

# **FORSCHUNGSBERICHT**

W. A. Günthner · T. Atz · A. Ulbrich

Integrierte Lagersystemplanung



# Forschungsbericht

der Forschungsstelle

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur  
Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **15990 N**

***Integrierte Lagersystemplanung***

(Bewilligungszeitraum: 01.03.2009 - 28.02.2011)

der AiF-Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

**fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

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

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

Printed in Germany 2011

**fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Telefon: + 49.89.289.15443

Telefax: + 49.89.289.15922

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





## Zusammenfassung

Die Planung von automatischen Lagersystemen, welche mit schienengeführten Regalbediengeräten betrieben werden, ist von mehreren Einflussfaktoren abhängig. Neben dem Platzbedarf, der Stellplatzanzahl und der Umschlagsleistung, ist vor allem auch der Investitionsaufwand ein entscheidendes Planungskriterium. Eine Planungsvariante wird im Wesentlichen von der Lagerkonfiguration, Lagerstrategie und der Dimensionierung definiert. Bei der konventionellen Planungsvorgehensweise werden diese Kriterien sequenziell ermittelt und bewertet. Die Auslegung der Planungsvarianten erfolgt dann in iterativen Schritten.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „*Integrierte Lagersystemplanung*“ wird eine neue Planungsvorgehensweise entwickelt, die den Planer in der Ausarbeitung und dem Vergleich von Planungsvarianten für automatische Lagersysteme unterstützt. Die Methode ermöglicht es, die Einflüsse unterschiedlicher Lagerkonfigurationen und Lagerstrategien auf die Umschlagsleistung zu berechnen und parallel dazu den Investitionsaufwand zur Realisierung der Planungsvariante zu schätzen. Die Berechnungsergebnisse sind die Ausgangsbasis für eine automatische Optimierung. Diese sucht nach jener Planungsvariante mit dem minimalen Investitionsaufwand. Die maximalen Lagerabmessungen sowie die minimale Stellplatzanzahl und Umschlagsleistung sind die Restriktionen für die Auslegung. In dem Forschungsprojekt werden drei Modelle entwickelt, die eine Planungsvariante bezüglich dieser Kenngrößen bewerten. Diese Modelle werden in ein rechnergestütztes Planungswerkzeug übertragen, welches eine Oberfläche zur Eingabe der Planungsvorgaben und darauf aufbauender Planungsvarianten bereit stellt. Die Planungsvarianten werden verglichen und optimal dimensioniert. Der gesamte Lösungsraum wird in einem Diagramm grafisch veranschaulicht. Mittels einer Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen von veränderten Planungsanforderungen auf die optimale Dimensionierung betrachtet. Anhand von bestehenden Planungen und der Begleitung von laufenden Planungen erfolgt die Verifizierung und Validierung der Berechnungsmodelle.

Mit der entwickelten Planungsvorgehensweise wird der Suchraum nach dem wirtschaftlich optimalen Lagersystem wesentlich erweitert.





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung	1
1.2	Stand der Forschung und Technik	2
1.3	Forschungsziel	2
1.3.1	Angestrebte Forschungsergebnisse	3
1.3.2	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	3
1.3.3	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	4
<b>2</b>	<b>Automatische Lagersysteme</b>	<b>7</b>
2.1	Aufbau und Funktionsweise automatischer Lagersysteme	8
2.2	Lagerkonfiguration	11
2.3	Lagerstrategien	15
2.3.1	Gassenübergreifende Lagerstrategien	16
2.3.2	Gassenbezogene Lagerstrategien	20
2.4	Planung eines automatischen Lagersystems	30
2.4.1	Konventionelle Lagersystemplanung	32
2.4.2	Integrierte Lagersystemplanung	33
<b>3</b>	<b>Berechnung der Lagergeometrie und Stellplatzanzahl</b>	<b>35</b>
3.1	Aufbau und Größe des Regalfelds	37
3.2	Abmessungen der Regalwand	39
3.3	Platzbedarf einer Lagergasse	40
3.4	Größe des Lagergebäudes	41
3.5	Ergebnis	41
<b>4</b>	<b>Berechnung der Umschlagsleistung</b>	<b>43</b>
4.1	Überblick bestehender Spielzeitberechnungsmodelle	43
4.2	Grundlagen der Spielzeitberechnung	45
4.2.1	Einzelbewegungen	45
4.2.2	Zusammengesetzte Bewegungen	47
4.2.3	Bewegung in Regalgasse	47
4.3	Einheitlicher Ansatz zur Bestimmung der Umschlagsleistung unterschiedlich ausgeprägter Lagersysteme	49

4.4	Modelle zur Berechnung einzelner Spielzeitkomponenten	51
4.4.1	Stochastisches Fahrzeitmodell	51
4.4.2	Stochastisches Umgebungsmodell	63
4.4.3	Deterministische Modelle	79
4.5	Berechnung der mittleren Spielzeit einer Lagergasse	81
4.5.1	Berechnung der Spielzeit unabhängiger Arbeitsspiele	83
4.5.2	Berechnung der Spielzeit abhängiger Arbeitsspiele	97
4.6	Berechnung der Umschlagsleistung eines Lagers	103
4.6.1	Umschlagsleistung eines Lagers bei unabhängigen Lagergassen	103
4.6.2	Umschlagsleistung eines Lagers bei abhängigen Lagergassen	104
4.7	Ergebnis	107
<b>5</b>	<b>Berechnung der Kosten</b>	<b>109</b>
5.1	Prinzip der Kostenschätzung	110
5.2	Grundstück	111
5.3	Gebäude	111
5.3.1	Bodenplatte	111
5.3.2	Wände	111
5.3.3	Dach	112
5.4	Lagertechnik	112
5.4.1	Regalsystem	112
5.4.2	RBG	113
5.4.3	Übergabepunkte und Anbindung an die Vorzone	114
5.4.4	Brandschutz	114
5.5	IT-System	116
5.6	Laufende Kosten	116
5.7	Kostenberechnung	116
5.8	Ergebnis	117
<b>6</b>	<b>Implementierung eines Demonstrators zur integrierten Lagersystemplanung</b>	<b>119</b>
6.1	Aufbau und Bedienung des Planungswerkzeugs	120
6.1.1	Programmstruktur	121
6.2	Berechnung einer Planungsvariante	123
6.2.1	Berechnung der Lagergeometrie und Stellplatzanzahl	123
6.2.2	Berechnung der Umschlagsleistung	124

6.2.3	Berechnung der Kosten	125
6.3	Optimierung	126
6.3.1	Theorie der nichtlinearen Optimierung diskreter Funktionen	126
6.3.2	Vollfaktorielle Optimierung	127
6.3.3	Teilfaktorielle Optimierung	131
6.3.4	Optimierungsheuristiken	134
6.4	Sensitivitätsanalyse	135
6.5	Validierung	137
6.5.1	Berechnung der Stellplatzanzahl und Lagergeometrie	137
6.5.2	Berechnung der Umschlagsleistung	138
6.5.3	Berechnung der Kosten	139
6.6	Bewertung der Optimierungsfunktionen	140
6.7	Ergebnis	141
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick</b>	<b>143</b>
7.1	Zusammenfassung	143
7.2	Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	146
7.3	Ausblick	147
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>149</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>		<b>155</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>157</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>		<b>161</b>



# 1 Einleitung

Der Begriff „*Integrierte Lagersystemplanung*“ steht für eine ganzheitliche Planungsmethode für automatische Lagersysteme, die es erlaubt, unterschiedliche technische Lagerkonfigurationen in Kombination mit verwendeten Lagerstrategien zu untersuchen und zu vergleichen. Dazu wird die Berechnung der Umschlagsleistung und der Kosten erstmalig in einem Planungswerkzeug zusammengeführt und mittels einer mathematischen Optimierung nach dem optimal dimensionierten Lager für einen spezifischen Anwendungsfall gesucht.

## 1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die Auslegung automatischer Lagersysteme mit schienengeführten Regalbediengeräten hängt von einer Vielzahl an Parametern ab, welche sich aus der Dimensionierung, der Lagerkonfiguration und der Lagerstrategie ergeben. Die wichtigsten Kenngrößen bei der Auslegung eines Lagersystems sind die Stellplatzanzahl, die Umschlagsleistung und der Investitionsbedarf. Stellplatzanzahl und Umschlagsleistung sind Planungsvorgaben, welche sich aus unternehmensspezifischen Faktoren ableiten. Die zu realisierende Stellplatzanzahl ist häufig von der Artikelstruktur, den Produktionslosgrößen und den Sicherheitsbeständen abhängig. Die Umschlagsleistung hängt von der Intensität der Materialströme ab, die von den vor- und nachgelagerten Unternehmensbereichen in oder aus dem Lager führen. Zielgröße einer Planung ist i.d.R. der Investitionsbedarf, welcher aus einer ausgearbeiteten Planungsvariante abgeleitet wird und möglichst gering sein soll. Die Suche nach dem optimalen Lager gestaltet sich als ein mehrdimensionales Optimierungsproblem mit dem Investitionsaufwand als Zielfunktion. Die Umschlagsleistung, die Stellplatzanzahl und die Abmessung des Lagers fließen als Nebenbedingungen ein. Bei einer gültigen Lösung müssen sie den Planungsvorgaben entsprechen.

## **1.2 Stand der Forschung und Technik**

Die herkömmliche Planungsvorgehensweise ist sequenziell und bedingt eine getrennte Betrachtung der drei Kenngrößen. In der Planung wird zunächst ein Groblayout erarbeitet, welches eine ausreichende Anzahl an Stellplätzen vorsieht und in einem zweiten Schritt bezüglich der Umschlagsleistung bewertet wird. Oftmals fehlen dazu jedoch geeignete Berechnungsmodelle. Beispielsweise ist der Effekt erhöhter Umschlagsleistungen durch intelligente Lagerorganisationen zwar bekannt, aber gleichzeitig sehr schwer für die Vielzahl an technischen Lagerkonfigurationen quantifizierbar. Nach der Bestimmung der Stellplatzkapazität und der Umschlagsleistung werden der Investitionsaufwand abgeschätzt und, bei schlechter Wirtschaftlichkeit, in iterativen Schritten Änderungen am Layout oder der technischen Ausführung vollzogen. Diese Vorgehensweise erfordert Expertise und Erfahrung vom Planer und verursacht einen hohen Aufwand, um das Leistungs- und Kostenoptimum einer Planungsvariante zu finden. In der Grobplanungsphase können aus Zeit- und Kostengründen nur einige wenige technische Varianten untersucht werden. Die durch die Untersuchung ermittelte geeignetste Variante wird in der Feinplanungsphase detailliert ausgearbeitet und oftmals simulativ untersucht. Eine Simulation erlaubt es, Einflüsse zu berücksichtigen, die eigentlich schon zur Auswahl in der Grobplanungsphase wertvoll gewesen wären. Das Ergebnis der schwierigen und aufwendigen Planung sind suboptimale automatische Lagersysteme, welche nicht immer für den jeweiligen Anwendungsfall richtig dimensioniert sind.

