsplan für die Einfluss der Anzahl des Shuttles                                                                           | 181 |
| Tabelle 6-8:  | Index für langfristige Betriebsfähigkeit aller Kombinationen der Kriterien für individuale Optimierung                          | 187 |
| Tabelle 6-9:  | Zwei Gründe für das geringen langfristige Betriebsfähigkeit                                                                     | 188 |
| Tabelle 6-10: | Bestätigte und zweifelhafte Algorithmen ohne langfristige Betriebsfähigkeit                                                     | 189 |
| Tabelle 6-11: | Linearität aller Kombinationen der Kriterien für individuale Optimierung                                                        | 190 |
| Tabelle 6-12: | Quadratischer Koeffizient der t-n-Kurve aller Kombinationen der Kriterien für individuale Optimierung                           | 191 |
| Tabelle 6-13: | Zeitaufwand pro Ausgangseinheit aller Kombinationen der Kriterien für individuale Optimierung                                   | 192 |

|               |                                                                                                                                                                                 |     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 6-14: | Index für langfristige Betriebsfähigkeit aller Kombinationen der Kriterien für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                                              | 193 |
| Tabelle 6-15: | Linearität aller Kombinationen der Kriterien für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                                                                            | 195 |
| Tabelle 6-16: | Quadratischer Koeffizient der t-n-Kurve und n-t-Kurve aller Kombinationen der Kriterien für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                                 | 196 |
| Tabelle 6-17: | Zeitaufwand pro Ausgangseinheit aller Kombinationen der Kriterien für Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles                                           | 197 |
| Tabelle 6-18: | Startzeit und Zeitaufwand pro Einlagerung und pro gesamte Ausgangseinheit aller Kombinationen der Kriterien für Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung anderer Shuttles | 197 |
| Tabelle 6-19: | Ausgangsmenge pro Zeiteinheit nur bei der Verwendung des Abstandskriteriums bei individualer Optimierung                                                                        | 199 |
| Tabelle 6-20: | Ausgangsmenge pro Zeiteinheit nur bei der individualer Optimierungsalgorithmen mit der Kombination ohne Abstandskriterien                                                       | 199 |
| Tabelle 6-21: | Ausgangsmenge pro Zeiteinheit nur bei der Verwendung von Big-M-Prinzip und Durchschnitt-Prinzip in individuale Optimierung                                                      | 200 |
| Tabelle 6-22: | Optimale Kombinationen der Kriterien bei individualer Optimierung                                                                                                               | 201 |
| Tabelle 6-23: | Ausgewählte optimale Kombinationen der Kriterien bei individualer Optimierung                                                                                                   | 202 |
| Tabelle 6-24: | Zusammenfassung der experimentellen Daten anhand der Kombination der Kriterien bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                                          | 203 |
| Tabelle 6-25: | Auswirkung der Verwendung des Sequenzkriteriums bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                                                                         | 203 |
| Tabelle 6-26: | Auswirkung der Verwendung des Zeitkriteriums bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                                                                            | 204 |
| Tabelle 6-27: | Ausgewählte optimale Kombinationen der Kriterien bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                                                                        | 205 |
| Tabelle 6-28: | Definition und Beschreibung von Symbolen und Variablen im Auftrag                                                                                                               | 211 |

|               |                                                                                                                                 |      |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabelle A-1:  | Abkürzung von verschiedene Kriterien und verschiedene Optionen bei individuale Optimierung                                      | A-1  |
| Tabelle A-2:  | Index und Beschreibung verschiedener Kombinationen der Kriterien bei individuale Optimierung                                    | A-1  |
| Tabelle A-3:  | Versuchsplan für die langfristige Systemstabilität bei individuale Optimierung                                                  | A-2  |
| Tabelle A-4:  | Versuchsplan für die Systemleistung bei individuale Optimierung                                                                 | A-2  |
| Tabelle A-5:  | Versuchsplan für die Einfluss der Anzahl des Shuttles bei individuale Optimierung                                               | A-2  |
| Tabelle A-6:  | Auswertungskriterien zum Systemstabilität bei individuale Optimierung                                                           | A-3  |
| Tabelle A-7:  | . Auswertungskriterien zum Systemleistung bei individuale Optimierung                                                           | A-3  |
| Tabelle A-8:  | Experimentelle Ergebnisse von Index für langfristige Betriebsfähigkeit des Systems für individuale Optimierung                  | A-4  |
| Tabelle A-9:  | Experimentelle Ergebnisse von Linearität zwischen der Ausgangsmenge des Systems und Zeit für individuale Optimierung            | A-5  |
| Tabelle A-10: | Experimentelle Ergebnisse von Quadratischer Koeffizient der t-n-Kurve für individuale Optimierung                               | A-6  |
| Tabelle A-11: | Experimentelle Ergebnisse von Startzeit des stabilen Ausgangs basierend auf linearer Anpassung für individuale Optimierung      | A-7  |
| Tabelle A-12: | Experimentelle Ergebnisse von Zeitaufwand pro Ausgangseinheit basierend auf linearer Anpassung für individuale Optimierung      | A-8  |
| Tabelle A-13: | Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde für individuale Optimierung                        | A-9  |
| Tabelle A-14: | Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde für individuale Optimierung                       | A-10 |
| Tabelle A-15: | Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung für individuale Optimierung | A-11 |
| Tabelle A-16: | Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde für individuale Optimierung                        | A-12 |
| Tabelle A-17: | Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde für individuale Optimierung                       | A-13 |
| Tabelle A-18: | Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung für individuale Optimierung | A-14 |
| Tabelle B-1:  | Abkürzung von verschiedene Kriterien und verschiedene Optionen bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles          | B-1  |

|               |                                                                                                                                                             |      |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabelle B-2:  | Index und Beschreibung verschiedener Kombinationen der Kriterien bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                                    | B-1  |
| Tabelle B-3:  | Versuchsplan für die langfristige Systemstabilität bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                                                  | B-2  |
| Tabelle B-4:  | Versuchsplan für die Systemleistung bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                                                                 | B-2  |
| Tabelle B-5:  | Versuchsplan für die Einfluss der Anzahl des Shuttles bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                                               | B-2  |
| Tabelle B-6:  | Auswertungskriterien zum Systemstabilität                                                                                                                   | B-3  |
| Tabelle B-7:  | . Auswertungskriterien zum Systemleistung                                                                                                                   | B-3  |
| Tabelle B-8:  | Experimentelle Ergebnisse von Index für langfristige Betriebsfähigkeit des Systems für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                  | B-4  |
| Tabelle B-9:  | Experimentelle Ergebnisse von Linearität zwischen der Ausgangsmenge des Systems und Zeit für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles            | B-5  |
| Tabelle B-10: | Experimentelle Ergebnisse von Quadratischer Koeffizient der t-n-Kurve für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                               | B-6  |
| Tabelle B-11: | Experimentelle Ergebnisse von Quadratischer Koeffizient der n-t-Kurve für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                               | B-7  |
| Tabelle B-12: | Experimentelle Ergebnisse von Startzeit des stabilen Ausgangs basierend auf linearer Anpassung für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles      | B-8  |
| Tabelle B-13: | Experimentelle Ergebnisse von Zeitaufwand pro Ausgangseinheit basierend auf linearer Anpassung für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles      | B-9  |
| Tabelle B-14: | Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                        | B-10 |
| Tabelle B-15: | Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                       | B-11 |
| Tabelle B-16: | Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles | B-12 |
| Tabelle B-17: | Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                        | B-13 |

|               |                                                                                                                                                             |      |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabelle B-18: | Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles                       | B-14 |
| Tabelle B-19: | Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles | B-15 |
| Tabelle C-1:  | Versuchsplan für die Einfluss der Anzahl des Shuttles bei Optimierung durch Auftragsumtausch                                                                | C-1  |
| Tabelle C-2:  | . Auswertungskriterien zum Systemleistung bei Optimierung durch Auftragsumtausch                                                                            | C-1  |
| Tabelle C-3:  | Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde für Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen                               | C-2  |
| Tabelle C-4:  | Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde für Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen                              | C-3  |
| Tabelle C-5:  | Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung für Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen        | C-4  |

# Anhang A Experimentelle Ergebnisse für individuale Optimierung

---

## A.1 Auswertungsmodell, -kriterien und –verfahren

*Tabelle A-1: Abkürzung von verschiedene Kriterien und verschiedene Optionen bei individuale Optimierung*

| Kriterium                | Option   | Abkürzung       | Beschreibung                                                                           |
|--------------------------|----------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Zeit-Kriterium</b>    | -        | Zeit            | Die Erstellungszeit des Auftrags berücksichtigen                                       |
| <b>Abstand-Kriterium</b> | Option 3 | Minim           | Abstand-Kriterium durch die Tabelle „Minimale_Fahrzeit“                                |
| <b>Kriterium</b>         | Option 4 | Route           | Routingbasierter Abstand-Kriterium                                                     |
|                          | Option 2 | Sequ(M)         | Sequenz-Kriterium durch „Big M“-Prinzip ohne Berücksichtigung vergebener Aufträge      |
| <b>Sequenz-Kriterium</b> | Option 3 | Sequ(aver)      | Sequenz-Kriterium durch Durchschnitt-Prinzip ohne Berücksichtigung vergebener Aufträge |
|                          | Option 4 | Sequ(M,alle)    | Sequenz-Kriterium durch „Big M“-Prinzip mit Berücksichtigung vergebener Aufträge       |
|                          | Option 5 | Sequ(aver,alle) | Sequenz-Kriterium durch Durchschnitt-Prinzip mit Berücksichtigung vergebener Aufträge  |

*Tabelle A-2: Index und Beschreibung verschiedener Kombinationen der Kriterien bei individuale Optimierung*

| Individuale Optimierung |                         |     |                            |     |                            |
|-------------------------|-------------------------|-----|----------------------------|-----|----------------------------|
| Nr.                     | Beschreibung            | Nr. | Beschreibung               | Nr. | Beschreibung               |
| 1                       | Zeit(Original Model)    | 11  | Minim+Sequ(aver,alle)+Zeit | 21  | Route+Sequ(aver,alle)+Zeit |
| 2                       | Minim                   | 12  | Route                      | 22  | Sequ(M)                    |
| 3                       | Minim+Zeit              | 13  | Route+Zeit                 | 23  | Sequ(aver)                 |
| 4                       | Minim+Sequ(M)           | 14  | Route+Sequ(M)              | 24  | Sequ(M,alle)               |
| 5                       | Minim+Sequ(aver)        | 15  | Route+Sequ(aver)           | 25  | Sequ(aver,alle)            |
| 6                       | Minim+Sequ(M,alle)      | 16  | Route+Sequ(M,alle)         | 26  | Sequ(M)+Zeit               |
| 7                       | Minim+Sequ(aver,alle)   | 17  | Route+Sequ(aver,alle)      | 27  | Sequ(aver)+Zeit            |
| 8                       | Minim+Sequ(M)+Zeit      | 18  | Route+Sequ(M)+Zeit         | 28  | Sequ(M,alle)+Zeit          |
| 9                       | Minim+Sequ(aver)+Zeit   | 19  | Route+Sequ(aver)+Zeit      | 29  | Sequ(aver,alle)+Zeit       |
| 10                      | Minim+Sequ(M,alle)+Zeit | 20  | Route+Sequ(M,alle)+Zeit    |     |                            |

### A.1.1 Versuchsplan für die langfristige Systemstabilität und für die Systemleistung

Tabelle A-3: Versuchsplan für die langfristige Systemstabilität bei individuale Optimierung

|                     | Umtauschbarkeit              | Wert oder Wertbereich                             |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| Konstante Parameter | <b>Layout</b>                | Layout des originalen Modells                     |
|                     | <b>Anzahl der Versuche</b>   | 1                                                 |
|                     | <b>Simulationszeit</b>       | 86400 Sekunden = 24 Stunden = 1 Tag               |
|                     | <b>Anzahl der Shuttles</b>   | 12                                                |
|                     | <b>Reservierungsform</b>     | Treppe                                            |
| Variable Parameter  | <b>Störungsstrategie</b>     | 0 – Idealbetrieb (keine Störung)                  |
|                     | <b>Auftragssystem</b>        | 5 Auftragssysteme nach der Nummer des Experiments |
|                     | <b>Optimierungsstrategie</b> | individuale Optimierung                           |

Tabelle A-4: Versuchsplan für die Systemleistung bei individuale Optimierung

|                     | Umtauschbarkeit              | Wert oder Wertbereich                             |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| Konstante Parameter | <b>Layout</b>                | Layout des originalen Modells                     |
|                     | <b>Anzahl der Versuche</b>   | 5                                                 |
|                     | <b>Simulationszeit</b>       | 3600 Sekunden = 1 Stunde                          |
|                     | <b>Anzahl der Shuttles</b>   | 12                                                |
|                     | <b>Reservierungsform</b>     | Treppe                                            |
| Variable Parameter  | <b>Störungsstrategie</b>     | 0 – Idealbetrieb (keine Störung)                  |
|                     | <b>Auftragssystem</b>        | 5 Auftragssysteme nach der Nummer des Experiments |
|                     | <b>Optimierungsstrategie</b> | individuale Optimierung                           |

Tabelle A-5: Versuchsplan für die Einfluss der Anzahl des Shuttles bei individuale Optimierung

|                     | Umtauschbarkeit              | Wert oder Wertbereich                             |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| Konstante Parameter | <b>Layout</b>                | Layout des originalen Modells                     |
|                     | <b>Anzahl der Versuche</b>   | 5                                                 |
|                     | <b>Simulationszeit</b>       | 3600 Sekunden = 1 Stunde                          |
|                     | <b>Reservierungsform</b>     | Treppe                                            |
|                     | <b>Störungsstrategie</b>     | 0 – Idealbetrieb (keine Störung)                  |
| Variable Parameter  | <b>Auftragssystem</b>        | 5 Auftragssysteme nach der Nummer des Experiments |
|                     | <b>Anzahl der Shuttles</b>   | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12             |
|                     | <b>Optimierungsstrategie</b> | individuale Optimierung (Minim+Sequ(M)+Zeit)      |

### A.1.2 Auswertungskriterien zum Systemstabilität und -leistung

Tabelle A-6: Auswertungskriterien zum Systemstabilität bei individuale Optimierung

| Symbol       | Beschreibung                                                     | Formel zur Berechnung                                                                     |
|--------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Index_{LB}$ | Index für langfristige Betriebsfähigkeit                         | $Index_{LB} = \frac{Abschlusszeit des letzten Auftrags}{Simulation\_Zeit}$                |
| $Linearität$ | Linearität zwischen der Ausgangsmenge des Systems und Zeit       | $Linearität_{Aus/Ein/Ges} = 1 - \frac{\Delta N_{max\ Aus/Ein/Ges}}{N_{max\ Aus/Ein/Ges}}$ |
| $Startzeit$  | Startzeit des stabilen Ausgangs basierend auf linearer Anpassung | $a_1 \text{ aus } t(n) = a_1 n + a_2$                                                     |
| $\Delta t$   | Zeitaufwand pro Ausgangseinheit basierend auf linearer Anpassung | $a_2 \text{ aus } t(n) = a_1 n + a_2$                                                     |
| $a_2$        | Quadratischer Koeffizient der n-t-Kurve                          | $a_2 \text{ aus } t(n) = a_s n^2 + a_1 n + a_0$                                           |
| $b_2$        | Quadratischer Koeffizient der t-n-Kurve                          | $b_2 \text{ aus } n(t) = b_s t^2 + b_1 t + b_0$                                           |

Tabelle A-7: Auswertungskriterien zum Systemleistung bei individuale Optimierung

| Symbol                            | Beschreibung                                                                          | Formel zur Berechnung                                                                                                                           |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein}$         | Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde                                        | $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein} = \sum_{i=1}^N \dot{n}_{Aus/Ein,i}$                                                                                    |
| $\dot{\bar{n}}_{Ges}$             |                                                                                       | $\dot{\bar{n}}_{Ges} = \dot{\bar{n}}_{Aus} + \dot{\bar{n}}_{Ein}$                                                                               |
| $\sigma_{Aus/Ein}$                | Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde                                       | $\sigma_{Aus/Ein} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\dot{n}_{Aus/Ein,i} - \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein})^2}$                                          |
| $\sigma_{Ges}$                    |                                                                                       | $\sigma_{Ges} = \sqrt{\sigma_{Aus}^2 + \sigma_{Ein}^2}$                                                                                         |
| $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,max}$ | Die geschätzten Minimalwerte der Ausgangsmenge pro Stunde basieren auf dem 6σ-Prinzip | $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,max} = \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges} + 3\sigma_{Aus/Ein/Ges}$                                                         |
| $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,min}$ |                                                                                       | $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,min} = \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges} - 3\sigma_{Aus/Ein/Ges}$                                                         |
| $\Delta n$                        | Der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung                 | $\Delta n = \dot{\bar{n}}_{Ein} - \dot{\bar{n}}_{Aus}$                                                                                          |
| $\dot{\bar{n}}'_{Aus/Ein/Ges}$    | Durchschnittswert und Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde pro Shuttle     | $\dot{\bar{n}}'_{Aus/Ein} = \frac{1}{M} \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein}, \sigma'_{Aus/Ein} = \frac{1}{\sqrt{M}} \sigma_{Aus/Ein}$                       |
| $\sigma'_{Aus/Ein/Ges}$           |                                                                                       | $\dot{\bar{n}}'_{Ges} = \dot{\bar{n}}'_{Aus} + \dot{\bar{n}}'_{Ein}, \sigma'_{Ges} = \frac{1}{\sqrt{M}} \sqrt{\sigma_{Aus}^2 + \sigma_{Ein}^2}$ |

## A.2 Experimentelle Ergebnisse für langfristige Systemstabilität

### A.2.1 Experimentelle Ergebnisse von Index für langfristige Betriebsfähigkeit des Systems

Tabelle A-8: Experimentelle Ergebnisse von Index für langfristige Betriebsfähigkeit des Systems für individuale Optimierung

| Index | Modul                          | $Index_{LB}$ |             |         | Langfristige Betriebsfähigkeit |
|-------|--------------------------------|--------------|-------------|---------|--------------------------------|
|       |                                | Auslagerung  | Einlagerung | Gesamt  |                                |
| 1     | Original Model                 | 99.99%       | 100.00%     | 100.00% | ✓                              |
| 2     | Minim                          | 2.92%        | 3.01%       | 3.01%   | ✗                              |
| 3     | Minim + Zeit                   | 99.98%       | 100.00%     | 100.00% | ✓                              |
| 4     | Minim + Sequ(M)                | 99.98%       | 99.99%      | 99.99%  | ✓                              |
| 5     | Minim + Sequ(aver)             | 99.99%       | 99.99%      | 99.99%  | ✓                              |
| 6     | Minim + Sequ(M,alle)           | 27.57%       | 27.66%      | 27.66%  | ✗                              |
| 7     | Minim + Sequ(aver,alle)        | 27.57%       | 27.66%      | 27.66%  | ✗                              |
| 8     | Minim + Sequ(M) + Zeit         | 99.98%       | 99.99%      | 99.99%  | ✓                              |
| 9     | Minim + Sequ(aver) + Zeit      | 99.99%       | 99.99%      | 99.99%  | ✓                              |
| 10    | Minim + Sequ(M,alle) + Zeit    | 54.17%       | 53.84%      | 54.17%  | ✗                              |
| 11    | Minim + Sequ(aver,alle) + Zeit | 99.99%       | 99.99%      | 99.99%  | ✓                              |
| 12    | Route                          | 2.46%        | 2.58%       | 2.58%   | ✗                              |
| 13    | Route + Zeit                   | 99.99%       | 99.96%      | 99.99%  | ✓                              |
| 14    | Route + Sequ(M)                | 25.56%       | 25.62%      | 25.62%  | ✗                              |
| 15    | Route + Sequ(aver)             | 25.56%       | 25.62%      | 25.62%  | ✗                              |
| 16    | Route + Sequ(M,alle)           | 19.44%       | 19.55%      | 19.55%  | ✗                              |
| 17    | Route + Sequ(aver,alle)        | 19.44%       | 19.55%      | 19.55%  | ✗                              |
| 18    | Route + Sequ(M) + Zeit         | 99.98%       | 100.00%     | 100.00% | ✓                              |
| 19    | Route + Sequ(aver) + Zeit      | 100.00%      | 100.00%     | 100.00% | ✓                              |
| 20    | Route + Sequ(M,alle) + Zeit    | 99.99%       | 99.98%      | 99.99%  | ✓                              |
| 21    | Route + Sequ(aver,alle) + Zeit | 99.98%       | 99.99%      | 99.99%  | ✓                              |
| 22    | Sequ(M)                        | 100.00%      | 99.99%      | 100.00% | ✓                              |
| 23    | Sequ(aver)                     | 100.00%      | 99.99%      | 100.00% | ✓                              |
| 24    | Sequ(M,alle)                   | 100.00%      | 99.97%      | 100.00% | ✓                              |
| 25    | Sequ(aver,alle)                | 99.98%       | 99.99%      | 99.99%  | ✓                              |
| 26    | Sequ(M) + Zeit                 | 100.00%      | 99.99%      | 100.00% | ✓                              |
| 27    | Sequ(aver) + Zeit              | 100.00%      | 99.99%      | 100.00% | ✓                              |
| 28    | Sequ(M,alle) + Zeit            | 100.00%      | 99.97%      | 100.00% | ✓                              |
| 29    | Sequ(aver,alle) + Zeit         | 99.99%       | 99.97%      | 99.99%  | ✓                              |

## A.2.2 Experimentelle Ergebnisse von Linearität zwischen der Ausgangsmenge des Systems und Zeit

**Tabelle A-9:** *Experimentelle Ergebnisse von Linearität zwischen der Ausgangsmenge des Systems und Zeit für individuale Optimierung*

| Index | Modul                          | Linearität  |             |        | Lineare Beziehung |
|-------|--------------------------------|-------------|-------------|--------|-------------------|
|       |                                | Auslagerung | Einlagerung | Gesamt |                   |
| 1     | Original Model                 | 99.76%      | 99.79%      | 88.68% | ✓                 |
| 2     | Minim                          | 72.50%      | 73.46%      | 84.88% | X                 |
| 3     | Minim + Zeit                   | 99.68%      | 99.77%      | 89.27% | ✓                 |
| 4     | Minim + Sequ(M)                | 99.71%      | 99.83%      | 89.61% | ✓                 |
| 5     | Minim + Sequ(aver)             | 99.81%      | 99.74%      | 89.60% | ✓                 |
| 6     | Minim + Sequ(M,alle)           | 86.37%      | 90.35%      | 89.52% | X                 |
| 7     | Minim + Sequ(aver,alle)        | 86.37%      | 90.35%      | 89.52% | X                 |
| 8     | Minim + Sequ(M) + Zeit         | 99.71%      | 99.83%      | 89.61% | ✓                 |
| 9     | Minim + Sequ(aver) + Zeit      | 99.81%      | 99.74%      | 89.60% | ✓                 |
| 10    | Minim + Sequ(M,alle) + Zeit    | 90.09%      | 94.68%      | 78.31% | X                 |
| 11    | Minim + Sequ(aver,alle) + Zeit | 99.80%      | 99.83%      | 89.54% | ✓                 |
| 12    | Route                          | 83.90%      | 73.20%      | 85.56% | X                 |
| 13    | Route + Zeit                   | 99.81%      | 99.86%      | 89.00% | ✓                 |
| 14    | Route + Sequ(M)                | 92.51%      | 95.78%      | 94.20% | X                 |
| 15    | Route + Sequ(aver)             | 92.51%      | 95.78%      | 94.20% | X                 |
| 16    | Route + Sequ(M,alle)           | 87.25%      | 91.39%      | 92.18% | X                 |
| 17    | Route + Sequ(aver,alle)        | 87.25%      | 91.39%      | 92.18% | X                 |
| 18    | Route + Sequ(M) + Zeit         | 99.75%      | 99.84%      | 89.09% | ✓                 |
| 19    | Route + Sequ(aver) + Zeit      | 99.82%      | 99.85%      | 89.19% | ✓                 |
| 20    | Route + Sequ(M,alle) + Zeit    | 99.83%      | 99.88%      | 89.29% | ✓                 |
| 21    | Route + Sequ(aver,alle) + Zeit | 99.59%      | 98.43%      | 90.80% | ✓                 |
| 22    | Sequ(M)                        | 99.80%      | 99.85%      | 88.77% | ✓                 |
| 23    | Sequ(aver)                     | 99.80%      | 99.85%      | 88.77% | ✓                 |
| 24    | Sequ(M,alle)                   | 93.87%      | 97.79%      | 84.69% | X                 |
| 25    | Sequ(aver,alle)                | 99.64%      | 99.80%      | 88.69% | ✓                 |
| 26    | Sequ(M) + Zeit                 | 99.80%      | 99.85%      | 88.77% | ✓                 |
| 27    | Sequ(aver) + Zeit              | 99.80%      | 99.85%      | 88.77% | ✓                 |
| 28    | Sequ(M,alle) + Zeit            | 93.87%      | 97.79%      | 84.69% | X                 |
| 29    | Sequ(aver,alle) + Zeit         | 99.80%      | 99.83%      | 88.91% | ✓                 |

**Tabelle A-10:** *Experimentelle Ergebnisse von Quadratischer Koeffizient der t-n-Kurve für individuale Optimierung*

| Index | Modul                          | $b_2$       |             |           | Lineare Bezie-hung |
|-------|--------------------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|
|       |                                | Auslagerung | Einlagerung | Gesamt    |                    |
| 1     | Original Model                 | -5.02E-09   | -6.87E-09   | -1.19E-08 | ✓                  |
| 2     | Minim                          | -1.20E-05   | -1.22E-05   | -2.43E-05 | X                  |
| 3     | Minim + Zeit                   | -2.75E-09   | -3.28E-09   | -6.04E-09 | ✓                  |
| 4     | Minim + Sequ(M)                | -5.08E-09   | -5.04E-09   | -1.01E-08 | ✓                  |
| 5     | Minim + Sequ(aver)             | -3.37E-09   | -4.31E-09   | -7.68E-09 | ✓                  |
| 6     | Minim + Sequ(M,alle)           | -8.08E-07   | -4.70E-07   | -1.26E-06 | X                  |
| 7     | Minim + Sequ(aver,alle)        | -8.08E-07   | -4.70E-07   | -1.26E-06 | X                  |
| 8     | Minim + Sequ(M) + Zeit         | -5.08E-09   | -5.04E-09   | -1.01E-08 | ✓                  |
| 9     | Minim + Sequ(aver) + Zeit      | -3.37E-09   | -4.31E-09   | -7.68E-09 | ✓                  |
| 10    | Minim + Sequ(M,alle) + Zeit    | -3.37E-07   | -3.02E-07   | -6.35E-07 | X                  |
| 11    | Minim + Sequ(aver,alle) + Zeit | 7.43E-10    | 6.40E-10    | 1.39E-09  | ✓                  |
| 12    | Route                          | -6.75E-06   | -1.19E-05   | -1.86E-05 | X                  |
| 13    | Route + Zeit                   | -1.63E-09   | -1.98E-09   | -3.62E-09 | ✓                  |
| 14    | Route + Sequ(M)                | -6.47E-07   | -4.08E-07   | -1.06E-06 | X                  |
| 15    | Route + Sequ(aver)             | -6.47E-07   | -4.08E-07   | -1.06E-06 | X                  |
| 16    | Route + Sequ(M,alle)           | -1.08E-06   | -8.59E-07   | -1.94E-06 | X                  |
| 17    | Route + Sequ(aver,alle)        | -1.08E-06   | -8.59E-07   | -1.94E-06 | X                  |
| 18    | Route + Sequ(M) + Zeit         | -2.15E-09   | 6.38E-11    | -2.09E-09 | ✓                  |
| 19    | Route + Sequ(aver) + Zeit      | -1.73E-09   | 1.44E-09    | -2.98E-10 | ✓                  |
| 20    | Route + Sequ(M,alle) + Zeit    | -1.44E-09   | 4.65E-10    | -9.72E-10 | ✓                  |
| 21    | Route + Sequ(aver,alle) + Zeit | -6.40E-09   | -6.78E-08   | -7.41E-08 | ✓                  |
| 22    | Sequ(M)                        | -1.17E-09   | -3.21E-09   | -4.38E-09 | ✓                  |
| 23    | Sequ(aver)                     | -1.17E-09   | -3.21E-09   | -4.38E-09 | ✓                  |
| 24    | Sequ(M,alle)                   | -7.07E-08   | -4.13E-08   | -1.14E-07 | X                  |
| 25    | Sequ(aver,alle)                | -3.16E-09   | -2.77E-09   | -5.94E-09 | ✓                  |
| 26    | Sequ(M) + Zeit                 | -1.17E-09   | -3.21E-09   | -4.38E-09 | ✓                  |
| 27    | Sequ(aver) + Zeit              | -1.17E-09   | -3.21E-09   | -4.38E-09 | ✓                  |
| 28    | Sequ(M,alle) + Zeit            | -7.07E-08   | -4.13E-08   | -1.14E-07 | X                  |
| 29    | Sequ(aver,alle) + Zeit         | -1.38E-10   | -1.41E-09   | -1.54E-09 | ✓                  |