## **1.3 Forschungsziel**

Ziel des Forschungsprojekts ist die Erarbeitung einer ganzheitlichen Planungsmethodik zur verbesserten Planung von automatischen Lagersystemen. In der technischen Auslegung sollen verschiedene Lagerkonfigurationen berücksichtigt und Lagerstrategien integriert werden. Neben der Identifikation von Planungsvarianten soll die Auswahl eines optimalen automatischen Lagers für einen speziellen Anwendungsfall ermöglicht werden. Dadurch kann der Planungsvorgang beschleunigt und eine verbesserte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verschiedener Planungsalternativen unterstützt werden.

### **1.3.1 Angestrebte Forschungsergebnisse**

Als Ergebnis des Forschungsvorhabens soll eine neu entwickelte Planungsmethodik zur Verfügung stehen, mit deren Hilfe die hohe Komplexität der Lagerplanung mit einer Vielzahl an Planungsvarianten besser beherrscht werden kann. Dazu sollen die Leistungsberechnung mit der Kostenberechnung zusammengeführt werden, um ein wirtschaftlich optimales Lager identifizieren zu können. Die Methodik soll verschiedene, auch selten benutzte Lagersysteme, in den Planungsprozess einbinden. Um die Möglichkeiten der Planungsmethodik zu demonstrieren und sie auch für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) nutzbar zu machen, soll ein rechnergestütztes Planungswerkzeug zur Unterstützung weiterer Teile des Planungsprozesses entwickelt werden.

### **1.3.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse**

Vor dem Projektstart existierte keine Vorgehensweise zur Planung automatischer Lagersysteme, in der die Einflüsse unterschiedlicher Lagerkonfigurationen und der gewählten Lagerstrategien auf die Umschlagsleistung kombiniert in einer Betrachtung mit einbezogen werden. Die Auslegung ist damit für den Planer sehr aufwändig und nur auf einfache automatische Lagersysteme beschränkt. Berechnungsmethoden für die an Bedeutung gewinnenden komplexeren Lagerkonfigurationen, bei welchen Lagerstrategien berücksichtigt werden, sind schwieriger in der Anwendung und werden in der freien Wirtschaft noch nicht verwendet. Das Forschungsprojekt „*Integrierte Lagersystemplanung*“ erweitert den Suchraum nach dem wirtschaftlich optimalen Gesamtsystem wesentlich. Die Einbeziehung der Investitionskosten bereits in frühen Phasen der Planung erlaubt eine frühere Bewertung der Wechselwirkungen zwischen Lagerauslegung und Wirtschaftlichkeit. Ungünstige Lösungen können so sehr bald erkannt und nicht weiter verfolgt werden, sinnvolle Lösungen können hingegen optimal ausgelegt werden. Der Planer profitiert durch die Möglichkeit des einfachen und schnellen Vergleichs unterschiedlichster technischer Lösungen für einen speziellen Anwendungsfall. Der Planungsprozess wird beschleunigt und eine fundierte und abgesicherte Auswahl ermöglicht.

### 1.3.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

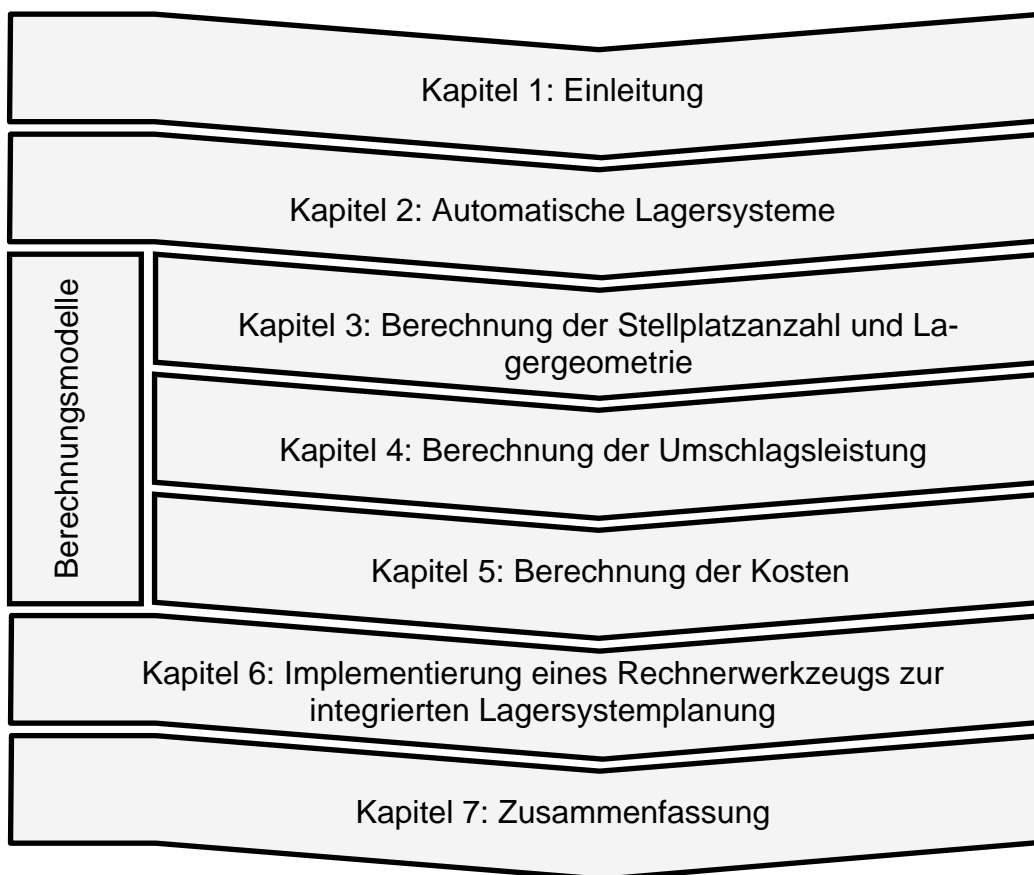
Die Durchführung des Forschungsprojektes gliedert sich in sieben Arbeitspakete:

- AP1: Analyse von Lagerkonfigurationen, Betriebsstrategien und Berechnungsmethoden.  
Ergebnis: Zusammenstellung vorhandener Berechnungsmethoden und Kennzahlensysteme
- AP2: Ableitung einer Strategie zur Integration von statischer und dynamischer Auslegung.  
Ergebnis: Modell einer integrierten Vorgehensweise zur Auslegung automatischer Lagersysteme
- AP3: Ermittlung der Einflussparameter auf Kostenkennwerte bei automatisierter Lagertechnik.  
Ergebnis: Datenbasis, die Kostenkennwerte enthält
- AP4: Umsetzung der Berechnungsmethoden und der Kostenkennwerte als Planungswerkzeug.  
Ergebnis: Planungswerkzeug zur Planungsunterstützung
- AP5: Verifizierung anhand realisierter Planungsprojekte.  
Ergebnis: Verifiziertes Auslegungsverfahren mit verifiziertem Planungswerkzeug
- AP6: Pilotprojekte.  
Ergebnis: Mit Hilfe des Auslegungsverfahrens realisierte Lagersysteme
- AP7: Dokumentation.  
Ergebnis: Dokumentation des Forschungsprojekts

Ausgehend von den sieben Arbeitspaketen orientiert sich die Struktur des Forschungsberichts an den Berechnungsschritten zur Planung eines automatischen Lagersystems (vgl. Abbildung 1-1). Im ersten Kapitel werden die Problemstellung, der Stand der Technik und das Forschungsziel beschrieben. In Kapitel 2 werden die betrachteten Lagersysteme abgegrenzt. Neben dem konzeptionellen Aufbau werden mögliche Lagerkonfigurationen und -strategien sowie die Planung der Lagersysteme beschrieben. In den Kapiteln 3-5 werden die Modelle zur Berechnung einer Lagervariante vorgestellt. In Kapitel 6 werden die Modelle in ein Planungswerkzeug überführt. Es werden der Aufbau des Werkzeugs sowie die realisierten Funktionen dar-



gestellt. Anhand realer Planungen erfolgt die Verifizierung und die Validierung. Kapitel 7 fasst die aufgezeigten Modelle und Konzepte zusammen.



**Abbildung 1-1:** Gliederung des Forschungsberichts



## 2 Automatische Lagersysteme

Ein automatisches Lagersystem setzt sich aus verschiedenen Geräten und Steuerungen zusammen, welche den automatisierten Transport sowie die Ein- und Auslagerung in einer Regalkonstruktion übernehmen. Ein Lagerverwaltungssystem verwaltet und koordiniert die Vorgänge im Lager und koppelt es i.d.R. an ein ERP<sup>1</sup>-System. Wichtigste Vertreter dieser Lagersysteme sind die konventionellen Hochregallager und Kleinteilelager, die in diesem Forschungsprojekt Gegenstand der Untersuchung sind. Charakteristisch für die Funktionsweise dieser Lagersysteme ist die automatisierte Ein- und Auslagerung von Ladeeinheiten mittels schienengeführter Regalbediengeräte auf die Lagerplätze der Regale [VDI4480-1]. Die Vorteile gegenüber anderen Lagertechniken sind die gute Raumnutzung bei hoher Umschlagsleistung und die kurzen Zugriffszeiten auf jede beliebige Ladeinheit. Seit der Einführung des ersten Hochregallagers in Deutschland in den 60er Jahren ist der Bedarf an diesen Systemen kontinuierlich gestiegen. Im Jahre 2004 sind bereits allein in Deutschland an die 5.000 Lager installiert, die von rund 16.000 Regalbediengeräten betrieben werden [Gün-07]. In dieser Zeitspanne haben sich die Einsatzgebiete dieser Lagersysteme stark erweitert. Der Lagertyp hat sich vom reinen Fertigteillager zu einem Schnittpunkt in der Logistikkette innerhalb eines Unternehmens und zwischen den Prozessen der Unternehmen entwickelt.

Neben dem konventionellen Hochregallager und Kleinteilelager gibt es eine Reihe weiterer automatischer oder automatisierter Lagersysteme, die nicht in die nähere Betrachtung mit einbezogen werden. Eines davon ist das Kanallager, das eine spezielle Ausprägungsform des Hochregallagers darstellt. Es besteht aus mehrfach tiefen Regalen, die Kanäle genannt werden und mittels Regalbediengeräten oder Kanalfahrzeugen und eines für den Vertikaltransport zuständigen Aufzugs bedient werden. Bei diesem Lagertyp kann im Vergleich zum Hochregallager ein höherer Raumnutzungsgrad zu Lasten der Umschlagsleistung erreicht werden. Weitere Ausprägungsformen der automatischen Lagersysteme sind das Turmlager mit einem stationären

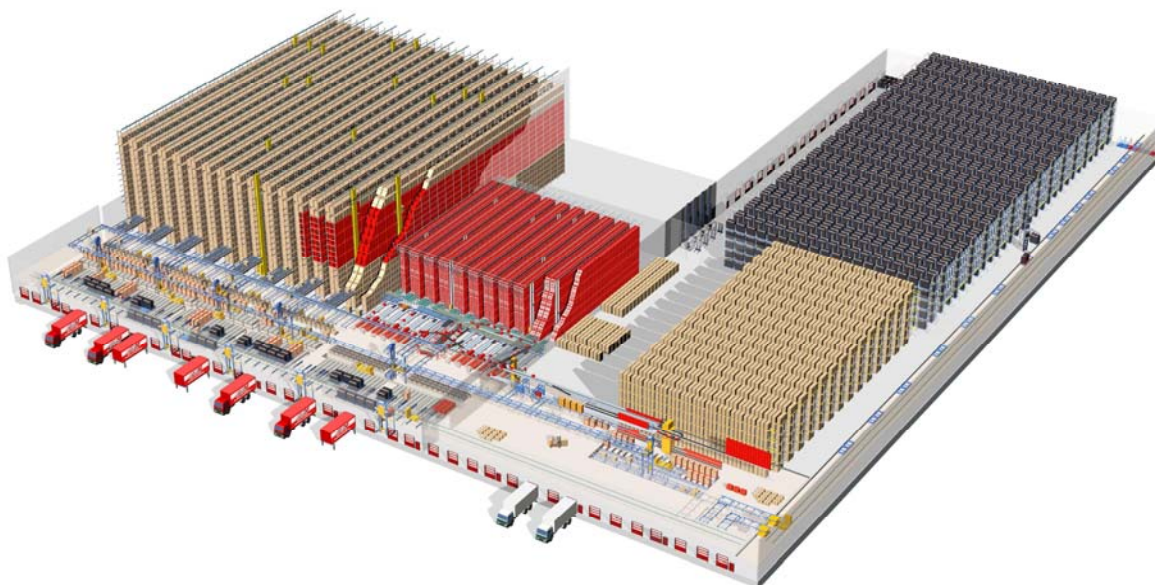
---

<sup>1</sup> Ein ERP-System (ERP ist die englische Abk. für Enterprise Resource Planning) ist eine Anwendungssoftware welche verschiedene Funktionen, Aufgaben und Daten des gesamten Unternehmens in ein Informationssystem integriert. [Gro-04]

Regalbediengerät (bzw. Aufzug) in der Mitte und rund herum kreisförmig angeordneten Stellplätzen sowie Systeme mit dynamischer Lagereinrichtung wie Paternoster- oder Karusselllager [Gud-05]. Weniger verbreitete, spezielle Ausführungsformen sind das Hubbalkenlager, das Sistore [Gra-93] und der Aviator<sup>2</sup> [Gud-05].

### 2.1 Aufbau und Funktionsweise automatischer Lagersysteme

Automatisierte Hochregallager üben eine Lager-, Speicher- oder Puffertätigkeit aus und sind über eine Lagervorzone an die Unternehmensbereiche Produktion, Kommissionierung oder Warenein- und Warenausgang angebunden (Abbildung 2-1).



**Abbildung 2-1:** Auto-Teile-Unger – Distributionszentrum in Weiden mit einem automatischen Palettenhochregallager und Kleinteilelager sowie einem manuell bedienten Hochregal (v.l.n.r.) (Bildquelle [WIT-03])

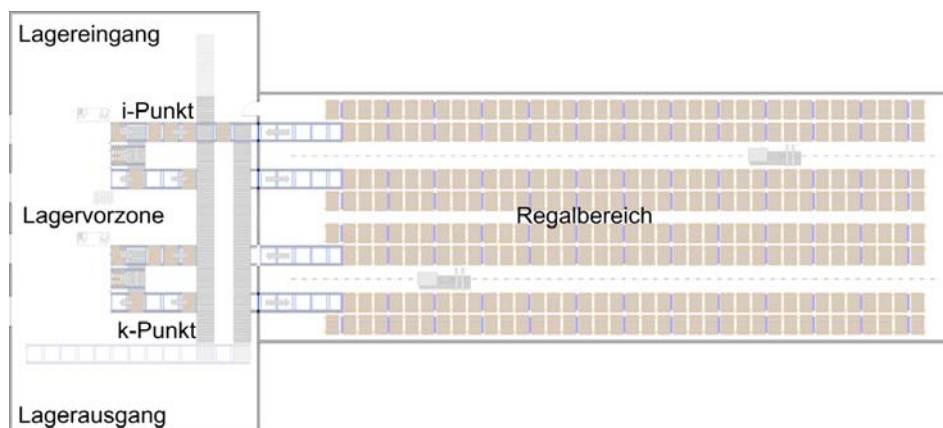
Sie können im Allgemeinen in drei Kategorien untergliedert werden: Automatische Paletten-Hochregallager (HRL) werden für Lagergut, welches sich auf EURO- oder Industriepaletten befindet, verwendet. Das Gewicht dieser Paletten liegt meist zwischen 300 und 3.000 kg. Palettenhochregallager können bis zu einer Höhe von 50 m gebaut werden. Während bei einer niedrigen Höhe meist die Hallenbauweise zum

---

<sup>2</sup> ehemals mit TransFaster bezeichnet

Einsatz kommt, hat sich bei größeren Höhen ab ca. 18 m die Silobauweise mit tragenden Regalen durchgesetzt. Bei Tablarlagern werden Tablare als Ladehilfsmittel verwendet, auf welche mehrere Lagergüter angeordnet werden. Es können meist Gewichte von bis zu 300 kg pro Tablar erreicht werden. Automatische Kleinteilelager (AKL) werden für bis zu 50 kg leichte und relativ kleine Ladeeinheiten (LE) verwendet. Diese befinden sich meist in genormten Behältern oder Kartons.

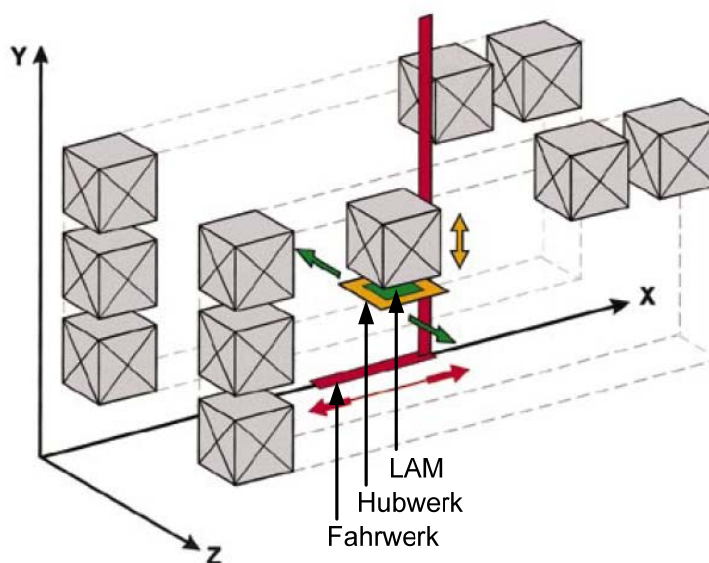
Ein konventionelles, automatisiertes Lagersystem ist aus verschiedenen Systemkomponenten aufgebaut. Der Kern des Lagers besteht aus einem mehrgassigen Regalsystem mit Bediengeräten. Über die Fördertechnik der Lagervorzone sind die Gassen miteinander verbunden und an andere Unternehmensbereiche angebunden. Die Systemgrenze des Regalbereichs zur Lagervorzone wird laut der VDI Richtlinie 2690 Blatt 1 [VDI2690-1] am Identifikationspunkt (i-Punkt) und am Kontrollpunkt (k-Punkt) gezogen. An den beiden Punkten wird die Identität der ein- bzw. auszulagernden Lagereinheiten festgestellt und an das Lagersystem übermittelt. Abbildung 2-2 skizziert den Lageraufbau mit seinen unterschiedlichen Bereichen.



**Abbildung 2-2:** Schematischer Aufbau eines automatischen Lagersystems, in Anlehnung an [VDI2690-1]

Der Regalbereich besteht typischerweise aus mehreren Lagergassen, welche aus zwei Regalwänden mit einem Lagergang in der Mitte zusammengesetzt sind. Das Regal besteht im Wesentlichen aus Stahlprofilen, die sich in Stützen, Diagonalen und Querträger (im Kleinteilebereich Winkelauflagen oder Fachböden) unterscheiden lassen. Eine Gasse wird normalerweise mit schienengeführten Regalbediengeräten (im Folgenden als RBG bezeichnet) betrieben. In Abbildung 2-3 ist das Funktionsprinzip veranschaulicht. Das Regalbediengerät setzt sich aus einem Fahr- und Tragwerk,

dem Hubwerk sowie einem Lastaufnahmemittel (LAM) zusammen [FEM9.831]. Das Fahrwerk kann auf Schienen verfahren in x-Richtung, längs zum Regal, bewegt werden. Auf dem Fahrwerk ist der Mast befestigt, an welchem sich das Hubwerk in y-Richtung bewegen kann. Mit getrennten Antrieben für Fahr- und Hubwerk können diese parallel verfahren, was eine Diagonalfahrt des Lastaufnahmemittels bewirkt. Das Lastaufnahmemittel (im Folgenden mit LAM bezeichnet) befindet sich auf dem Hubwerk und kann in z-Richtung, quer zum Regal, verfahren und Ladeeinheiten in das Regal stellen oder Ladeeinheiten entnehmen.



**Abbildung 2-3:** Funktionsprinzip des klassischen Hochregallages in Anlehnung an [Sch-99a, Sch-99b, Sch-99c]

Am Ende jeder Gasse befinden sich Übergabepunkte (ÜP), mit welchen die Lagergassen an die Fördertechnik der Lagervorzone angebunden sind. Die Übergabepunkte untergliedern sich in Einlagerpunkt (ÜE) und Auslagerpunkt (ÜA), an welchen das RBG die Ladeeinheiten aufnimmt und sie nach erfolgter Auslagerung abgibt [Lee-97b]. Liegen sich die beiden Punkte direkt auf derselben Höhe gegenüber, wird auch von einem Ein-/ Auslagerpunkt (ÜEA) gesprochen. Ein Arbeitszyklus eines RBG wird mit dem Begriff Arbeitsspiel bezeichnet. Ein Regalbediengerät kann mit verschiedenen Spielarten betrieben werden, welche den Bewegungsablauf des RBG bestimmen. Ein Doppelspiel umfasst die Aufnahme des Lagerguts am ÜE, die Fahrt in die Regalgasse, die Einlagerung in das Einlagerfach, die Fahrt zum Auslagerfach, die Auslagerung und die Rückfahrt zum ÜA, sowie Abgabe der Ladeeinheit. Arbeitsspiele welche ausschließlich Einlagerungen oder Auslagerungen durchführen, wer-

den als sogenanntes Einzelspiel ausgeführt. Dieses umfasst nur die jeweiligen Arbeitsschritte für die Ein- bzw. Auslagerung und ist damit kürzer als das Doppelspiel. Die Lagervorzone wird auch Fördermittelbereich genannt, da sie die gesamte Förder-technik wie beispielsweise Rollen-, Kettenbahnen, Querverschiebewagen u.a. beinhaltet. Für die Gestaltung und Anordnung der Fördertechnik gibt es eine Vielzahl an verschiedenen technischen Ausführungen [Gud-79a; Gud-79b]. Die angebundenen Unternehmensbereiche sind Ausgangspunkt für die Material- und Informationsflüsse, welche das Lagersystem verarbeiten muss. Die Einlageraufträge liegen als physische Ladeeinheiten vor, während die Auslageraufträge elektronisch an das Lager übermittelt werden.