### A.2.3 Experimentelle Ergebnisse von Startzeit des stabilen Ausgangs basierend auf linearer Anpassung

Tabelle A-11: Experimentelle Ergebnisse von Startzeit des stabilen Ausgangs basierend auf linearer Anpassung für individuelle Optimierung

| Index | Modul                          | Startzeit   |             |          | Optimaler |
|-------|--------------------------------|-------------|-------------|----------|-----------|
|       |                                | Auslagerung | Einlagerung | Gesamt   |           |
| 1     | Original Model                 | -26.05      | 83.21       | 44.37    | ✓         |
| 2     | Minim                          | -120.92     | -164.35     | -136.72  | ✓         |
| 3     | Minim + Zeit                   | 50.04       | 75.95       | 70.31    | X         |
| 4     | Minim + Sequ(M)                | 108.64      | 86.73       | 100.75   | X         |
| 5     | Minim + Sequ(aver)             | -28.27      | 130.87      | 70.20    | X         |
| 6     | Minim + Sequ(M,alle)           | -1611.21    | -552.28     | -1082.19 | ✓         |
| 7     | Minim + Sequ(aver,alle)        | -1611.21    | -552.28     | -1082.19 | ✓         |
| 8     | Minim + Sequ(M) + Zeit         | 108.64      | 86.73       | 100.75   | X         |
| 9     | Minim + Sequ(aver) + Zeit      | -28.27      | 130.87      | 70.20    | X         |
| 10    | Minim + Sequ(M,alle) + Zeit    | -3961.24    | -2138.57    | -2867.12 | ✓         |
| 11    | Minim + Sequ(aver,alle) + Zeit | 80.40       | 161.82      | 133.37   | X         |
| 12    | Route                          | 10.27       | -91.69      | -39.11   | X         |
| 13    | Route + Zeit                   | 80.13       | 115.76      | 106.32   | X         |
| 14    | Route + Sequ(M)                | -498.54     | -607.50     | -551.06  | ✓         |
| 15    | Route + Sequ(aver)             | -498.54     | -607.50     | -551.06  | ✓         |
| 16    | Route + Sequ(M,alle)           | -1013.94    | -667.58     | -843.21  | ✓         |
| 17    | Route + Sequ(aver,alle)        | -1013.94    | -667.58     | -843.21  | ✓         |
| 18    | Route + Sequ(M) + Zeit         | 56.30       | 162.50      | 124.13   | X         |
| 19    | Route + Sequ(aver) + Zeit      | 17.29       | 130.91      | 89.40    | X         |
| 20    | Route + Sequ(M,alle) + Zeit    | 107.99      | 146.18      | 135.66   | X         |
| 21    | Route + Sequ(aver,alle) + Zeit | -128.64     | -1165.78    | -733.40  | ✓         |
| 22    | Sequ(M)                        | 225.70      | 146.84      | 184.25   | X         |
| 23    | Sequ(aver)                     | 225.70      | 146.84      | 184.25   | X         |
| 24    | Sequ(M,alle)                   | -1050.84    | -344.97     | -659.24  | ✓         |
| 25    | Sequ(aver,alle)                | 58.09       | 131.38      | 106.95   | X         |
| 26    | Sequ(M) + Zeit                 | 225.70      | 146.84      | 184.25   | X         |
| 27    | Sequ(aver) + Zeit              | 225.70      | 146.84      | 184.25   | X         |
| 28    | Sequ(M,alle) + Zeit            | -1050.84    | -344.97     | -659.24  | ✓         |
| 29    | Sequ(aver,alle) + Zeit         | 64.95       | 141.65      | 115.88   | X         |

#### A.2.4 Experimentelle Ergebnisse von Zeitaufwand pro Ausgangseinheit basierend auf linearer Anpassung

Tabelle A-12: Experimentelle Ergebnisse von Zeitaufwand pro Ausgangseinheit basierend auf linearer Anpassung für individuale Optimierung

| Index | Modul                          | Zeitaufwand pro Ausgangseinheit |             |        | Optimaler |
|-------|--------------------------------|---------------------------------|-------------|--------|-----------|
|       |                                | Auslagerung                     | Einlagerung | Gesamt |           |
| 1     | Original Model                 | 27.11                           | 18.46       | 10.98  | ✓         |
| 2     | Minim                          | 26.78                           | 28.80       | 13.90  | X         |
| 3     | Minim + Zeit                   | 24.65                           | 17.15       | 10.12  | ✓         |
| 4     | Minim + Sequ(M)                | 24.32                           | 17.09       | 10.04  | ✓         |
| 5     | Minim + Sequ(aver)             | 24.41                           | 17.07       | 10.05  | ✓         |
| 6     | Minim + Sequ(M,alle)           | 29.61                           | 25.10       | 13.65  | X         |
| 7     | Minim + Sequ(aver,alle)        | 29.61                           | 25.10       | 13.65  | X         |
| 8     | Minim + Sequ(M) + Zeit         | 24.32                           | 17.09       | 10.04  | ✓         |
| 9     | Minim + Sequ(aver) + Zeit      | 24.41                           | 17.07       | 10.05  | ✓         |
| 10    | Minim + Sequ(M,alle) + Zeit    | 38.68                           | 22.24       | 14.16  | X         |
| 11    | Minim + Sequ(aver,alle) + Zeit | 24.77                           | 17.29       | 10.18  | ✓         |
| 12    | Route                          | 22.83                           | 24.87       | 11.99  | X         |
| 13    | Route + Zeit                   | 25.16                           | 17.28       | 10.24  | ✓         |
| 14    | Route + Sequ(M)                | 18.46                           | 21.43       | 9.93   | X         |
| 15    | Route + Sequ(aver)             | 18.46                           | 21.43       | 9.93   | X         |
| 16    | Route + Sequ(M,alle)           | 25.71                           | 23.92       | 12.42  | X         |
| 17    | Route + Sequ(aver,alle)        | 25.71                           | 23.92       | 12.42  | X         |
| 18    | Route + Sequ(M) + Zeit         | 24.92                           | 17.20       | 10.18  | ✓         |
| 19    | Route + Sequ(aver) + Zeit      | 24.92                           | 17.23       | 10.19  | ✓         |
| 20    | Route + Sequ(M,alle) + Zeit    | 25.17                           | 17.47       | 10.31  | ✓         |
| 21    | Route + Sequ(aver,alle) + Zeit | 25.31                           | 18.60       | 10.72  | X         |
| 22    | Sequ(M)                        | 26.74                           | 18.30       | 10.86  | ✓         |
| 23    | Sequ(aver)                     | 26.74                           | 18.30       | 10.86  | ✓         |
| 24    | Sequ(M,alle)                   | 27.94                           | 18.69       | 11.21  | X         |
| 25    | Sequ(aver,alle)                | 26.90                           | 18.40       | 10.93  | ✓         |
| 26    | Sequ(M) + Zeit                 | 26.74                           | 18.30       | 10.86  | ✓         |
| 27    | Sequ(aver) + Zeit              | 26.74                           | 18.30       | 10.86  | ✓         |
| 28    | Sequ(M,alle) + Zeit            | 27.94                           | 18.69       | 11.21  | X         |
| 29    | Sequ(aver,alle) + Zeit         | 26.92                           | 18.45       | 10.95  | ✓         |

## A.3 Experimentelle Ergebnisse für Systemleistung

### A.3.1 Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde

Tabelle A-13: Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde für individuale Optimierung

| Plan Index | Beschreibung               | Einlagerung     | Auslagerung     | Gesamt          | optimaler |
|------------|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|
|            |                            | $\bar{n}_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ |           |
| 1          | Original Model             | 185.20          | 128.40          | 313.60          | -         |
| 2          | Minim                      | 116.40          | 126.20          | 242.60          | false     |
| 3          | Minim+Zeit                 | 199.80          | 141.20          | 341.00          | false     |
| 4          | Minim+Sequ(M)              | 201.00          | 141.60          | 342.60          | true      |
| 5          | Minim+Sequ(aver)           | 202.40          | 143.00          | 345.40          | true      |
| 6          | Minim+Sequ(M,alle)         | 172.00          | 191.40          | 363.40          | false     |
| 7          | Minim+Sequ(aver,alle)      | 172.00          | 191.40          | 363.40          | false     |
| 8          | Minim+Sequ(M)+Zeit         | 201.00          | 141.60          | 342.60          | true      |
| 9          | Minim+Sequ(aver)+Zeit      | 202.40          | 143.00          | 345.40          | true      |
| 10         | Minim+Sequ(M,alle)+Zeit    | 199.00          | 142.80          | 341.80          | true      |
| 11         | Minim+Sequ(aver,alle)+Zeit | 199.20          | 143.00          | 342.20          | true      |
| 12         | Route                      | 87.40           | 92.40           | 179.80          | false     |
| 13         | Route+Zeit                 | 200.60          | 141.60          | 342.20          | true      |
| 14         | Route+Sequ(M)              | 189.00          | 193.20          | 382.20          | false     |
| 15         | Route+Sequ(aver)           | 189.00          | 193.20          | 382.20          | false     |
| 16         | Route+Sequ(M,alle)         | 177.00          | 199.60          | 376.60          | false     |
| 17         | Route+Sequ(aver,alle)      | 178.20          | 201.20          | 379.40          | false     |
| 18         | Route+Sequ(M)+Zeit         | 201.40          | 140.20          | 341.60          | true      |
| 19         | Route+Sequ(aver)+Zeit      | 200.60          | 140.20          | 340.80          | true      |
| 20         | Route+Sequ(M,alle)+Zeit    | 192.80          | 139.20          | 332.00          | false     |
| 21         | Route+Sequ(aver,alle)+Zeit | 193.80          | 140.00          | 333.80          | false     |
| 22         | Sequ(M)                    | 187.20          | 129.20          | 316.40          | false     |
| 23         | Sequ(aver)                 | 187.20          | 129.20          | 316.40          | false     |
| 24         | Sequ(M,alle)               | 186.00          | 130.80          | 316.80          | false     |
| 25         | Sequ(aver,alle)            | 185.40          | 130.40          | 315.80          | false     |
| 26         | Sequ(M)+Zeit               | 187.20          | 129.20          | 316.40          | false     |
| 27         | Sequ(aver)+Zeit            | 187.20          | 129.20          | 316.40          | false     |
| 28         | Sequ(M,alle)+Zeit          | 186.00          | 130.80          | 316.80          | false     |
| 29         | Sequ(aver,alle)+Zeit       | 186.20          | 129.80          | 316.00          | false     |

### A.3.2 Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde

Tabelle A-14: Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde für individuale Optimierung

| Plan Index | Beschreibung               | Einlagerung    | Auslagerung    | Gesamt         | optimaler |
|------------|----------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------|
|            |                            | $\sigma_{Ein}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\sigma_{Ges}$ |           |
| 1          | Original Model             | 1.92           | 2.19           | 2.92           | -         |
| 2          | Minim                      | 29.25          | 34.48          | 45.22          | false     |
| 3          | Minim+Zeit                 | 2.95           | 3.03           | 4.23           | false     |
| 4          | Minim+Sequ(M)              | 2.24           | 1.14           | 2.51           | true      |
| 5          | Minim+Sequ(aver)           | 2.88           | 2.55           | 3.85           | true      |
| 6          | Minim+Sequ(M,alle)         | 15.73          | 25.39          | 29.87          | false     |
| 7          | Minim+Sequ(aver,alle)      | 15.73          | 25.39          | 29.87          | false     |
| 8          | Minim+Sequ(M)+Zeit         | 2.24           | 1.14           | 2.51           | true      |
| 9          | Minim+Sequ(aver)+Zeit      | 2.88           | 2.55           | 3.85           | true      |
| 10         | Minim+Sequ(M,alle)+Zeit    | 1.87           | 1.64           | 2.49           | true      |
| 11         | Minim+Sequ(aver,alle)+Zeit | 1.79           | 1.58           | 2.39           | true      |
| 12         | Route                      | 40.92          | 44.47          | 60.44          | false     |
| 13         | Route+Zeit                 | 1.82           | 1.34           | 2.26           | true      |
| 14         | Route+Sequ(M)              | 9.57           | 17.71          | 20.13          | false     |
| 15         | Route+Sequ(aver)           | 9.57           | 17.71          | 20.13          | false     |
| 16         | Route+Sequ(M,alle)         | 6.67           | 15.66          | 17.02          | false     |
| 17         | Route+Sequ(aver,alle)      | 6.30           | 16.36          | 17.53          | false     |
| 18         | Route+Sequ(M)+Zeit         | 2.30           | 0.84           | 2.45           | true      |
| 19         | Route+Sequ(aver)+Zeit      | 1.82           | 1.10           | 2.12           | true      |
| 20         | Route+Sequ(M,alle)+Zeit    | 9.78           | 1.92           | 9.97           | false     |
| 21         | Route+Sequ(aver,alle)+Zeit | 7.33           | 2.83           | 7.85           | false     |
| 22         | Sequ(M)                    | 0.45           | 1.48           | 1.55           | false     |
| 23         | Sequ(aver)                 | 0.45           | 1.48           | 1.55           | false     |
| 24         | Sequ(M,alle)               | 2.12           | 2.86           | 3.56           | false     |
| 25         | Sequ(aver,alle)            | 1.34           | 2.61           | 2.93           | false     |
| 26         | Sequ(M)+Zeit               | 0.45           | 1.48           | 1.55           | false     |
| 27         | Sequ(aver)+Zeit            | 0.45           | 1.48           | 1.55           | false     |
| 28         | Sequ(M,alle)+Zeit          | 2.12           | 2.86           | 3.56           | false     |
| 29         | Sequ(aver,alle)+Zeit       | 0.84           | 1.92           | 2.10           | false     |