## 2.2 Lagerkonfiguration

Die Anpassung an hohe Umschlagsleistungs- und/oder Kapazitätsanforderungen hat für die konventionellen Lagersysteme eine Reihe von verschiedenen Lagerkonfigurationen hervorgebracht, die den Anforderungen der modernen Logistik gerecht werden. Die Lagerkonfiguration beschreibt dabei den physischen Aufbau des Lagers. Die Ausprägungen gängiger Lagerkonfigurationsparameter sind in Tabelle 2-1 dargestellt.

**Tabelle 2-1:** Übersicht wichtiger Lagerkonfigurationsparameter und Ausprägungsmöglichkeiten

Lagerkonfigurationsparameter	Ausprägungsformen		
Lagertiefe	einfachtief (etL)		doppeltief (dtL)
Anzahl Lastaufnahmemittel pro RBG	1	2	3
Lastaufnahmemittel- / Gassenbreite <sup>3</sup>	einfachbreit		doppelbreit (dbG)
Wirkungsbereich des RBG	eingassig		mehrgassig
Anzahl Übergabepunkte pro Gasse	2	3	4
Lage der Übergabepunkte	In einem Eckpunkt des Regals		In x- oder y-Richtung verschoben

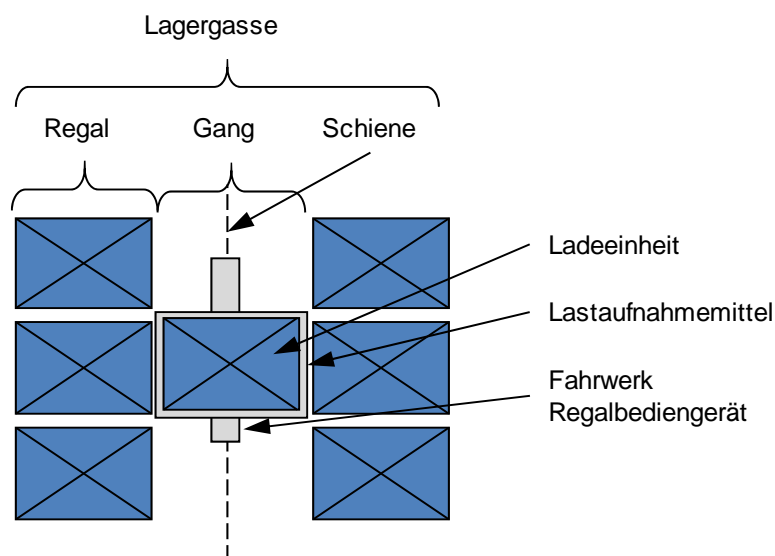
Die Lagerkonfiguration bestimmt die technische Ausführung des Regals mit Übergabepunkten und jene des Regalbediengeräts mit Lastaufnahmemittel. So ist die An-

<sup>3</sup> auch als Gassentiefe bezeichnet

zahl der Übergabepunkte pro Lagergasse nicht auf die zwei funktionsbedingten Ein- und Auslagerpunkte beschränkt. Die Ver- und Entsorgung der Regalbediengeräte kann über mehrere Übergabepunkte erfolgen. Diese sind oftmals an der Regalstirnseite in der Höhe verschoben oder auch in die Regalwand hineinversetzt. Dabei kann die Zuführung der Ladeeinheiten von außen oder durch in das Regalsystem integrierte Stetigförderer erfolgen [Gün-10].

Die Lagertiefe beschreibt die Ausführung des Regalsystems bezüglich der Anzahl der Ladeeinheiten, die in einen Lagerkanal eingelagert werden können. Mehrere auf einem RBG installierte Lastaufnahmemittel ermöglichen den parallelen Transport von Ladeeinheiten. Die Breite des Lastaufnahmemittels bzw. die Gangbreite beschreibt die Anzahl der Ladeeinheiten, die auf einem LAM quer zum Lagergang, transportiert werden können. Im Normalfall bedienen die schienengeführten RBG genau eine Lagergasse. Bei kurvengängigen RBG oder Umsetzvorrichtungen können jedoch auch mehrere Gassen mit einem einzigen Bediengerät betrieben werden.

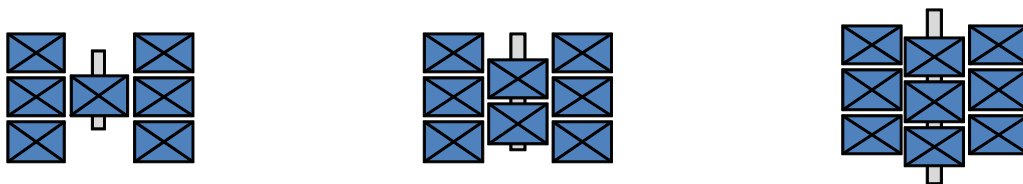
In der Praxis können einige wichtige Lagerkonfigurationen identifiziert werden. Eine einfache und oft realisierte Lagerkonfiguration ist das einfachtiefe Lager, das von gassengebundenen Regalbediengeräten mit jeweils einem einfachfachbreiten LAM bedient wird (Abbildung 2-4).



**Abbildung 2-4:** Prinzipskizze der Lagerkonfiguration: einfachtiefes Lager mit einem einfachbreiten Lastaufnahmemittel (Draufsicht)

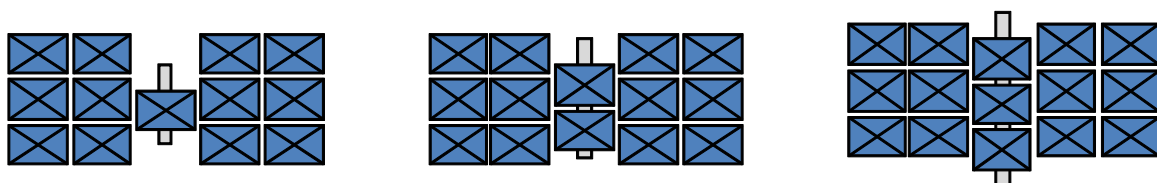


Je nach Anforderungen bezüglich Durchsatzleistung und Lagerkapazität können jedoch auch mehrere LAM pro RBG oder doppeltiefe Lagerformen zur Anwendung kommen. Werden anstatt eines einzelnen LAM mehrere LAM auf das Hubwerk angebracht, können entsprechend viele Ladeeinheiten gleichzeitig an den Übergabepunkten aufgenommen und in das Regal gefahren und umgekehrt aus dem Lager herausgebracht werden [Sar-91; Gud-72b]. In Abbildung 2-5 werden Lagerkonfigurationen mit ein bis drei LAM im einfachtiefen Lager skizziert.



**Abbildung 2-5:** Lagerkonfigurationen mit ein bis drei Lastaufnahmemitteln (Draufsicht)

Ist das LAM technisch dafür ausgelegt, doppeltief zu lagern und das Regalsystem entsprechend ausgeführt, können zwei Ladeeinheiten hintereinander in die beiden Lagerfächer eines Lagerkanals eingelagert werden. Der Vorteil gegenüber der einfachtiefen Lagerung ist ein kompakteres Lager mit verbessertem Volumennutzungsgrad. Bei doppeltiefer Lagerung ist es bei Auslagerungen häufig notwendig, auf verdeckt stehende Ladeeinheiten zuzugreifen. Dazu muss eine Umlagerung der vorderen Ladeeinheit durchgeführt werden. Negativ auf den Durchsatz wirkt sich zudem eine verlängerte Lastzykluszeit des Lastaufnahmemittels beim Zugriff auf die hintere Ladeeinheit aus. Auch doppeltiefe Lagerregale können mit mehreren Lastaufnahmemitteln betrieben werden, vgl. dazu Abbildung 2-6.



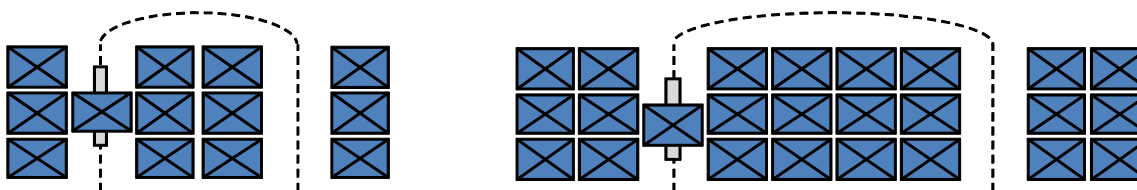
**Abbildung 2-6:** Lagerkonfigurationen mit ein bis drei Lastaufnahmemitteln und doppeltiefer Lagerung (Draufsicht)

Sämtliche der bisher beschriebenen Lagerkonfigurationen verwenden einfachbreite LAM. Bei einer doppelbreiten Ausführung der LAM kann dieses gleichzeitig zwei Ladeeinheiten hintereinander aufnehmen. Dadurch ist es im doppeltiefen Lager möglich, zwei Ladeeinheiten gleichzeitig einzulagern und den Durchsatz zu steigern. Durch die Verbreiterung des Lagergangs geht damit allerdings auch ein verschlechterter Lagernutzungsgrad einher. Im Normalfall können auf dem Hubwerk bis zu zwei doppelbreite LAM montiert werden, vgl. dazu Abbildung 2-7. Doppelbreite LAM kommen nahezu ausschließlich im Kleinteilelager zum Einsatz.



**Abbildung 2-7:** Lagerkonfigurationen mit und ein bzw. zwei Lastaufnahmemitteln und doppeltiefer Lagerung mit doppelbreiter Gasse (Draufsicht)

Um hohe Lagerkapazitäten bei geringen Anforderungen an den Durchsatz zu erreichen, werden Umsetzvorrichtungen oder kurvengängige RBG eingesetzt, um mit einem RBG mehrere Gassen bedienen zu können. Aufgrund der geringen Umschlagsleistungsanforderungen kommen dabei ausschließlich RBG mit einem LAM zur Anwendung.



**Abbildung 2-8:** Lagerkonfigurationen mit einem Lastaufnahmemittel, einfachtiefer bzw. doppeltiefer Lagerung, einfachtiefer Gasse und kurvengängigem Regalbediengerät (Draufsicht)

## 2.3 Lagerstrategien

Ein automatisches Lagersystem ist in den gesamten Informations- und Materialfluss des Unternehmens eingegliedert. Um auf die Anforderungen und Bedürfnisse der vor- und nachgeschalteten Bereiche reagieren zu können, werden die Abläufe innerhalb des Lagers mittels Lagerstrategien organisiert. Die Ziele der Lagerstrategien sind vielfältig und betreffen unter anderem die Sequenzierung der ausgelagerten Ladeeinheiten, die Versorgungssicherheit mit dem gesamten Artikelspektrum, das Vorbeugen von Überalterung einzelner Ladeeinheiten sowie die schnelle Abarbeitung von Ein- und Auslageraufträgen, um kurze Durchlaufzeiten innerhalb des Unternehmens zu ermöglichen. Die Lagerstrategien können in zwei Kategorien unterteilt werden, welche sich in ihrem Wirkungsbereich unterscheiden.

Die erste Kategorie der Lagerstrategien bezieht sich nicht nur auf einzelne Lagergassen, sondern auf das gesamte automatisierte Lager. Die Strategien behandeln die Verteilung der Ein- und Auslagerungsaufträge auf die Lagergassen sowie die Sequenzierung der ausgelagerten Einheiten (Tabelle 2-2).