### A.3.3 Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung

Tabelle A-15: Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung für individuale Optimierung

| Plan Index | Beschreibung               | Differenz zwischen Aus- und Einlagerung |                   | optimaler |
|------------|----------------------------|-----------------------------------------|-------------------|-----------|
|            |                            | $\Delta$                                | $\sigma_{\Delta}$ |           |
| 1          | Original Model             | -56.80                                  | 2.92              | -         |
| 2          | Minim                      | 9.80                                    | 45.22             | false     |
| 3          | Minim+Zeit                 | -58.60                                  | 4.23              | false     |
| 4          | Minim+Sequ(M)              | -59.40                                  | 2.51              | true      |
| 5          | Minim+Sequ(aver)           | -59.40                                  | 3.85              | true      |
| 6          | Minim+Sequ(M,alle)         | 19.40                                   | 29.87             | false     |
| 7          | Minim+Sequ(aver,alle)      | 19.40                                   | 29.87             | false     |
| 8          | Minim+Sequ(M)+Zeit         | -59.40                                  | 2.51              | true      |
| 9          | Minim+Sequ(aver)+Zeit      | -59.40                                  | 3.85              | true      |
| 10         | Minim+Sequ(M,alle)+Zeit    | -56.20                                  | 2.49              | true      |
| 11         | Minim+Sequ(aver,alle)+Zeit | -56.20                                  | 2.39              | true      |
| 12         | Route                      | 5.00                                    | 60.44             | false     |
| 13         | Route+Zeit                 | -59.00                                  | 2.26              | true      |
| 14         | Route+Sequ(M)              | 4.20                                    | 20.13             | false     |
| 15         | Route+Sequ(aver)           | 4.20                                    | 20.13             | false     |
| 16         | Route+Sequ(M,alle)         | 22.60                                   | 17.02             | false     |
| 17         | Route+Sequ(aver,alle)      | 23.00                                   | 17.53             | false     |
| 18         | Route+Sequ(M)+Zeit         | -61.20                                  | 2.45              | true      |
| 19         | Route+Sequ(aver)+Zeit      | -60.40                                  | 2.12              | true      |
| 20         | Route+Sequ(M,alle)+Zeit    | -53.60                                  | 9.97              | false     |
| 21         | Route+Sequ(aver,alle)+Zeit | -53.80                                  | 7.85              | false     |
| 22         | Sequ(M)                    | -58.00                                  | 1.55              | false     |
| 23         | Sequ(aver)                 | -58.00                                  | 1.55              | false     |
| 24         | Sequ(M,alle)               | -55.20                                  | 3.56              | false     |
| 25         | Sequ(aver,alle)            | -55.00                                  | 2.93              | false     |
| 26         | Sequ(M)+Zeit               | -58.00                                  | 1.55              | false     |
| 27         | Sequ(aver)+Zeit            | -58.00                                  | 1.55              | false     |
| 28         | Sequ(M,alle)+Zeit          | -55.20                                  | 3.56              | false     |
| 29         | Sequ(aver,alle)+Zeit       | -56.40                                  | 2.10              | false     |

## A.4 Experimentelle Ergebnisse für die Auswirkung der Anzahl der Shuttles

### A.4.1 Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde

Tabelle A-16: *Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde für individuale Optimierung*

| Plan Index | Algorithmus        | Anzahl der Shuttles | Einlagerung     | Auslagerung     | Gesamt          |
|------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|            |                    |                     | $\bar{n}_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ |
| 1          | Original Model     | 1                   | 14.40           | 11.20           | 25.60           |
| 2          | Original Model     | 2                   | 32.40           | 23.60           | 56.00           |
| 3          | Original Model     | 3                   | 50.60           | 35.00           | 85.60           |
| 4          | Original Model     | 4                   | 68.20           | 47.80           | 116.00          |
| 5          | Original Model     | 5                   | 85.20           | 58.80           | 144.00          |
| 6          | Original Model     | 6                   | 102.00          | 70.00           | 172.00          |
| 7          | Original Model     | 7                   | 117.80          | 80.40           | 198.20          |
| 8          | Original Model     | 8                   | 132.20          | 90.60           | 222.80          |
| 9          | Original Model     | 9                   | 145.80          | 100.00          | 245.80          |
| 10         | Original Model     | 10                  | 159.20          | 109.80          | 269.00          |
| 11         | Original Model     | 11                  | 174.40          | 119.40          | 293.80          |
| 12         | Original Model     | 12                  | 185.20          | 128.40          | 313.60          |
| 13         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 1                   | 15.00           | 10.80           | 25.80           |
| 14         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 2                   | 34.20           | 24.00           | 58.20           |
| 15         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 3                   | 52.60           | 37.20           | 89.80           |
| 16         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 4                   | 71.60           | 51.00           | 122.60          |
| 17         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 5                   | 89.20           | 63.80           | 153.00          |
| 18         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 6                   | 107.00          | 76.40           | 183.40          |
| 19         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 7                   | 125.20          | 88.20           | 213.40          |
| 20         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 8                   | 142.00          | 100.40          | 242.40          |
| 21         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 9                   | 157.00          | 111.60          | 268.60          |
| 22         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 10                  | 173.00          | 122.20          | 295.20          |
| 23         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 11                  | 187.00          | 134.00          | 321.00          |
| 24         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 12                  | 201.00          | 141.60          | 342.60          |

#### A.4.2 Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde

Tabelle A-17: Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde für individuale Optimierung

| Plan Index | Algorithmus        | Anzahl der Shuttles | Einlagerung    | Auslagerung    | Gesamt         |
|------------|--------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
|            |                    |                     | $\sigma_{Ein}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\sigma_{Ges}$ |
| 1          | Original Model     | 1                   | 0.55           | 0.45           | 0.71           |
| 2          | Original Model     | 2                   | 0.55           | 0.55           | 0.77           |
| 3          | Original Model     | 3                   | 0.89           | 1.00           | 1.34           |
| 4          | Original Model     | 4                   | 1.10           | 0.45           | 1.18           |
| 5          | Original Model     | 5                   | 1.64           | 1.30           | 2.10           |
| 6          | Original Model     | 6                   | 1.00           | 0.71           | 1.22           |
| 7          | Original Model     | 7                   | 0.45           | 1.52           | 1.58           |
| 8          | Original Model     | 8                   | 2.28           | 0.89           | 2.45           |
| 9          | Original Model     | 9                   | 1.79           | 1.00           | 2.05           |
| 10         | Original Model     | 10                  | 1.10           | 1.10           | 1.55           |
| 11         | Original Model     | 11                  | 3.13           | 0.89           | 3.26           |
| 12         | Original Model     | 12                  | 1.92           | 2.19           | 2.92           |
| 13         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 1                   | 1.22           | 0.45           | 1.30           |
| 14         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 2                   | 1.64           | 0.71           | 1.79           |
| 15         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 3                   | 0.89           | 0.84           | 1.22           |
| 16         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 4                   | 0.89           | 0.00           | 0.89           |
| 17         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 5                   | 0.45           | 0.45           | 0.63           |
| 18         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 6                   | 1.58           | 1.14           | 1.95           |
| 19         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 7                   | 0.84           | 1.30           | 1.55           |
| 20         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 8                   | 1.00           | 1.14           | 1.52           |
| 21         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 9                   | 1.22           | 0.89           | 1.52           |
| 22         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 10                  | 1.22           | 1.10           | 1.64           |
| 23         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 11                  | 1.58           | 2.00           | 2.55           |
| 24         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 12                  | 2.24           | 1.14           | 2.51           |

### A.4.3 Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung

Tabelle A-18: Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung für individuelle Optimierung

| Plan Index | Algorithmus        | Anzahl der Shuttles | Differenz zwischen Aus- und Einlagerung |                 |
|------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------------|-----------------|
|            |                    |                     | $\Delta$                                | $\sigma_\Delta$ |
| 1          | Original Model     | 1                   | -3.20                                   | 0.71            |
| 2          | Original Model     | 2                   | -8.80                                   | 0.77            |
| 3          | Original Model     | 3                   | -15.60                                  | 1.34            |
| 4          | Original Model     | 4                   | -20.40                                  | 1.18            |
| 5          | Original Model     | 5                   | -26.40                                  | 2.10            |
| 6          | Original Model     | 6                   | -32.00                                  | 1.22            |
| 7          | Original Model     | 7                   | -37.40                                  | 1.58            |
| 8          | Original Model     | 8                   | -41.60                                  | 2.45            |
| 9          | Original Model     | 9                   | -45.80                                  | 2.05            |
| 10         | Original Model     | 10                  | -49.40                                  | 1.55            |
| 11         | Original Model     | 11                  | -55.00                                  | 3.26            |
| 12         | Original Model     | 12                  | -56.80                                  | 2.92            |
| 13         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 1                   | -4.20                                   | 1.30            |
| 14         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 2                   | -10.20                                  | 1.79            |
| 15         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 3                   | -15.40                                  | 1.22            |
| 16         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 4                   | -20.60                                  | 0.89            |
| 17         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 5                   | -25.40                                  | 0.63            |
| 18         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 6                   | -30.60                                  | 1.95            |
| 19         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 7                   | -37.00                                  | 1.55            |
| 20         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 8                   | -41.60                                  | 1.52            |
| 21         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 9                   | -45.40                                  | 1.52            |
| 22         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 10                  | -50.80                                  | 1.64            |
| 23         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 11                  | -53.00                                  | 2.55            |
| 24         | Minim+Sequ(M)+Zeit | 12                  | -59.40                                  | 2.51            |

# Anhang B Experimentelle Ergebnisse für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

---

## B.1 Auswertungsmodell, -kriterien und –verfahren

*Tabelle B-1: Abkürzung von verschiedenen Kriterien und verschiedene Optionen bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles*

| Kriterium                | Option   | Abkürzung       | Beschreibung                                                                           |
|--------------------------|----------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Zeit-Kriterium</b>    | -        | Zeit            | Die Erstellungszeit des Auftrags berücksichtigen                                       |
| <b>Abstand-Kriterium</b> | Option 3 | Minim           | Abstand-Kriterium durch die Tabelle „Minimale_Fahrzeit“                                |
| <b>Sequenz-Kriterium</b> | Option 4 | Route           | Routingbasierter Abstand-Kriterium                                                     |
|                          | Option 2 | Sequ(M)         | Sequenz-Kriterium durch „Big M“-Prinzip ohne Berücksichtigung vergebener Aufträge      |
|                          | Option 3 | Sequ(aver)      | Sequenz-Kriterium durch Durchschnitt-Prinzip ohne Berücksichtigung vergebener Aufträge |
|                          | Option 4 | Sequ(M,alle)    | Sequenz-Kriterium durch „Big M“-Prinzip mit Berücksichtigung vergebener Aufträge       |
|                          | Option 5 | Sequ(aver,alle) | Sequenz-Kriterium durch Durchschnitt-Prinzip mit Berücksichtigung vergebener Aufträge  |

*Tabelle B-2: Index und Beschreibung verschiedener Kombinationen der Kriterien bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles*

| Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles |                     |     |                          |
|-----------------------------------------------------|---------------------|-----|--------------------------|
| Nr.                                                 | Beschreibung        | Nr. | Beschreibung             |
| 0                                                   | Original Model      | 10  | Mini+Seq(M,alle)+Zeit    |
| 1                                                   | Zeit                | 11  | Mini+Seq(aver,alle)+Zeit |
| 2                                                   | Mini                | 12  | Seq(M)                   |
| 3                                                   | Mini+Zeit           | 13  | Seq(aver)                |
| 4                                                   | Mini+Seq(M)         | 14  | Seq(M,alle)              |
| 5                                                   | Mini+Seq(aver)      | 15  | Seq(aver,alle)           |
| 6                                                   | Mini+Seq(M,alle)    | 16  | Seq(M)+Zeit              |
| 7                                                   | Mini+Seq(aver,alle) | 17  | Seq(aver)+Zeit           |
| 8                                                   | Mini+Seq(M)+Zeit    | 18  | Seq(M,alle)+Zeit         |
| 9                                                   | Mini+Seq(aver)+Zeit | 19  | Seq(aver,alle)+Zeit      |

### B.1.1 Versuchsplan für die langfristige Systemstabilität und für die Systemleistung

Tabelle B-3: Versuchsplan für die langfristige Systemstabilität bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

|                     | Umtauschbarkeit              | Wert oder Wertbereich                               |
|---------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Konstante Parameter | <b>Layout</b>                | Layout des originalen Modells                       |
|                     | <b>Anzahl der Versuche</b>   | 1                                                   |
|                     | <b>Simulationszeit</b>       | 86400 Sekunden = 24 Stunden = 1 Tag                 |
|                     | <b>Anzahl der Shuttles</b>   | 12                                                  |
|                     | <b>Reservierungsform</b>     | Treppe                                              |
| Variable Parameter  | <b>Störungsstrategie</b>     | 0 – Idealbetrieb (keine Störung)                    |
|                     | <b>Auftragssystem</b>        | 5 Auftragssysteme nach der Nummer des Experiments   |
|                     | <b>Optimierungsstrategie</b> | Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles |

Tabelle B-4: Versuchsplan für die Systemleistung bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

|                     | Umtauschbarkeit              | Wert oder Wertbereich                               |
|---------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Konstante Parameter | <b>Layout</b>                | Layout des originalen Modells                       |
|                     | <b>Anzahl der Versuche</b>   | 5                                                   |
|                     | <b>Simulationszeit</b>       | 3600 Sekunden = 1 Stunde                            |
|                     | <b>Anzahl der Shuttles</b>   | 12                                                  |
|                     | <b>Reservierungsform</b>     | Treppe                                              |
| Variable Parameter  | <b>Störungsstrategie</b>     | 0 – Idealbetrieb (keine Störung)                    |
|                     | <b>Auftragssystem</b>        | 5 Auftragssysteme nach der Nummer des Experiments   |
|                     | <b>Optimierungsstrategie</b> | Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles |

Tabelle B-5: Versuchsplan für die Einfluss der Anzahl des Shuttles bei Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

|                     | Umtauschbarkeit              | Wert oder Wertbereich                                              |
|---------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Konstante Parameter | <b>Layout</b>                | Layout des originalen Modells                                      |
|                     | <b>Anzahl der Versuche</b>   | 5                                                                  |
|                     | <b>Simulationszeit</b>       | 3600 Sekunden = 1 Stunde                                           |
|                     | <b>Reservierungsform</b>     | Treppe                                                             |
|                     | <b>Störungsstrategie</b>     | 0 – Idealbetrieb (keine Störung)                                   |
| Variable Parameter  | <b>Auftragssystem</b>        | 5 Auftragssysteme nach der Nummer des Experiments                  |
|                     | <b>Anzahl der Shuttles</b>   | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12                              |
|                     | <b>Optimierungsstrategie</b> | Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles (Minim + Zeit) |

## B.1.2 Auswertungskriterien zum Systemstabilität und -leistung

Tabelle B-6: Auswertungskriterien zum Systemstabilität

| Symbol       | Beschreibung                                                     | Formel zur Berechnung                                                                     |
|--------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Index_{LB}$ | Index für langfristige Betriebsfähigkeit                         | $Index_{LB} = \frac{Abschlusszeit des letzten Auftrags}{Simulation\_Zeit}$                |
| $Linearität$ | Linearität zwischen der Ausgangsmenge des Systems und Zeit       | $Linearität_{Aus/Ein/Ges} = 1 - \frac{\Delta N_{max\ Aus/Ein/Ges}}{N_{max\ Aus/Ein/Ges}}$ |
| $Startzeit$  | Startzeit des stabilen Ausgangs basierend auf linearer Anpassung | $a_1$ aus $t(n) = a_1 n + a_2$                                                            |
| $\Delta t$   | Zeitaufwand pro Ausgangseinheit basierend auf linearer Anpassung | $a_2$ aus $t(n) = a_1 n + a_2$                                                            |
| $a_2$        | Quadratischer Koeffizient der n-t-Kurve                          | $a_2$ aus $t(n) = a_s n^2 + a_1 n + a_0$                                                  |
| $b_2$        | Quadratischer Koeffizient der t-n-Kurve                          | $b_2$ aus $n(t) = b_s t^2 + b_1 t + b_0$                                                  |

Tabelle B-7: Auswertungskriterien zum Systemleistung

| Symbol                                                                 | Beschreibung                                                                                  | Formel zur Berechnung                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein}$<br>$\dot{\bar{n}}_{Ges}$                     | Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde                                                | $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein} = \sum_{i=1}^N \dot{n}_{Aus/Ein,i}$<br>$\dot{\bar{n}}_{Ges} = \dot{\bar{n}}_{Aus} + \dot{\bar{n}}_{Ein}$                                                                                                                                            |
| $\sigma_{Aus/Ein}$<br>$\sigma_{Ges}$                                   | Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde                                               | $\sigma_{Aus/Ein} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\dot{n}_{Aus/Ein,i} - \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein})^2}$<br>$\sigma_{Ges} = \sqrt{\sigma_{Aus}^2 + \sigma_{Ein}^2}$                                                                                                            |
| $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,max}$<br>$\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,min}$ | Die geschätzten Minimalwerte der Ausgangsmenge pro Stunde basieren auf dem $6\sigma$ -Prinzip | $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,max} = \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges} + 3\sigma_{Aus/Ein/Ges}$<br>$\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,min} = \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges} - 3\sigma_{Aus/Ein/Ges}$                                                                                           |
| $\Delta n$                                                             | Der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung                         | $\Delta \dot{n} = \dot{\bar{n}}_{Ein} - \dot{\bar{n}}_{Aus}$                                                                                                                                                                                                                 |
| $\dot{\bar{n}}'_{Aus/Ein/Ges}$<br>$\sigma'_{Aus/Ein/Ges}$              | Durchschnittswert und Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde pro Shuttle             | $\dot{\bar{n}}'_{Aus/Ein} = \frac{1}{M} \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein}, \sigma'_{Aus/Ein} = \frac{1}{\sqrt{M}} \sigma_{Aus/Ein}$<br>$\dot{\bar{n}}'_{Ges} = \dot{\bar{n}}'_{Aus} + \dot{\bar{n}}'_{Ein}, \sigma'_{Ges} = \frac{1}{\sqrt{M}} \sqrt{\sigma_{Aus}^2 + \sigma_{Ein}^2}$ |

## B.2 Experimentelle Ergebnisse für langfristige Systemstabilität

### B.2.1 Experimentelle Ergebnisse von Index für langfristige Betriebsfähigkeit des Systems

Tabelle B-8: Experimentelle Ergebnisse von Index für langfristige Betriebsfähigkeit des Systems für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

| Index | Modul                        | $Index_{LB}$ |             |         | Langfristige Betriebsfähigkeit |
|-------|------------------------------|--------------|-------------|---------|--------------------------------|
|       |                              | Auslage-     | Einlagerung | Gesamt  |                                |
| 0     | Original Model               | 99.99%       | 100.00%     | 100.00% | ✓                              |
| 1     | Zeit                         | 96.81%       | 100.00%     | 100.00% | ✗                              |
| 2     | Mini                         | 99.99%       | 100.00%     | 100.00% | ✓                              |
| 3     | Mini + Zeit                  | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | ✗                              |
| 4     | Mini + Seq(M)                | 99.99%       | 100.00%     | 100.00% | ✓                              |
| 5     | Mini + Seq(aver)             | 99.99%       | 100.00%     | 100.00% | ✓                              |
| 6     | Mini + Seq(M,alle)           | 99.99%       | 100.00%     | 100.00% | ✓                              |
| 7     | Mini + Seq(aver,alle)        | 99.99%       | 100.00%     | 100.00% | ✓                              |
| 8     | Mini + Seq(M) + Zeit         | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | ✗                              |
| 9     | Mini + Seq(aver) + Zeit      | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | ✗                              |
| 10    | Mini + Seq(M,alle) + Zeit    | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | ✗                              |
| 11    | Mini + Seq(aver,alle) + Zeit | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | ✗                              |
| 12    | Seq(M)                       | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | ✗                              |
| 13    | Seq(aver)                    | 99.99%       | 100.00%     | 100.00% | ✓                              |
| 14    | Seq(M,alle)                  | 99.99%       | 100.00%     | 100.00% | ✓                              |
| 15    | Seq(aver,alle)               | 99.99%       | 100.00%     | 100.00% | ✓                              |
| 16    | Seq(M) + Zeit                | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | ✗                              |
| 17    | Seq(aver) + Zeit             | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | ✗                              |
| 18    | Seq(M,alle) + Zeit           | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | ✗                              |
| 19    | Seq(aver,alle) + Zeit        | 93.41%       | 99.99%      | 99.99%  | ✗                              |

## B.2.2 Experimentelle Ergebnisse von Linearität zwischen der Ausgangsmenge des Systems und Zeit

*Tabelle B-9: Experimentelle Ergebnisse von Linearität zwischen der Ausgangsmenge des Systems und Zeit für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles*

| Index | Modul                        | Linearität  |             |        | Lineare Beziehung |
|-------|------------------------------|-------------|-------------|--------|-------------------|
|       |                              | Auslagerung | Einlagerung | Gesamt |                   |
| 0     | Original Model               | 99.76%      | 99.79%      | 88.68% | ✓                 |
| 1     | Zeit                         | 67.70%      | 99.65%      | 99.71% | X                 |
| 2     | Mini                         | 98.62%      | 98.99%      | 99.57% | ✓                 |
| 3     | Mini + Zeit                  | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                 |
| 4     | Mini + Seq(M)                | 98.62%      | 98.99%      | 99.57% | ✓                 |
| 5     | Mini + Seq(aver)             | 98.62%      | 98.99%      | 99.57% | ✓                 |
| 6     | Mini + Seq(M,alle)           | 98.62%      | 98.99%      | 99.57% | ✓                 |
| 7     | Mini + Seq(aver,alle)        | 98.62%      | 98.99%      | 99.57% | ✓                 |
| 8     | Mini + Seq(M) + Zeit         | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                 |
| 9     | Mini + Seq(aver) + Zeit      | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                 |
| 10    | Mini + Seq(M,alle) + Zeit    | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                 |
| 11    | Mini + Seq(aver,alle) + Zeit | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                 |
| 12    | Seq(M)                       | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                 |
| 13    | Seq(aver)                    | 98.62%      | 98.99%      | 99.57% | ✓                 |
| 14    | Seq(M,alle)                  | 98.62%      | 98.99%      | 99.57% | ✓                 |
| 15    | Seq(aver,alle)               | 98.62%      | 98.99%      | 99.57% | ✓                 |
| 16    | Seq(M) + Zeit                | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                 |
| 17    | Seq(aver) + Zeit             | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                 |
| 18    | Seq(M,alle) + Zeit           | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                 |
| 19    | Seq(aver,alle) + Zeit        | 74.59%      | 99.72%      | 99.77% | X                 |

**Tabelle B-10:** *Experimentelle Ergebnisse von Quadratischer Koeffizient der t-n-Kurve für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles*

| Index | Modul                          | $b_2$       |             |           |
|-------|--------------------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |                                | Auslagerung | Einlagerung | Gesamt    |
| 1     | Original Model                 | -1.38E-08   | -4.60E-09   | -9.72E-09 |
| 2     | Minim                          | -9.25E-09   | 1.64E-08    | 7.20E-09  |
| 3     | Minim + Zeit                   | -9.96E-09   | 7.37E-09    | 4.25E-09  |
| 4     | Minim + Sequ(M)                | -9.25E-09   | 1.64E-08    | 7.20E-09  |
| 5     | Minim + Sequ(aver)             | -9.25E-09   | 1.64E-08    | 7.20E-09  |
| 6     | Minim + Sequ(M,alle)           | -9.25E-09   | 1.64E-08    | 7.20E-09  |
| 7     | Minim + Sequ(aver,alle)        | -9.25E-09   | 1.64E-08    | 7.20E-09  |
| 8     | Minim + Sequ(M) + Zeit         | -9.96E-09   | 7.37E-09    | 4.25E-09  |
| 9     | Minim + Sequ(aver) + Zeit      | -9.96E-09   | 7.37E-09    | 4.25E-09  |
| 10    | Minim + Sequ(M,alle) + Zeit    | -9.96E-09   | 7.37E-09    | 4.25E-09  |
| 11    | Minim + Sequ(aver,alle) + Zeit | -9.96E-09   | 7.37E-09    | 4.25E-09  |
| 12    | Route                          | -9.96E-09   | 7.37E-09    | 4.25E-09  |
| 13    | Route + Zeit                   | -9.25E-09   | 1.64E-08    | 7.20E-09  |
| 14    | Route + Sequ(M)                | -9.25E-09   | 1.64E-08    | 7.20E-09  |
| 15    | Route + Sequ(aver)             | -9.25E-09   | 1.64E-08    | 7.20E-09  |
| 16    | Route + Sequ(M,alle)           | -9.96E-09   | 7.37E-09    | 4.25E-09  |
| 17    | Route + Sequ(aver,alle)        | -9.96E-09   | 7.37E-09    | 4.25E-09  |
| 18    | Route + Sequ(M) + Zeit         | -9.96E-09   | 7.37E-09    | 4.25E-09  |
| 19    | Route + Sequ(aver) + Zeit      | -9.96E-09   | 7.37E-09    | 4.25E-09  |