**Tabelle 2-2:** Übersicht wichtiger gassenübergreifender Lagerstrategien und Ausprägungsmöglichkeiten

Lagerstrategien	Ausprägungsformen		
Sequenzierung	freie Reihenfolge	auftragsbezogene Sequenzierung	positionsbezogene Sequenzierung
Gassenauswahl bei Einlagerungsaufträgen	Artikelgleichverteilung über die Lagergassen		nach Auslastung der Lagergassen
Gassenauswahl bei Auslagerungsaufträgen	FIFO <sup>4</sup>		nach Auslastung der Lagergassen

Sind die Aufträge einer Lagergasse zugewiesen, bestimmt die zweite Kategorie der Lagerstrategien den operativen Ablauf der Arbeitsspiele eines RBG in den einzelnen Lagergassen oder bei kurvengängigen RBG in mehreren Gassen. Jede Lagerkonfiguration kann dabei mit mehreren Lagerstrategien betrieben werden. Diese Strategien bestimmen die Lagerplatzvergabe und das konkrete Verhalten eines RBG beim Zugriff und bei der Aufnahme und Abgabe von Ladeeinheiten am Übergabepunkt. Die Lagerstrategien sind auf die Lagerkonfiguration abgestimmt und werden an die-

<sup>4</sup> FIFO (First In First Out) bedeutet, dass der älteste Artikel zuerst ausgelagert wird.

ser Stelle nach ihrem Zeitpunkt im Arbeitsspiel gegliedert, an welchem sie Einfluss nehmen (Tabelle 2-3).

**Tabelle 2-3:** Übersicht wichtiger gassenbezogener Lagerstrategien und Ausprägungsmöglichkeiten

Lagerstrategien	Ausprägungsformen			
Spielart / Bewegungsstrategie	reines Einlagerspiel		reines Auslagerspiel	kombiniertes Ein- und Auslagerspiel
Ruhepositionsstrategie	Verweilen am letzten Aktionsort	Rückkehr zum ÜE beim Einlagerspiel - Verweilen am ÜA beim Auslagerspiel und kombinierten Spiel	Rückkehr zum ÜE	Fahrt in die Regalgasse
Einlagerstrategie	zufällige Einlagerung <sup>5</sup>	Einlagerung nahe Auslagerung	zonierte Einlagerung (ABC)	Doppelinlagerung nahe Auslagerung
Auslagerstrategie	strenges FIFO		abgeschwächtes FIFO	
Umlagerstrategie	keine Umlagerung	zufällige Umlagerung	Umlagerung nahe Auslagerung	
Übergabepunktstrategie	getrennte Abgabe und Aufnahme		parallele Abgabe und Aufnahme	
Reihenfolgestrategie	keine Reihenfolgestrategie		Fahrwegoptimierung	

### 2.3.1 Gassenübergreifende Lagerstrategien

Durch die Anbindung des Lagers an andere Bereiche des Unternehmens ergeben sich Anforderungen, welche das gesamte Lagersystem beeinflussen. Die dafür vorgesehenen Strategien haben das Ziel, Artikel gleichmäßig über das Lager zu verteilen, um den Zugriff auch bei einer ausgefallenen Lagergassen zu ermöglichen. Die Strategien sorgen dafür, dass alte Ladeeinheiten bevorzugt ausgelagert werden um eine Überalterung des Lagerbestands zu vermeiden und wenn es gefordert ist, bewirken sie die koordinierte Übergabe der Ladeeinheiten der Lagergassen an die Lagervorzone. Dadurch wird eine sequenzierte Auslagerung über das gesamte Lagersystem ermöglicht. Die Auswirkungen dieser Strategien auf die Umschlagsleistung eines automatischen Lagersystems sind beträchtlich, dennoch werden diese Strategien in der Planung häufig nicht berücksichtigt, da die Einflussgrößen vielseitig sind und eine Modellerstellung äußerst komplex ist. Im Rahmen dieses Forschungspro-

<sup>5</sup> auch als chaotische Lagerung bekannt

jekts wird ein Ansatz entwickelt, den Einfluss dieser Strategien in analytische Berechnungsmethoden einfließen zu lassen.

### **2.3.1.1 Gassenauswahl Einlagerungsaufträge**

Bei der Zuweisung der Einlageraufträge an die verschiedenen Lagergassen wird zwischen zwei verschiedenen Strategien unterschieden. Zum einen ist es sinnvoll, die Ladeeinheiten eines Artikels über mehrere Lagergassen zu verteilen, um beim Ausfall eines RBG die Versorgung mit diesem Artikel über andere RBG gewährleisten zu können.

Zum anderen ist es bei der Verteilung der Aufträge sinnvoll, alle Lagergassen gleichmäßig auszulasten, um eine möglichst hohe Gesamtleistung des Lagersystems zu garantieren. Dies kann unter anderem damit erreicht werden, dass neue Einlageraufträge jenen Lagergassen zugewiesen werden, die temporär am wenigsten ausgelastet sind. Diese *auslastungsbezogene Verteilung der Einlageraufträge* nutzt vorhandene RBG-Kapazitäten besser aus und ermöglicht prinzipiell höhere Umschlagsleistungen, kann jedoch nicht die Versorgungssicherheit der *Artikelgleichverteilung über die Lagergassen* gewährleisten.

### **2.3.1.2 Gassenauswahl Auslagerungsaufträge**

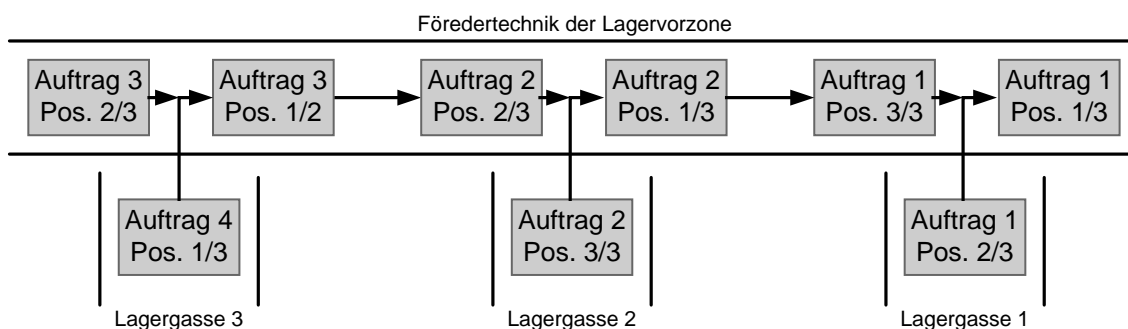
Bei der Verteilung von Auslageraufträgen auf die einzelnen Lagergassen werden in diesem Forschungsprojekt zwei Strategien unterschieden. Zum einen wird in der Praxis häufig nach dem *FIFO-Prinzip* ausgelagert. Diese Vorschrift sieht eine Auslagerung unter der Berücksichtigung des Einlagerzeitpunkts vor. Befinden sich mehrere Ladeeinheiten eines Artikels im Lager, wird der Auftrag jener Lagergasse zugewiesen, welche die älteste Ladeeinheit beinhaltet.

Die Strategie *auslastungsbezogene Vergabe der Auslageraufträge* ist äquivalent zur auslastungsbezogenen Vergabe der Einlageraufträge. Es wird überprüft, wie viele Einlagerungsaufträge und Auslagerungsanweisungen in jeder Lagergasse vorhanden sind, um der am geringsten ausgelasteten Lagergasse den neuen Auslagerauftrag zuzuweisen.

### 2.3.1.3 Sequenzstrategien

Nach der Auslagerung einer Ladeinheit wird diese vom Regalbediengerät auf den ÜA abgegeben und von dort der Lagervorzone übergeben. I.d.R. ist zwischen den Übergabepunkten und der Lagervorzone eine Pufferstrecke installiert. Diese stellt einige Stauplätze für die einzulagernden und ausgelagerten Ladeinheiten bereit. Eventuelle Stauungen auf der Fördertechnik der Lagervorzone wirken sich dadurch nicht unmittelbar auf die RBG aus. Viele automatische Lagersysteme müssen am Ausgang der Lagervorzone eine bestimmte Sequenz der Ladeeinheiten garantieren. Diese Sequenz kann mittels dem Lager nachgeschalteten Sortiergeräten oder direkt im Lager durch eine gesteuerte Aufgabe der Ladeeinheiten der einzelnen Lagergassen an die Lagervorzone erzeugt werden.

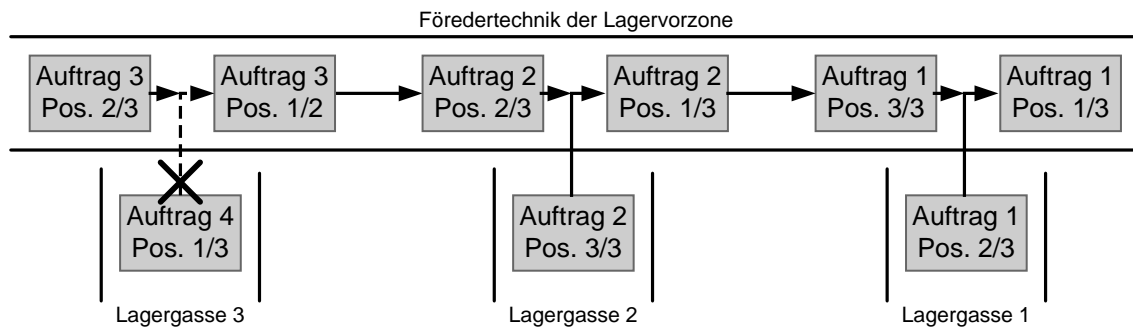
Ist keine vorgegebene Reihenfolge der ausgelagerten Ladeeinheiten notwendig, kann die Strategie *freie Reihenfolge* angewendet werden (Abbildung 2-9). Dabei können die Lagergassen als unabhängig voneinander betrachtet werden. Ausgelagerte Ladeeinheiten können sofort auf die Fördertechnik der Lagervorzone umgesetzt werden. Es entsteht kein Leistungsverlust durch eventuelle Blockierungen einzelner Lagergassen.



**Abbildung 2-9:** Übergabe der Ladeeinheiten an die Fördertechnik der Lagervorzone bei freier Reihenfolgenstrategie

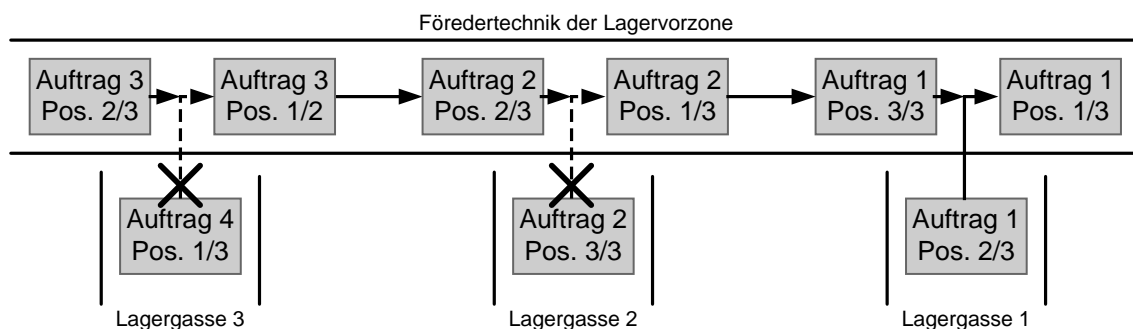
Eine *auftragsbezogene Sequenzierung* ist erforderlich, wenn alle Artikel eines Auftrags zusammengehalten werden sollen. Diese kann in der Kommissionierung oder im Warenausgang erforderlich sein. Die Lagergassen können bei dieser Strategie nur Ladeeinheiten an die Fördertechnik übergeben, wenn bereits alle Ladeeinheiten des vorhergehenden Auftrags die Gasse passiert haben. Alle Aufträge werden somit

nacheinander abgearbeitet, jedoch ist die Reihenfolge der einzelnen Positionen innerhalb eines Auftrags frei (Abbildung 2-10).



**Abbildung 2-10:** Übergabe der Ladeeinheiten an die Fördertechnik der Lagervorzone bei auftragsbezogener Sequenzierung

Während bei der zuvor genannten Strategie lediglich die Auftragsreihenfolge fest ist, ist bei der *positionsbezogenen Sequenz* auch die Reihenfolge der Auftragspositionen innerhalb jedes Auftrages zu beachten. Erst wenn die erste Position eines Auftrags an der Gasse passiert ist, in welcher sich die zweite Auftragsposition befindet, kann diese die Ladeeinheit der Fördertechnik übergeben. (Abbildung 2-11). Diese strikte Strategie ist oftmals bei nachgeschalteter Kommissionierung und Produktion erforderlich. Dem Vorteil der definierten Sequenz steht allerdings der Nachteil erhöhter Blockierzeiten der Lagergassen und damit einhergehend ein Abfall der Umschlagsleistung gegenüber.



**Abbildung 2-11:** Übergabe der Ladeeinheiten an die Fördertechnik der Lagervorzone bei positionsbezogener Sequenzierung

## 2.3.2 Gassenbezogene Lagerstrategien

Neben den gassenübergreifenden Strategien werden eine Reihe von Strategien eingesetzt, die Art und Umfang der durchzuführenden Arbeitsspiele in den Lagergassen beschreiben. Sie gliedern sich in:

- Spielart / Bewegungsstrategie
- Ruhepositionsstrategie
- Gassenwechselstrategie
- Nichtbeschäftigungsstrategie

Neben diesen gibt es eine weitere Art von Strategien, an denen sich der operative Ablauf der Spiele orientiert. Die Lagerstrategien bestimmen das konkrete Verhalten eines RBG bei der Lagerplatzvergabe und dem Zugriff auf Ladeeinheiten. Die Strategien werden nach ihrem Zeitpunkt der Einflussnahme im Arbeitsspiel gegliedert:

- Einlagerstrategie
- Auslagerstrategie
- Umlagerstrategie
- Übergabepunktstrategie
- Reihenfolgestrategie

### 2.3.2.1 Spielart / Bewegungsstrategie

Die Spielart gibt den groben Bewegungsablauf eines Arbeitsspiels vor. Die Strategie bestimmt, wie viele Ein- und Auslagerungen innerhalb eines Arbeitszyklus durchgeführt werden. Entscheidend für die Anzahl der Lagervorgänge, die innerhalb eines Arbeitsspiels durchgeführt werden können, ist die Konfiguration des Lastaufnahmemittels. Bei einem RBG mit drei LAM ist es möglich, bis zu drei Ein- und drei Auslagervorgänge in einem Arbeitsspiel durchzuführen.

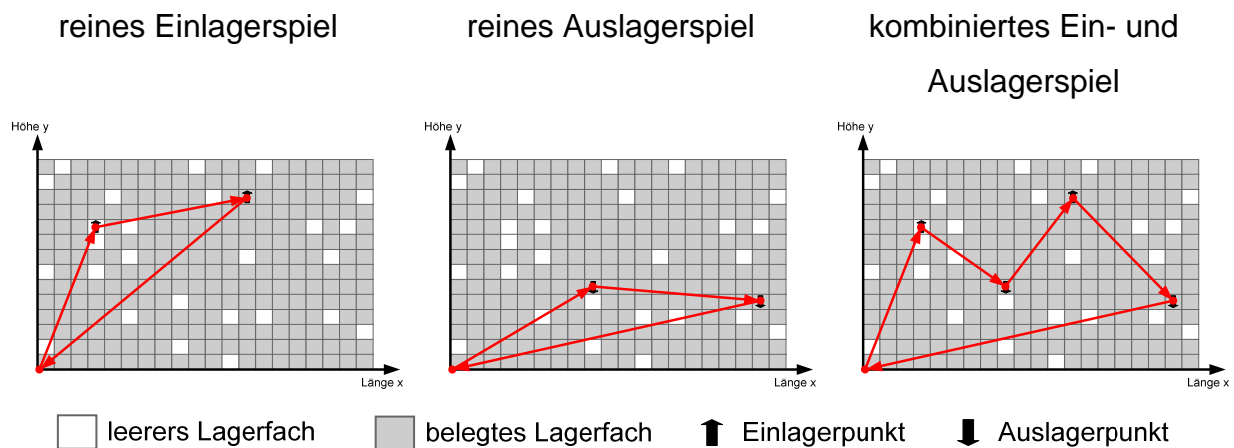
Es gibt drei verschiedene Spielarten, die in einem Lagersystem zur Anwendung kommen.

- *reines Einlagerspiel*  
Liegen einer Lagergasse in einem Zeitabschnitt nur Einlageraufträge vor, führt das RBG ausschließlich Arbeitsspiele durch, welche Ladeeinheiten einlagern.



- *reines Auslagerspiel*  
Sind an die Lagergasse hingegen nur Auslageraufträge gerichtet, führt das RBG nur Auslagerspiele durch, welche Auslagervorgänge beinhalten.
- *kombiniertes Ein- und Auslagerspiel*  
Liegen in einer Lagergasse sowohl Ein- als auch Auslageraufträge vor, führt das RBG kombinierte Arbeitsspiele durch, welche beide Lagervorgänge in einem Spiel vereinigen. Im Vergleich zu separat durchgeführten reinen Ein- und reinen Auslagerungen entfallen damit RBG-Fahrten und es wird Zeit eingespart.

Bei einer Planung ist die Grenzleistung des Lagersystems ausschlaggebend, weshalb im Hinblick auf eine möglichst hohe Umschlagsleistung sämtliche LAM der RBG ausgenutzt werden. Die dazu notwendigen Arbeitsspiele umfassen die maximal mögliche Anzahl an Lagervorgängen. Bei der Lagerkonfiguration mit zwei LAM (Abbildung 2-12) werden beim reinen Einlagerspiel zwei Einlagervorgänge durchgeführt. Das kombinierte Ein- und Auslagerspiel umfasst die Einlagerungen zweier Ladeeinheiten und die Auslagerungen ebenfalls zwei Ladeeinheiten.



**Abbildung 2-12:** Beispiel der drei verschiedenen Spielarten im einfachtiefen Lager mit zwei Lastaufnahmemitteln

In den meisten Lagersystemen treten unterschiedliche Lastanforderungen auf und die durchgeführten Spielarten passen sich der Intensität der temporären Materialströme an. Bei der Planung kann diesem dynamischen Aspekt nur dadurch Rechnung getragen werden, dass die Zusammensetzung der Anteile der reinen Ein- oder Auslagerspiele und der kombinierten Spiele am Gesamtaufkommen abgeschätzt

wird. Mittels eines Vergleichs von Simulationsergebnissen zeigt Lee [Lee-97a], dass diese Annahme häufig unzuverlässig ist und Hur [Hur-04] beziffert den Fehler, der dadurch in der Abschätzung der Umschlagsleistung auftritt, mit bis zu 20%.

### 2.3.2.2 Ruhepositionsstrategie

Die Ruhepositionsstrategie bestimmt die Position, in welcher das RBG nach Beendigung des Arbeitsspiels verharnt. Je nach Verteilung der Auftragseingänge kann es sinnvoll sein, einen zukünftigen Einlagerauftrag zu antizipieren und das RBG nach Beendigung eines Arbeitsspiels zum ÜE zu fahren, oder das RBG in der Regalwand verharren zu lassen, um schneller auf Auslagerungsaufträge zu reagieren. Bozer und White [Boz-84] beschreiben vier mögliche Ausprägungen der Ruhepositionsstrategie:

- *Verweilen am letzten Aktionsort*  
Nach einem Auslagerspiel oder einem kombinierten Spiel verweilt das RBG am ÜA. Nach einem reinen Einlagerspiel verharnt das RBG in der Regalgasse und ist daher bei einer eventuell folgenden Auslagerung näher am Auslagerfach. Diese Strategie hat den Vorteil, dass unnötige Fahrten vermieden werden und bei maximaler Auslastung die höchstmögliche Umschlagsleistung erzielt werden kann.
- *Rückkehr zum ÜE beim Einlagerspiel - Verweilen am ÜA beim Auslagerspiel und kombinierten Spiel*  
Die Strategie ist ähnlich zur ersten Strategie mit dem Unterschied der Rückkehr zum ÜE nach einer Einlagerung. Ist das RBG nicht voll ausgelastet und es folgt nach einer Ruhepause eine Einlagerung, ist das RBG schon dafür bereit. Folgt hingegen ein Auslagerspiel, war die Ausfahrt nicht sinnvoll.
- *Rückkehr zum ÜE*  
Nach jedem Arbeitsspiel kehrt das RBG zum ÜE zurück. Die Strategie zielt darauf ab, Einlageraufträge unmittelbar ausführen zu können.
- *Fahrt in die Regalgasse*  
Durch den Abschluss eines jeden Arbeitsspiels mit der Fahrt des RBG in die Regalgasse kann das RBG sehr schnell auf Auslageraufträge reagieren.

Einen umfassenden Überblick über bestehende Berechnungsmodelle geben Chang und Egbelu [Cha-97]. Außerdem beschreiben sie ein Verfahren zur Bestimmung der optimalen Ruheposition für RBG.

In einem System, in welchem reine Ein- und Auslagerspiele sowie kombinierte Spiele vermischt auftreten, hat die Ruhepositionsstrategie einen wesentlichen Einfluss auf die Umschlagsleistung. Sie bestimmt den Endpunkt der Arbeitsspiele und damit auch den Anfangspunkt für die darauf folgenden Spiele. Lee [Lee-97a], Hur [Hur-04] sowie Bozer und Cho [Boz-05] entwickeln eine Berechnungsmethode unter der Berücksichtigung stochastischer Auftragseingänge, basierend auf einem Warteschlangenmodell.

### **2.3.2.3 Gassenwechselstrategie**

Beim Einsatz von kurvengängigen RBG oder von Umsetzvorrichtungen am Gassenende sind die RBG nicht mehr an eine einzige Lagergasse gebunden, sondern können mehrere Gassen bedienen. Die Spielzeiten hängen dabei von den jeweiligen Strategien für die Ein- und Auslagerung sowie der Auftragsstruktur ab, welche die Anzahl der Regalgangwechsel bestimmt. [VDI3561-2]

Die Strategien für den Gassenwechsel sind vielfältig und vom jeweiligen Artikelspektrum und der maximal zulässigen Zeit, bis ein Artikel aus- oder eingelagert ist, abhängig. Die Gassenwechsel sind unvermeidbar, um die Artikel aller Gassen bedienen zu können. Die Strategien zielen darauf ab, möglichst wenige Wechsel durchzuführen, da diese zeitaufwändig und nicht produktiv sind. In der Praxis werden deshalb Auftragspositionen einer Lagergasse zusammengefasst und gemeinsam abgearbeitet, um die notwendigen Wechselvorgänge zu reduzieren.