**Tabelle B-11:** *Experimentelle Ergebnisse von Quadratischer Koeffizient der n-t-Kurve für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles*

| Index | Modul                          | $a_2$       |             |           |
|-------|--------------------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |                                | Auslagerung | Einlagerung | Gesamt    |
| 1     | Original Model                 | 5.11E+01    | 7.67E-06    | 1.59E-05  |
| 2     | Minim                          | 2.58E-04    | -1.16E-04   | -1.17E-05 |
| 3     | Minim + Zeit                   | 2.59E+01    | -1.06E-05   | -5.98E-06 |
| 4     | Minim + Sequ(M)                | 2.58E-04    | -1.16E-04   | -1.17E-05 |
| 5     | Minim + Sequ(aver)             | 2.58E-04    | -1.16E-04   | -1.17E-05 |
| 6     | Minim + Sequ(M,alle)           | 2.58E-04    | -1.16E-04   | -1.17E-05 |
| 7     | Minim + Sequ(aver,alle)        | 2.58E-04    | -1.16E-04   | -1.17E-05 |
| 8     | Minim + Sequ(M) + Zeit         | 2.59E+01    | -1.06E-05   | -5.98E-06 |
| 9     | Minim + Sequ(aver) + Zeit      | 2.59E+01    | -1.06E-05   | -5.98E-06 |
| 10    | Minim + Sequ(M,alle) + Zeit    | 2.59E+01    | -1.06E-05   | -5.98E-06 |
| 11    | Minim + Sequ(aver,alle) + Zeit | 2.59E+01    | -1.06E-05   | -5.98E-06 |
| 12    | Route                          | 2.59E+01    | -1.06E-05   | -5.98E-06 |
| 13    | Route + Zeit                   | 2.58E-04    | -1.16E-04   | -1.17E-05 |
| 14    | Route + Sequ(M)                | 2.58E-04    | -1.16E-04   | -1.17E-05 |
| 15    | Route + Sequ(aver)             | 2.58E-04    | -1.16E-04   | -1.17E-05 |
| 16    | Route + Sequ(M,alle)           | 2.59E+01    | -1.06E-05   | -5.98E-06 |
| 17    | Route + Sequ(aver,alle)        | 2.59E+01    | -1.06E-05   | -5.98E-06 |
| 18    | Route + Sequ(M) + Zeit         | 2.59E+01    | -1.06E-05   | -5.98E-06 |
| 19    | Route + Sequ(aver) + Zeit      | 2.59E+01    | -1.06E-05   | -5.98E-06 |

### B.2.3 Experimentelle Ergebnisse von Startzeit des stabilen Ausgangs basierend auf linearer Anpassung

Tabelle B-12: Experimentelle Ergebnisse von Startzeit des stabilen Ausgangs basierend auf linearer Anpassung für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

| Index | Modul                        | Startzeit   |             |        | Optimaler |
|-------|------------------------------|-------------|-------------|--------|-----------|
|       |                              | Auslagerung | Einlagerung | Gesamt |           |
| 0     | Original Model               | -26.05      | 83.21       | 44.37  | ✓         |
| 1     | Zeit                         | -16851.98   | 407.12      | 35.95  | X         |
| 2     | Mini                         | -411.61     | 897.49      | 382.99 | X         |
| 3     | Mini + Zeit                  | -18822.47   | 329.57      | 3.53   | X         |
| 4     | Mini + Seq(M)                | -411.61     | 897.49      | 382.99 | X         |
| 5     | Mini + Seq(aver)             | -411.61     | 897.49      | 382.99 | X         |
| 6     | Mini + Seq(M,alle)           | -411.61     | 897.49      | 382.99 | X         |
| 7     | Mini + Seq(aver,alle)        | -411.61     | 897.49      | 382.99 | X         |
| 8     | Mini + Seq(M) + Zeit         | -18822.47   | 329.57      | 3.53   | X         |
| 9     | Mini + Seq(aver) + Zeit      | -18822.47   | 329.57      | 3.53   | X         |
| 10    | Mini + Seq(M,alle) + Zeit    | -18822.47   | 329.57      | 3.53   | X         |
| 11    | Mini + Seq(aver,alle) + Zeit | -18822.47   | 329.57      | 3.53   | X         |
| 12    | Seq(M)                       | -18822.47   | 329.57      | 3.53   | X         |
| 13    | Seq(aver)                    | -411.61     | 897.49      | 382.99 | X         |
| 14    | Seq(M,alle)                  | -411.61     | 897.49      | 382.99 | X         |
| 15    | Seq(aver,alle)               | -411.61     | 897.49      | 382.99 | X         |
| 16    | Seq(M) + Zeit                | -18822.47   | 329.57      | 3.53   | X         |
| 17    | Seq(aver) + Zeit             | -18822.47   | 329.57      | 3.53   | X         |
| 18    | Seq(M,alle) + Zeit           | -18822.47   | 329.57      | 3.53   | X         |
| 19    | Seq(aver,alle) + Zeit        | -18822.47   | 329.57      | 3.53   | X         |

## B.2.4 Experimentelle Ergebnisse von Zeitaufwand pro Ausgangseinheit basierend auf linearer Anpassung

*Tabelle B-13: Experimentelle Ergebnisse von Zeitaufwand pro Ausgangseinheit basierend auf linearer Anpassung für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles*

| Index | Modul                        | Zeitaufwand pro Ausgangseinheit |             |        | Optimaler |
|-------|------------------------------|---------------------------------|-------------|--------|-----------|
|       |                              | Auslagerung                     | Einlagerung | Gesamt |           |
| 0     | Original Model               | 27.11                           | 18.46       | 10.98  | ✓         |
| 1     | Zeit                         | 1174.34                         | 11.83       | 11.78  | ✓         |
| 2     | Mini                         | 30.34                           | 19.16       | 11.75  | X         |
| 3     | Mini + Zeit                  | 1184.14                         | 11.28       | 11.21  | ✓         |
| 4     | Mini + Seq(M)                | 30.34                           | 19.16       | 11.75  | X         |
| 5     | Mini + Seq(aver)             | 30.34                           | 19.16       | 11.75  | X         |
| 6     | Mini + Seq(M,alle)           | 30.34                           | 19.16       | 11.75  | X         |
| 7     | Mini + Seq(aver,alle)        | 30.34                           | 19.16       | 11.75  | X         |
| 8     | Mini + Seq(M) + Zeit         | 1184.14                         | 11.28       | 11.21  | ✓         |
| 9     | Mini + Seq(aver) + Zeit      | 1184.14                         | 11.28       | 11.21  | ✓         |
| 10    | Mini + Seq(M,alle) + Zeit    | 1184.14                         | 11.28       | 11.21  | ✓         |
| 11    | Mini + Seq(aver,alle) + Zeit | 1184.14                         | 11.28       | 11.21  | ✓         |
| 12    | Seq(M)                       | 1184.14                         | 11.28       | 11.21  | ✓         |
| 13    | Seq(aver)                    | 30.34                           | 19.16       | 11.75  | X         |
| 14    | Seq(M,alle)                  | 30.34                           | 19.16       | 11.75  | X         |
| 15    | Seq(aver,alle)               | 30.34                           | 19.16       | 11.75  | X         |
| 16    | Seq(M) + Zeit                | 1184.14                         | 11.28       | 11.21  | ✓         |
| 17    | Seq(aver) + Zeit             | 1184.14                         | 11.28       | 11.21  | ✓         |
| 18    | Seq(M,alle) + Zeit           | 1184.14                         | 11.28       | 11.21  | ✓         |
| 19    | Seq(aver,alle) + Zeit        | 1184.14                         | 11.28       | 11.21  | ✓         |

## B.3 Experimentelle Ergebnisse für Systemleistung

### B.3.1 Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde

Tabelle B-14: Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

| Plan Index | Beschreibung                 | Einlagerung     | Auslagerung     | Gesamt          |
|------------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|            |                              | $\bar{n}_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ |
| 0          | Original Model               | 185.20          | 128.40          | 313.60          |
| 1          | Zeit                         | 272.60          | 126.20          | 242.60          |
| 2          | Mini                         | 177.20          | 141.20          | 341.00          |
| 3          | Mini + Zeit                  | 285.00          | 141.60          | 342.60          |
| 4          | Mini + Seq(M)                | 177.20          | 143.00          | 345.40          |
| 5          | Mini + Seq(aver)             | 177.20          | 191.40          | 363.40          |
| 6          | Mini + Seq(M,alle)           | 177.20          | 191.40          | 363.40          |
| 7          | Mini + Seq(aver,alle)        | 177.20          | 141.60          | 342.60          |
| 8          | Mini + Seq(M) + Zeit         | 285.00          | 143.00          | 345.40          |
| 9          | Mini + Seq(aver) + Zeit      | 285.00          | 142.80          | 341.80          |
| 10         | Mini + Seq(M,alle) + Zeit    | 285.00          | 143.00          | 342.20          |
| 11         | Mini + Seq(aver,alle) + Zeit | 285.00          | 92.40           | 179.80          |
| 12         | Seq(M)                       | 285.00          | 141.60          | 342.20          |
| 13         | Seq(aver)                    | 177.20          | 193.20          | 382.20          |
| 14         | Seq(M,alle)                  | 177.20          | 193.20          | 382.20          |
| 15         | Seq(aver,alle)               | 177.20          | 199.60          | 376.60          |
| 16         | Seq(M) + Zeit                | 285.00          | 201.20          | 379.40          |
| 17         | Seq(aver) + Zeit             | 285.00          | 140.20          | 341.60          |
| 18         | Seq(M,alle) + Zeit           | 285.00          | 140.20          | 340.80          |
| 19         | Seq(aver,alle) + Zeit        | 285.00          | 139.20          | 332.00          |

### B.3.2 Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde

*Tabelle B-15: Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles*

| Plan Index | Beschreibung                 | Einlagerung    | Auslagerung    | Gesamt         |
|------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|            |                              | $\sigma_{Ein}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\sigma_{Ges}$ |
| 0          | Original Model               | 2.19           | 0.89           | 2.37           |
| 1          | Zeit                         | 11.63          | 5.10           | 12.70          |
| 2          | Mini                         | 3.54           | 1.30           | 3.77           |
| 3          | Mini + Zeit                  | 11.63          | 5.10           | 12.70          |
| 4          | Mini + Seq(M)                | 11.63          | 5.10           | 12.70          |
| 5          | Mini + Seq(aver)             | 11.63          | 5.10           | 12.70          |
| 6          | Mini + Seq(M,alle)           | 11.63          | 5.10           | 12.70          |
| 7          | Mini + Seq(aver,alle)        | 3.54           | 1.30           | 3.77           |
| 8          | Mini + Seq(M) + Zeit         | 3.54           | 1.30           | 3.77           |
| 9          | Mini + Seq(aver) + Zeit      | 3.54           | 1.30           | 3.77           |
| 10         | Mini + Seq(M,alle) + Zeit    | 3.54           | 1.30           | 3.77           |
| 11         | Mini + Seq(aver,alle) + Zeit | 3.54           | 1.30           | 3.77           |
| 12         | Seq(M)                       | 11.63          | 5.10           | 12.70          |
| 13         | Seq(aver)                    | 11.63          | 5.10           | 12.70          |
| 14         | Seq(M,alle)                  | 11.63          | 5.10           | 12.70          |
| 15         | Seq(aver,alle)               | 3.54           | 1.30           | 3.77           |
| 16         | Seq(M) + Zeit                | 3.54           | 1.30           | 3.77           |
| 17         | Seq(aver) + Zeit             | 3.54           | 1.30           | 3.77           |
| 18         | Seq(M,alle) + Zeit           | 3.54           | 1.30           | 3.77           |
| 19         | Seq(aver,alle) + Zeit        | 2.19           | 0.89           | 2.37           |

### B.3.3 Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung

Tabelle B-16: Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

| Plan<br>Index | Beschreibung                 | Differenz zwischen Aus- und Einlagerung |                   |
|---------------|------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|
|               |                              | $\Delta$                                | $\sigma_{\Delta}$ |
| 0             | Original Model               | -56.80                                  | 2.92              |
| 1             | Zeit                         | -247.20                                 | 2.37              |
| 2             | Mini                         | -63.20                                  | 12.70             |
| 3             | Mini + Zeit                  | -258.80                                 | 3.77              |
| 4             | Mini + Seq(M)                | -63.20                                  | 12.70             |
| 5             | Mini + Seq(aver)             | -63.20                                  | 12.70             |
| 6             | Mini + Seq(M,alle)           | -63.20                                  | 12.70             |
| 7             | Mini + Seq(aver,alle)        | -63.20                                  | 12.70             |
| 8             | Mini + Seq(M) + Zeit         | -258.80                                 | 3.77              |
| 9             | Mini + Seq(aver) + Zeit      | -258.80                                 | 3.77              |
| 10            | Mini + Seq(M,alle) + Zeit    | -258.80                                 | 3.77              |
| 11            | Mini + Seq(aver,alle) + Zeit | -258.80                                 | 3.77              |
| 12            | Seq(M)                       | -258.80                                 | 3.77              |
| 13            | Seq(aver)                    | -63.20                                  | 12.70             |
| 14            | Seq(M,alle)                  | -63.20                                  | 12.70             |
| 15            | Seq(aver,alle)               | -63.20                                  | 12.70             |
| 16            | Seq(M) + Zeit                | -258.80                                 | 3.77              |
| 17            | Seq(aver) + Zeit             | -258.80                                 | 3.77              |
| 18            | Seq(M,alle) + Zeit           | -258.80                                 | 3.77              |
| 19            | Seq(aver,alle) + Zeit        | -258.80                                 | 3.77              |

## B.4 Experimentelle Ergebnisse für die Auswirkung der Anzahl der Shuttles

### B.4.1 Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde

**Tabelle B-17:** *Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles*

| Plan Index | Algorithmus    | Anzahl der Shuttles | Einlagerung     | Auslagerung     | Gesamt          |
|------------|----------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|            |                |                     | $\bar{n}_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ |
| 1          | Original Model | 1                   | 14.40           | 11.20           | 25.60           |
| 2          | Original Model | 2                   | 32.40           | 23.60           | 56.00           |
| 3          | Original Model | 3                   | 50.60           | 35.00           | 85.60           |
| 4          | Original Model | 4                   | 68.20           | 47.80           | 116.00          |
| 5          | Original Model | 5                   | 85.20           | 58.80           | 144.00          |
| 6          | Original Model | 6                   | 102.00          | 70.00           | 172.00          |
| 7          | Original Model | 7                   | 117.80          | 80.40           | 198.20          |
| 8          | Original Model | 8                   | 132.20          | 90.60           | 222.80          |
| 9          | Original Model | 9                   | 145.80          | 100.00          | 245.80          |
| 10         | Original Model | 10                  | 159.20          | 109.80          | 269.00          |
| 11         | Original Model | 11                  | 174.40          | 119.40          | 293.80          |
| 12         | Original Model | 12                  | 185.20          | 128.40          | 313.60          |
| 13         | Minim+Zeit     | 1                   | 6.20            | 1.20            | 7.40            |
| 14         | Minim+Zeit     | 2                   | 46.40           | 12.00           | 58.40           |
| 15         | Minim+Zeit     | 3                   | 75.00           | 15.00           | 90.00           |
| 16         | Minim+Zeit     | 4                   | 104.20          | 17.40           | 121.60          |
| 17         | Minim+Zeit     | 5                   | 129.80          | 19.20           | 149.00          |
| 18         | Minim+Zeit     | 6                   | 156.20          | 21.00           | 177.20          |
| 19         | Minim+Zeit     | 7                   | 182.60          | 21.20           | 203.80          |
| 20         | Minim+Zeit     | 8                   | 206.80          | 22.60           | 229.40          |
| 21         | Minim+Zeit     | 9                   | 228.60          | 24.00           | 252.60          |
| 22         | Minim+Zeit     | 10                  | 252.40          | 24.80           | 277.20          |
| 23         | Minim+Zeit     | 11                  | 271.20          | 24.60           | 295.80          |
| 24         | Minim+Zeit     | 12                  | 285.00          | 26.20           | 311.20          |