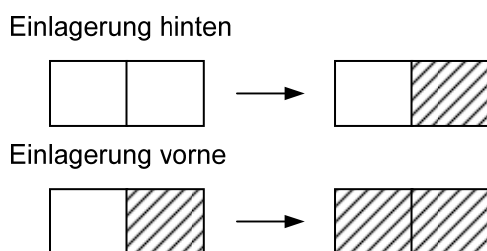
### **2.3.2.4 Nichtbeschäftigungsstrategie**

Die Ruhezeit eines RBG kann dazu genutzt werden, die Lagerbelegung vorteilhaft für zukünftige Aufträge zu verändern. Beispielsweise ist es möglich, Artikel mit hoher Zugriffswahrscheinlichkeit in die Nähe des ÜA einzulagern, um somit bei späteren Auslagerungen kürzere Fahrwege zurücklegen zu können. Auch ist es möglich, dass das RBG in den Zeiten der Beanspruchung nur kurze Wege fährt und die Ladeeinheiten temporär in der Nähe des ÜE einlagert. In den Ruhephasen können diese Ladeeinheiten dann gleichmäßig in der Regalwand verteilt werden [Jai-90]. Für die Planung von automatischen Lagersystemen ist die Nichtbeschäftigungsstrategie nicht relevant, da bei Vollaustlastung keine Ruhephasen auftreten.

### 2.3.2.5 Einlagerstrategie

Eine Einlagerstrategie kommt sowohl in einfachtiefen als auch doppeltiefen Lagern zum Einsatz und bestimmt das Lagerfach in der Regalwand, in welches eine Ladeinheit eingelagert wird. Die Strategie bestimmt die Belegungscharakteristik eines Lagers und versucht im Allgemeinen eine gleichverteilte Anordnung der Ladeeinheiten in der Regalwand zu erreichen. Diese Gleichverteilung (auch als *chaotische Lagerung* bezeichnet) hat einen positiven Einfluss auf die Statik des Regals, aber auch auf die erzielbare Umschlagsleistung. Sind die Ladeeinheiten ungleichmäßig verteilt, bedingt das sehr dichte Lagerbereiche mit einem partiell hohen Lagerfüllgrad. Diese Verdichtung wirkt sich negativ auf die folgenden Einlagerspiele aus und vermindert die erzielbare Umschlagsleistung. Im doppeltiefen Lager verstärkt sich der Effekt durch einen zusätzlichen höheren Anteil an Umlagerungen (vgl. Abschnitt 4.4.2.3).

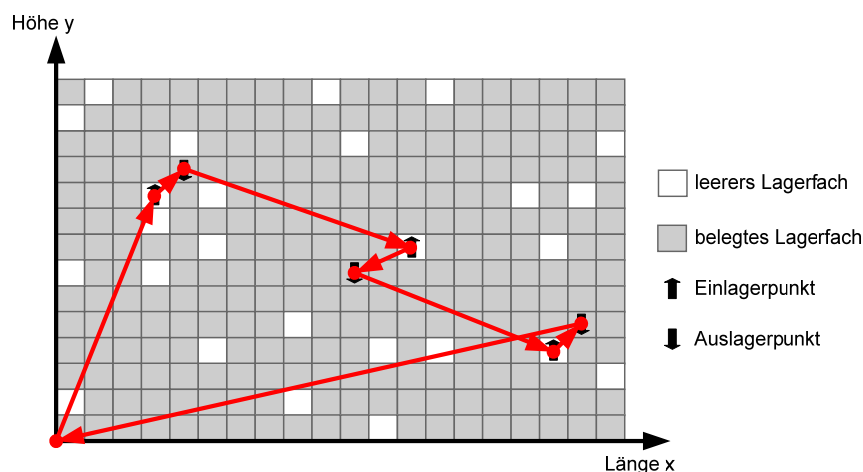
Eine der wichtigsten Einlagerstrategien ist die *zufällige Fachauswahl*. Bei dieser Strategie wird das Einlagerfach zufällig aus sämtlichen freien Lagerfächern einer Lagergasse ausgewählt. Durch die zufällige Auswahl ist die Gleichverteilung in der Regalwand sichergestellt. Bei doppeltiefen Lagern erfolgt die Auswahl auf Basis der Lagerkanäle mit mindestens einem leeren Lagerfach. Die Einlagerung erfolgt dort in das hintere Fach eines leeren oder in das vordere Fach eines einfach belegten Lagerkanals (vgl. Abbildung 2-13). Durch dieses Vorgehen werden keine freien Lagerfächer verdeckt und die gesamte Lagerkapazität kann genutzt werden.



**Abbildung 2-13:** Zustandsänderungen eines Lagerkanals im doppeltiefen Lager bei einem Einlagervorgang

Im Allgemeinen stehen bei einem kombinierten Ein-/ Auslagerspiel die Auslagerfächer fest, während die Einlagerfächer frei ausgewählt werden können. Bei der Strategie *Einlagerung nahe Auslagerung* wird das Einlagerfach nicht mehr rein zufällig

ausgewählt, sondern in der unmittelbaren Nähe des nächsten Auslagerfachs gesucht. Entscheidend ist die kürzeste Fahrzeit vom Einlager- zum Auslagerfach. Im besten Falle kann die Einlagerung in der gegenüberliegenden Regalwand stattfinden und es fällt kein zusätzlicher Fahrweg an. Je höher der Lagerfüllgrad ist, desto unwahrscheinlicher wird ein naher freier Lagerplatz und desto größer wird die zeitliche Distanz zwischen Einlager- und Auslagerfach. Gibt es mehrere Fächer, die denselben zeitlichen Abstand haben, wird aus diesen zufällig ausgewählt. Bei praxisnahen Lagerfüllgraden ist mit der Strategie *Einlagerung nahe Auslagerung* eine deutliche Steigerung der Umschlagsleistung im Vergleich zur *zufälligen Fachauswahl* zu verzeichnen. Das Arbeitsspiel sieht bei dieser Strategie zuerst eine Einlagerung und unmittelbar darauf eine Auslagerung vor. Bei mehreren LAM wiederholt sich dieser Vorgang entsprechend oft (vgl. Abbildung 2-14).



**Abbildung 2-14:** Sechsfachspiel mit drei kombinierten Ein- und Auslagerungen

Bei doppelbreiten LAM kommt oft die leicht abgewandelte Strategie *Mehrfacheinlagerungen nahe Auslagerung* zum Einsatz. Bei dieser Strategie werden beide hintereinander auf einem LAM positionierten Ladeeinheiten gleichzeitig in einen leeren Lagerkanal eingelagert. Der Vorteil eines eingesparten LAM-Zyklus wiegt den Nachteil einer tendenziell längeren Fahrt zum nächsten Auslagerfach auf. Die längere Fahrt leitet sich aus der Notwendigkeit ab, nur mehr leere Lagerkanäle anstatt auch einfach belegte Kanäle in der Nähe zu finden.

Neben diesen wichtigen Einlagerstrategien gibt es noch eine Reihe weiterer Strategien, welche an dieser Stelle erwähnt werden sollen, im Projektverlauf aber nicht

weiter behandelt werden. Eine davon ist die Strategie *Einlagerung in das nächste Auslagerfach* [Mel-97] welche beim Einsatz mehrerer LAM geeignet ist. Sie sieht am Anfang des Arbeitsspiels eine Einlagerung mit *zufälliger Fachauswahl* vor, um einen freies LAM zu erhalten. Im Anschluss kann bei jeder Auslagerung in dasselbe Fach die nächste Einlagerung getätigt werden. Da in der Praxis die LAM eine geometrische Ausdehnung besitzen und nicht auf einen Punkt konzentriert sind, fällt bei den Wechseln dennoch eine kurze Zwischenfahrt von mindestens einem Fachabstand an. Die Strategie ist bei mehreren LAM sinnvoll, ist der einfacheren Strategie *Einlagerung nahe Auslagerung* aber sehr ähnlich und wird deshalb nicht weiter betrachtet. Die Strategie *Einlagerung nahe des Übergabepunkts* bevorzugt die leeren Lagerfächer, bzw. Lagerkanäle in der Nähe des ÜEA. Dem kurzfristigen Vorteil kürzerer Fahrwege stehen die bereits beschriebenen Nachteile durch die sehr kompakt gefüllten Lagerbereiche gegenüber.

Eine verwandte Strategie ist die *Zonierung*. Bei dieser Strategie wird das gesamte Artikelspektrum nach der Umschlagshäufigkeit gegliedert. Artikel mit häufigem Zugriff werden in Bereichen nahe dem ÜEA-Punkt gelagert, seltener benötigte Artikel weiter weg. Der Vorteil dieser Strategie ist geringer als oftmals angenommen wird [Gud-72a] und meist kleiner als bei anderen leistungssteigernden Einlagerstrategien. Hinzu kommt die in der Praxis oftmals schwierige Klassifizierung der Artikel sowie schwankende Zugriffshäufigkeiten auf den Artikelbestand. Der größte Nachteil in der Anwendung der Strategie entsteht bei kombinierten Ein-/ Auslagerspielen oder bei der Verwendung von mehreren LAM. In diesem Fall müssen bei dieser umschlagbasierten Lagerung meist mehrere Zonen angefahren werden und eine anfängliche Fahrwegverkürzung wird zunichte gemacht.

Als letzte Strategie wird an dieser Stelle noch die *Einlagerung auf dem Weg zur Auslagerung* angeführt. Diese Strategie versucht Einlagerfächer zu nutzen, an welchen das RBG vorbeikommt, wenn es zum Auslagerfach fährt. Die Strategie ist mit allen Lagerkonfigurationen kompatibel, hat jedoch den Nachteil einer konstanten Verschiebung der Ladeeinheiten in Richtung des ÜEA. Da von diesem Punkt alle Arbeitsspiele starten, ist dort die Wahrscheinlichkeit einer Einlagerung größer als im hinteren Teil des Regals. Mittels Simulation kann belegt werden, dass mit der Zeit die Lagerbelegung jener der Strategie *Einlagerung nahe dem ÜEA* entspricht und die maximal erzielbare Umschlagsleistung niedriger als bei einer gleichverteilten Belegung ist.