### B.4.2 Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde

Tabelle B-18: Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

| Plan Index | Algorithmus    | Anzahl der Shuttles | Einlagerung    | Auslagerung    | Gesamt         |
|------------|----------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
|            |                |                     | $\sigma_{Ein}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\sigma_{Ges}$ |
| 1          | Original Model | 1                   | 0.55           | 0.45           | 0.71           |
| 2          | Original Model | 2                   | 0.55           | 0.55           | 0.77           |
| 3          | Original Model | 3                   | 0.89           | 1.00           | 1.34           |
| 4          | Original Model | 4                   | 1.10           | 0.45           | 1.18           |
| 5          | Original Model | 5                   | 1.64           | 1.30           | 2.10           |
| 6          | Original Model | 6                   | 1.00           | 0.71           | 1.22           |
| 7          | Original Model | 7                   | 0.45           | 1.52           | 1.58           |
| 8          | Original Model | 8                   | 2.28           | 0.89           | 2.45           |
| 9          | Original Model | 9                   | 1.79           | 1.00           | 2.05           |
| 10         | Original Model | 10                  | 1.10           | 1.10           | 1.55           |
| 11         | Original Model | 11                  | 3.13           | 0.89           | 3.26           |
| 12         | Original Model | 12                  | 1.92           | 2.19           | 2.92           |
| 13         | Minim+Zeit     | 1                   | 8.32           | 2.68           | 8.74           |
| 14         | Minim+Zeit     | 2                   | 1.14           | 0.00           | 1.14           |
| 15         | Minim+Zeit     | 3                   | 1.41           | 0.71           | 1.58           |
| 16         | Minim+Zeit     | 4                   | 1.79           | 0.55           | 1.87           |
| 17         | Minim+Zeit     | 5                   | 0.84           | 0.45           | 0.95           |
| 18         | Minim+Zeit     | 6                   | 4.71           | 0.00           | 4.71           |
| 19         | Minim+Zeit     | 7                   | 3.51           | 0.45           | 3.54           |
| 20         | Minim+Zeit     | 8                   | 3.03           | 0.55           | 3.08           |
| 21         | Minim+Zeit     | 9                   | 0.89           | 1.00           | 1.34           |
| 22         | Minim+Zeit     | 10                  | 2.88           | 1.30           | 3.16           |
| 23         | Minim+Zeit     | 11                  | 2.95           | 0.55           | 3.00           |
| 24         | Minim+Zeit     | 12                  | 3.54           | 1.30           | 3.77           |

### B.4.3 Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung

Tabelle B-19: Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung für Optimierung unter Berücksichtigung anderer Shuttles

| Plan Index | Algorithmus    | Anzahl der Shuttles | Differenz zwischen Aus- und Einlagerung $\Delta$ | $\sigma_\Delta$ |
|------------|----------------|---------------------|--------------------------------------------------|-----------------|
| 1          | Original Model | 1                   | -3.20                                            | 0.71            |
| 2          | Original Model | 2                   | -8.80                                            | 0.77            |
| 3          | Original Model | 3                   | -15.60                                           | 1.34            |
| 4          | Original Model | 4                   | -20.40                                           | 1.18            |
| 5          | Original Model | 5                   | -26.40                                           | 2.10            |
| 6          | Original Model | 6                   | -32.00                                           | 1.22            |
| 7          | Original Model | 7                   | -37.40                                           | 1.58            |
| 8          | Original Model | 8                   | -41.60                                           | 2.45            |
| 9          | Original Model | 9                   | -45.80                                           | 2.05            |
| 10         | Original Model | 10                  | -49.40                                           | 1.55            |
| 11         | Original Model | 11                  | -55.00                                           | 3.26            |
| 12         | Original Model | 12                  | -56.80                                           | 2.92            |
| 13         | Minim+Zeit     | 1                   | -5.00                                            | 8.74            |
| 14         | Minim+Zeit     | 2                   | -34.40                                           | 1.14            |
| 15         | Minim+Zeit     | 3                   | -60.00                                           | 1.58            |
| 16         | Minim+Zeit     | 4                   | -86.80                                           | 1.87            |
| 17         | Minim+Zeit     | 5                   | -110.60                                          | 0.95            |
| 18         | Minim+Zeit     | 6                   | -135.20                                          | 4.71            |
| 19         | Minim+Zeit     | 7                   | -161.40                                          | 3.54            |
| 20         | Minim+Zeit     | 8                   | -184.20                                          | 3.08            |
| 21         | Minim+Zeit     | 9                   | -204.60                                          | 1.34            |
| 22         | Minim+Zeit     | 10                  | -227.60                                          | 3.16            |
| 23         | Minim+Zeit     | 11                  | -246.60                                          | 3.00            |
| 24         | Minim+Zeit     | 12                  | -258.80                                          | 3.77            |



# Anhang C Experimentelle Ergebnisse für Optimierung durch Auftragsumtausch

## C.1 Auswertungsmodell, -kriterien und –verfahren

### C.1.1 Versuchsplan für die Systemleistung

Tabelle C-1: Versuchsplan für die Einfluss der Anzahl des Shuttles bei Optimierung durch Auftragsumtausch

|                     | Umtauschbarkeit              | Wert oder Wertbereich                             |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| Konstante Parameter | <b>Layout</b>                | Layout des originalen Modells                     |
|                     | <b>Anzahl der Versuche</b>   | 5                                                 |
|                     | <b>Simulationszeit</b>       | 3600 Sekunden = 1 Stunde                          |
|                     | <b>Reservierungsform</b>     | Treppe                                            |
|                     | <b>Störungsstrategie</b>     | 0 – Idealbetrieb (keine Störung)                  |
| Variable Parameter  | <b>Auftragssystem</b>        | 5 Auftragssysteme nach der Nummer des Experiments |
|                     | <b>Anzahl der Shuttles</b>   | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12             |
|                     | <b>Optimierungsstrategie</b> | Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen      |

### C.1.2 Auswertungskriterien zum Systemleistung

Tabelle C-2: Auswertungskriterien zum Systemleistung bei Optimierung durch Auftragsumtausch

| Symbol                          | Beschreibung                                                                          | Formel zur Berechnung                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein}$       | Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde                                        | $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein} = \sum_{i=1}^N \dot{n}_{Aus/Ein,i}$                                                                                                                                                                                                                 |
| $\dot{\bar{n}}_{Ges}$           |                                                                                       | $\dot{\bar{n}}_{Ges} = \dot{\bar{n}}_{Aus} + \dot{\bar{n}}_{Ein}$                                                                                                                                                                                                            |
| $\sigma_{Aus/Ein}$              | Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde                                       | $\sigma_{Aus/Ein} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\dot{n}_{Aus/Ein,i} - \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein})^2}$                                                                                                                                                                       |
| $\sigma_{Ges}$                  |                                                                                       | $\sigma_{Ges} = \sqrt{\sigma_{Aus}^2 + \sigma_{Ein}^2}$                                                                                                                                                                                                                      |
| $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,x}$ | Die geschätzten Minimalwerte der Ausgangsmenge pro Stunde basieren auf dem 6σ-Prinzip | $\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,max} = \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges} + 3\sigma_{Aus/Ein/Ges}$<br>$\dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges,min} = \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein/Ges} - 3\sigma_{Aus/Ein/Ges}$                                                                                           |
| $\Delta n$                      | Der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung                 | $\Delta n = \dot{\bar{n}}_{Ein} - \dot{\bar{n}}_{Aus}$                                                                                                                                                                                                                       |
| $\dot{\bar{n}}'_{Aus/Ein/Ges}$  | Durchschnittswert und Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde pro Shuttle     | $\dot{\bar{n}}'_{Aus/Ein} = \frac{1}{M} \dot{\bar{n}}_{Aus/Ein}, \sigma'_{Aus/Ein} = \frac{1}{\sqrt{M}} \sigma_{Aus/Ein}$<br>$\dot{\bar{n}}'_{Ges} = \dot{\bar{n}}'_{Aus} + \dot{\bar{n}}'_{Ein}, \sigma'_{Ges} = \frac{1}{\sqrt{M}} \sqrt{\sigma_{Aus}^2 + \sigma_{Ein}^2}$ |

## C.2 Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde

Tabelle C-3: *Experimentelle Ergebnisse von Durchschnittswert der Ausgangsmenge pro Stunde für Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen*

| Plan Index | Algorithmus    | Anzahl der Shuttles | Einlagerung     | Auslagerung     | Gesamt          |
|------------|----------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|            |                |                     | $\bar{n}_{Ein}$ | $\bar{n}_{Aus}$ | $\bar{n}_{Ges}$ |
| 1          | Original Model | 1                   | 14.40           | 11.20           | 25.60           |
| 2          | Original Model | 2                   | 32.40           | 23.60           | 56.00           |
| 3          | Original Model | 3                   | 50.60           | 35.00           | 85.60           |
| 4          | Original Model | 4                   | 68.20           | 47.80           | 116.00          |
| 5          | Original Model | 5                   | 85.20           | 58.80           | 144.00          |
| 6          | Original Model | 6                   | 102.00          | 70.00           | 172.00          |
| 7          | Original Model | 7                   | 117.80          | 80.40           | 198.20          |
| 8          | Original Model | 8                   | 132.20          | 90.60           | 222.80          |
| 9          | Original Model | 9                   | 145.80          | 100.00          | 245.80          |
| 10         | Original Model | 10                  | 159.20          | 109.80          | 269.00          |
| 11         | Original Model | 11                  | 174.40          | 119.40          | 293.80          |
| 12         | Original Model | 12                  | 185.20          | 128.40          | 313.60          |
| 13         | Minim          | 1                   | 14.40           | 11.20           | 25.60           |
| 14         | Minim          | 2                   | 32.20           | 23.00           | 55.20           |
| 15         | Minim          | 3                   | 50.80           | 35.20           | 86.00           |
| 16         | Minim          | 4                   | 68.60           | 47.60           | 116.20          |
| 17         | Minim          | 5                   | 85.00           | 57.67           | 142.67          |
| 18         | Minim          | 6                   | 100.80          | 68.80           | 169.60          |
| 19         | Minim          | 7                   | 117.33          | 79.33           | 196.67          |
| 20         | Minim          | 8                   | 130.00          | 90.00           | 220.00          |
| 21         | Minim          | 9                   | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
| 22         | Minim          | 10                  | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
| 23         | Minim          | 11                  | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
| 24         | Minim          | 12                  | 0.00            | 0.00            | 0.00            |

### C.3 Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde

**Tabelle C-4:** Experimentelle Ergebnisse von Standardabweichung der Ausgangsmenge pro Stunde für Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen

| Plan Index | Algorithmus    | Anzahl der Shuttles | Einlagerung    | Auslagerung    | Gesamt         |
|------------|----------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
|            |                |                     | $\sigma_{Ein}$ | $\sigma_{Aus}$ | $\sigma_{Ges}$ |
| 1          | Original Model | 1                   | 0.55           | 0.45           | 0.71           |
| 2          | Original Model | 2                   | 0.55           | 0.55           | 0.77           |
| 3          | Original Model | 3                   | 0.89           | 1.00           | 1.34           |
| 4          | Original Model | 4                   | 1.10           | 0.45           | 1.18           |
| 5          | Original Model | 5                   | 1.64           | 1.30           | 2.10           |
| 6          | Original Model | 6                   | 1.00           | 0.71           | 1.22           |
| 7          | Original Model | 7                   | 0.45           | 1.52           | 1.58           |
| 8          | Original Model | 8                   | 2.28           | 0.89           | 2.45           |
| 9          | Original Model | 9                   | 1.79           | 1.00           | 2.05           |
| 10         | Original Model | 10                  | 1.10           | 1.10           | 1.55           |
| 11         | Original Model | 11                  | 3.13           | 0.89           | 3.26           |
| 12         | Original Model | 12                  | 1.92           | 2.19           | 2.92           |
| 13         | Minim          | 1                   | 0.55           | 0.45           | 0.71           |
| 14         | Minim          | 2                   | 0.45           | 0.71           | 0.84           |
| 15         | Minim          | 3                   | 0.84           | 0.84           | 1.18           |
| 16         | Minim          | 4                   | 2.07           | 0.55           | 2.14           |
| 17         | Minim          | 5                   | 1.00           | 0.58           | 1.15           |
| 18         | Minim          | 6                   | 3.27           | 0.84           | 3.38           |
| 19         | Minim          | 7                   | 0.58           | 1.15           | 1.29           |
| 20         | Minim          | 8                   | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 21         | Minim          | 9                   | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 22         | Minim          | 10                  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 23         | Minim          | 11                  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 24         | Minim          | 12                  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |

## C.4 Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung

Tabelle C-5: *Experimentelle Ergebnisse von der Differenz zwischen die Anzahl der Auslagerung und der Einlagerung für Optimierung durch den Umtausch von Aufträgen*

| Plan Index | Algorithmus    | Anzahl der Shuttles | Differenz zwischen Aus- und Einlagerung | $\sigma_\Delta$ |
|------------|----------------|---------------------|-----------------------------------------|-----------------|
| 1          | Original Model | 1                   | -3.20                                   | 0.71            |
| 2          | Original Model | 2                   | -8.80                                   | 0.77            |
| 3          | Original Model | 3                   | -15.60                                  | 1.34            |
| 4          | Original Model | 4                   | -20.40                                  | 1.18            |
| 5          | Original Model | 5                   | -26.40                                  | 2.10            |
| 6          | Original Model | 6                   | -32.00                                  | 1.22            |
| 7          | Original Model | 7                   | -37.40                                  | 1.58            |
| 8          | Original Model | 8                   | -41.60                                  | 2.45            |
| 9          | Original Model | 9                   | -45.80                                  | 2.05            |
| 10         | Original Model | 10                  | -49.40                                  | 1.55            |
| 11         | Original Model | 11                  | -55.00                                  | 3.26            |
| 12         | Original Model | 12                  | -56.80                                  | 2.92            |
| 13         | Minim          | 1                   | -3.20                                   | 0.71            |
| 14         | Minim          | 2                   | -9.20                                   | 0.84            |
| 15         | Minim          | 3                   | -15.60                                  | 1.18            |
| 16         | Minim          | 4                   | -21.00                                  | 2.14            |
| 17         | Minim          | 5                   | -27.33                                  | 1.15            |
| 18         | Minim          | 6                   | -32.00                                  | 3.38            |
| 19         | Minim          | 7                   | -38.00                                  | 1.29            |
| 20         | Minim          | 8                   | -40.00                                  | 0.00            |
| 21         | Minim          | 9                   | 0.00                                    | 0.00            |
| 22         | Minim          | 10                  | 0.00                                    | 0.00            |
| 23         | Minim          | 11                  | 0.00                                    | 0.00            |
| 24         | Minim          | 12                  | 0.00                                    | 0.00            |

## Anhang D Handbuch von MatLab GUI

### D.1 Lesen der Daten aus Excel-Dateien in MatLab

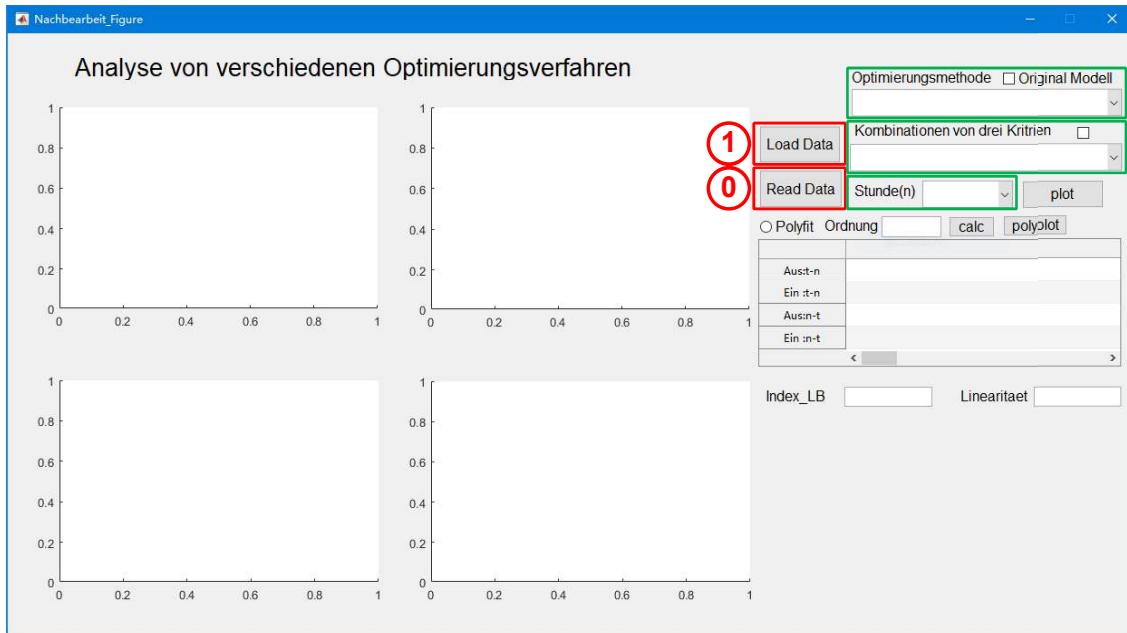


Abbildung D-1: Lesen der Daten aus Excel-Dateien in MatLab

Vorgehensweise:

1. die Daten in den Excel-Dateien einlesen
2. die Daten in den (\*.mat)-Datei einlesen

Ergebnisse:

1. die Daten in den Excel-Dateien in die (\*.mat)-Datei einspeichern
2. die Daten ins Programm einlesen

## D.2 Auswahl der Optimierungsmethode, der Kombination der Kriterien und der Simulationszeit

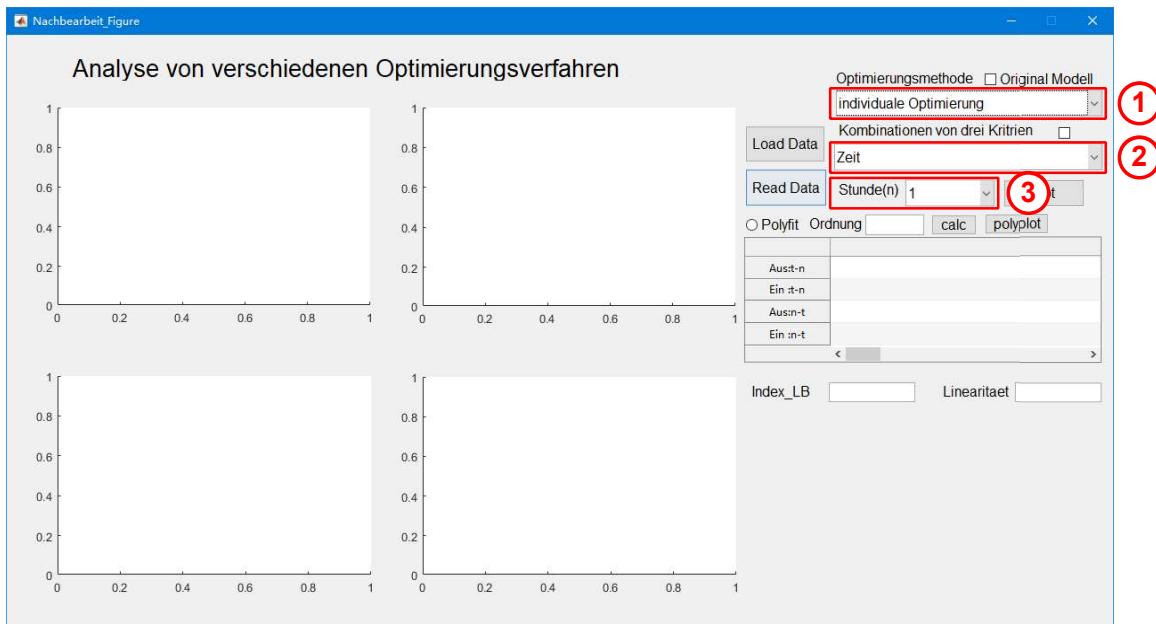


Abbildung D-2: Auswahl der Optimierungsmethode, der Kombination der Kriterien und der Simulationszeit

Vorgehensweise:

1. die Optimierungsmethode auswählen
2. die Kombination der Kriterien der Optimierungsmethode auswählen
3. die Simulationszeit auswählen

Ergebnisse:

1. die Daten von ausgewählte Optimierungsmethode mit ausgewählter Kombination der Kriterien und in ausgewählter Simulationszeit vorbereitet

### D.3 Erzeugung von den Bildern für die ausgewählten Daten

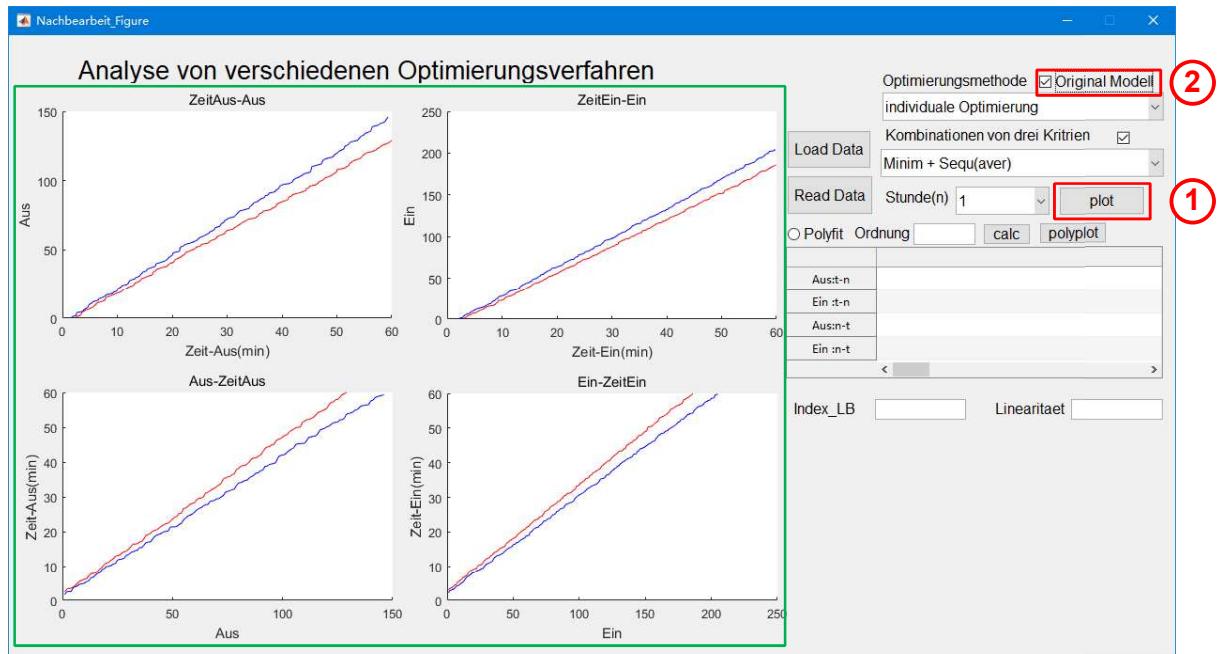


Abbildung D-3: Erzeugung von den Bildern für die ausgewählten Daten

Vorgehensweise:

1. die Bilder für die ausgewählten Daten erzeugen
2. die Bilder für die Daten von originalen Modell erzeugen

Ergebnisse:

1. die erzeugte blaue Kurve entspricht dem ausgewählten Modell
2. die erzeugte rote Kurve entspricht dem Originalmodell

## D.4 Generierung und Darstellung der Anpassungskurve

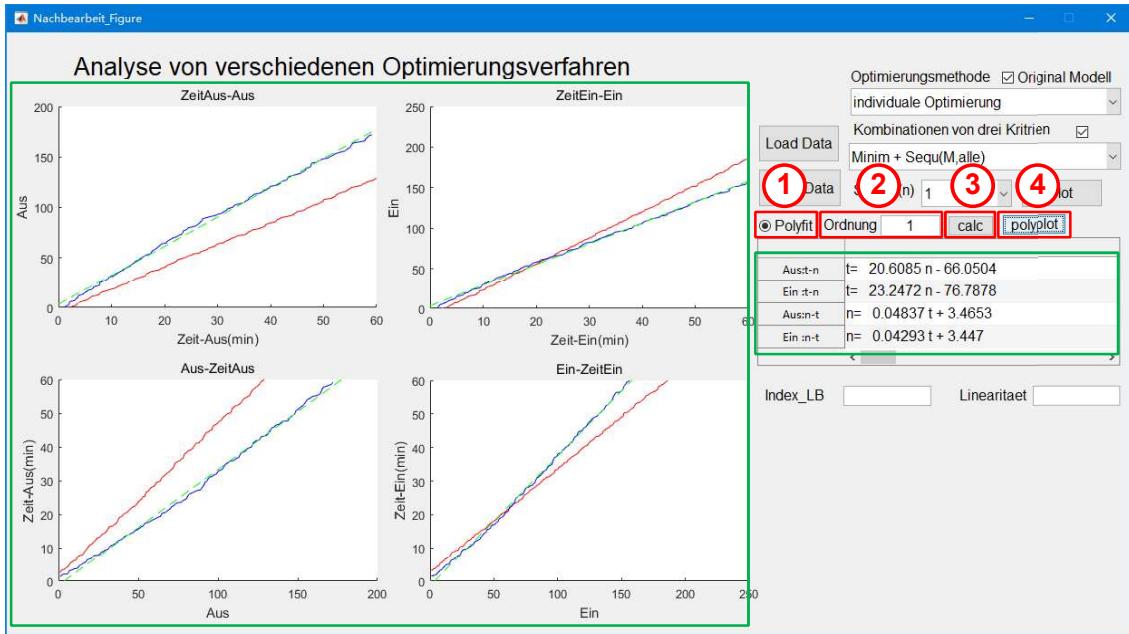


Abbildung D-4: Generierung und Darstellung der Anpassungskurve

Vorgehensweise:

1. die Kurvenanpassungsfunktion öffnen
2. die Ordnung der Anpassungskurve eingeben
3. die Anpassungskurve berechnen
4. die Bilder der Anpassungskurve generieren

Ergebnisse:

1. die Gleichungen von Anpassungskurven zeigen
2. die erzeugte grüne Kurve entspricht der Anpassungskurve

## Eidesstattliche Erklärung

---

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

München, Garching, 11.05.2020

Dai Xiaobing

Ort, Datum, Unterschrift