### 2.3.2.6 Auslagerstrategien

Die Auslageraufträge werden vom Lagerverwaltungssystem den einzelnen RBG zugewiesen. In den meisten Fällen hat das RBG die Möglichkeit, auf mehrere gleiche Ladeeinheiten des geforderten Artikels zuzugreifen. Die innerhalb einer Regalgasse am häufigsten verwendete Strategie zur Bestimmung der auszulagernden Ladeeinheit ist die *FIFO-Strategie* (First In First Out). Damit ist sichergestellt, dass die ältesten Artikel zuerst ausgelagert werden und keine Überalterung des Lagerbestands eintritt. In manchen Branchen wie z. B. der Lebensmittelbranche werden Artikel chargenweise eingelagert. Die Artikel einer Charge sind prinzipiell identisch und unterscheiden sich nicht in ihrem Herstellungsdatum. In diesem Falle kann vom strengen FIFO-Prinzip abgewichen werden und eine *schwache-FIFO-Strategie* zum Einsatz kommen. Dadurch ist es der Steuerung des RBG möglich, das Auslagerfach aus  $n$  Fächern auszuwählen, welche allesamt Artikel derselben Charge beinhalten. Die *schwache FIFO-Strategie* ermöglicht somit eine Fahrwegoptimierung durch Reihenfolgestrategien (vgl. Abschnitt 2.3.2.9).

Ähnliche Auswirkungen hat eine Auslagerstrategie, welche der Steuerung des RBG die *freie Wahl über die Auswahl der nächsten Auslageraufträge* überlässt. Unter Berücksichtigung stochastischer Schwankungen im Auftragseingang müssen in einem Lager, das nahe der Grenzleistung betrieben wird, Warteschlangen für die Auslageraufträge vorgesehen werden, die jene Aufträge zwischenspeichern, die nicht unmittelbar abgearbeitet werden können. Ist in dem Lager keine Sequenzierung vorgesehen, muss das RBG die Aufträge der Warteschlange nicht nacheinander abarbeiten. Mit dem Ziel einer Fahrwegoptimierung können günstig gelegene Aufträge zusammengefasst und vorgezogen werden. Die mittlere Länge der Warteschlange bestimmt das Einsparpotenzial der Strategie.

Auslagerstrategien bei denen der Einlagerzeitpunkt keine Relevanz besitzt, sind die Ausnahme und werden nicht betrachtet.

### 2.3.2.7 Umlagerstrategie

Im doppeltiefen Lager kann eine Auslagerung den Zugriff auf eine verdeckt stehende Ladeeinheit bedingen. Dieser kann erst nach einer Umlagerung der im Lagerkanal vorne gelegenen Ladeeinheit erfolgen. Mit steigendem Lagerfüllgrad erhöht sich die

Anzahl der doppelt belegten Lagerkanäle und damit auch die Wahrscheinlichkeit von Umlagerungen.

Ist die vordere Ladeeinheit auf das LAM aufgenommen, ähneln die Umlagerstrategien sehr stark den Einlagerstrategien. Es gilt einen Einlagerkanal zu finden, dort die umzulagernde Ladeeinheit einzulagern und wieder zum Auslagerkanal zurückzukehren.

Eine sehr häufige Umlagerstrategie ist demzufolge die *Umlagerung nahe Auslagerung*. Die Strategie ähnelt der *Einlagerung nahe Auslagerung* (vgl. Abschnitt 2.3.2.5). Kommt letztere parallel zur Umlagerstrategie zum Einsatz, nehmen die Umlagerfahrten tendenziell mehr Zeit in Anspruch, da bereits das zum Auslagerkanal nächstgelegene leere Lagerfach von einer Einlagerladeeinheit besetzt ist.

Prinzipiell ist es auch möglich, den Umlagerkanal zufällig auszuwählen. Der Zeitaufwand für die Hin- und Rückfahrt ist allerdings im Vergleich zur erstgenannten Strategie beträchtlich größer, weshalb die Strategie *zufällige Umlagerung* in der Praxis keine Bedeutung besitzt.

In der Lagerkonfiguration mit doppelbreiten LAM existiert eine weitere wichtige Umlagerstrategie mit dem Namen *kombinierte Aus- und Umlagerung*. Wird eine Auslagerung einer verdeckt stehenden Ladeeinheit mit einem leeren doppelbreiten LAM durchgeführt, werden dabei beide Ladeeinheiten aufgenommen. Die umzulagernde Ladeeinheit kann dann in der Nähe des Auslagerkanals eingelagert werden. Da die Auslagerladeeinheit eine Seite des LAM blockiert, kann die umzulagernde Ladeeinheit nur in der gegenüberliegenden Regalwand eingelagert werden.

Bei der Verwendung von mehreren LAM ist es möglich, freie LAM als Zwischenpuffer für die umzulagernden Ladeeinheiten zu benutzen. Die umzulagernde Ladeeinheit wird somit mit zum nächsten Auslagerfach gefahren und, falls möglich, nach der Auslagerung in den selben Lagerkanal eingelagert, oder vor der Auslagerung im zum Auslagerkanal nächstgelegenen freien oder einfach belegten Lagerkanal eingelagert. Zeitvorteile können aber nur im erstgenannten Fall im Vergleich zur Umlagerung nahe Auslagerung auftreten. Diese Strategie mit dem Namen *Umlagerung in das nächste Auslagerfach* kann bei einer Lagerkonfiguration mit drei LAM nur bei der ersten Auslagerung angewendet werden. In diesem Fall ist nach der Auslagerung ein



LAM mit der tatsächlichen gewollten Auslagerladeeinheit und eines mit der umzula-gernden Ladeeinheit belegt. Das dritte LAM steht für die zweite Auslagerung bereit. Wegen der eingeschränkten Anwendungsmöglichkeit und geringen praktischen Bedeutung wird diese Strategie nicht weiter betrachtet.

### **2.3.2.8 Übergabepunktstrategie**

Eine Übergabepunktstrategie kommt bei der Lastauf- und Lastabgabe und sich am Ende einer Lagergasse direkt gegenüber liegenden ÜE und ÜA zur Anwendung. In diesem Fall muss das RBG keine Wechselfahrt zwischen den beiden Punkten durchführen. Bei großen Ladeeinheiten, z. B. im Palettenhochregallager, sind dabei zwei Arbeitsschritte des LAM notwendig. Im ersten Schritt wird die Ladeeinheit abgegeben, um dann im zweiten Schritt die einzulagernde Ladeeinheit aufnehmen zu können (*getrennte Abgabe und Aufnahme*). Im Kleinteilebereich kommen häufig LAM zum Einsatz, mit welchen die *Abgabe und Aufnahme der Ladeeinheiten parallel* erfolgen kann. Bei dieser Strategie<sup>6</sup> sind die Übergabepunkte so konstruiert, dass die Auf- und Abgabe der Ladeeinheiten gleichzeitig erfolgen und somit in Summe Zeit eingespart wird.

### **2.3.2.9 Reihenfolgestrategie**

Besitzt das Regalbediengerät mehrere LAM und die Steuerung die Möglichkeit mehr als einen Punkt in der Regalwand als nächstes anzufahren, ist es sinnvoll, eine Anfahrreihenfolge zu wählen, die einen möglichst zeitgünstigen Gesamtfahrweg ermöglicht. Die Anzahl der frei anzufahrenden Punkte hängt maßgeblich mit der Ein- und Auslagerstrategie zusammen. Bei der Strategie *zufällige Einlagerung* im kombinierten Ein- und Auslagerspiel mit drei LAM müssen beispielsweise drei Einlagerfächer und drei Auslagerfächer angefahren werden. Nach der ersten Einlagerung stehen drei Auslagerfächer zur Auswahl. Nach erfolgter Auslagerung kann das RBG aus den zwei übriggebliebenen Einlagerfächern wählen. Ist dort der Lagervorgang abgeschlossen, kann ein letztes Mal aus zwei Auslagerfächern gewählt werden. Danach sind die verbliebenen Ein- und Auslagerfächer und damit der Fahrweg fest vorgegeben.

---

<sup>6</sup> auch als Doppelzyklusstrategie bekannt

Kommt bei derselben Lagerkonfiguration mit drei LAM die Strategie *Einlagerung nahe Auslagerung* zum Einsatz, reduziert sich die Fahrwegoptimierung auf die drei Auslagerfächer. Die Einlagerfächer sind in diesem Fall bereits durch die Strategie an die Auslagerfächer gebunden.

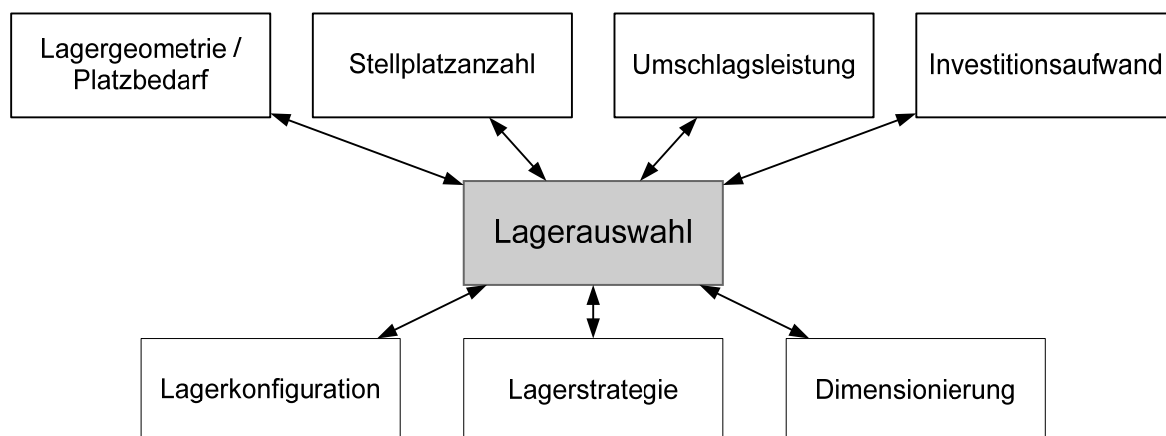
Auch die Auslagerstrategie hat Einfluss auf die Anzahl der potenziell anzufahrenden Lagerfächeroptionen. Bei der Strategie *schwaches-FIFO* oder der *freien Wahl über die nächsten Auslageraufträge* kann aus mehreren Lagerfächern ausgewählt werden. Die Fahrwegoptimierung, die in diesen Fällen vorgenommen werden kann, entspricht dem klassischen Rundreiseproblem (engl. Traveling Salesman Problem), vgl. hierzu [Dom-85].

## 2.4 Planung eines automatischen Lagersystems

Die Projektierung und Verwirklichung eines automatischen Lagersystems läuft in mehreren Schritten ab. In der Vorbereitungsphase werden die Planungsvorgaben festgelegt, die alle planungsrelevanten Rahmenbedingungen definieren. Sie werden aus den Zielen und den Anforderungen an das Lager abgeleitet. Zudem wird der Projektablauf strukturiert und in zeitlich aufeinander abgestimmte Phasen unterteilt. Meilensteine kennzeichnen die Zwischenziele und ihren Endtermin und dienen später der Projektkontrolle. In der ersten eigentlichen Projektphase, der Grobplanungsphase, werden mehrere Planungsvarianten erarbeitet und miteinander verglichen. Die Planungsvarianten genügen den Anforderungen der Planungsvorgaben und unterscheiden sich in Lagerkonfiguration, -strategie und Dimensionierung. Nach der Ausarbeitung werden sie hinsichtlich Machbarkeit, Eignung und Wirtschaftlichkeit bewertet. Die Kosten werden dabei grob abgeschätzt und können im Bereich von 10 bis 30 % von den tatsächlichen Realisierungskosten abweichen. Nach dem Abschluss dieser Phase stehen die Grundsatzentscheidungen bezüglich des Groblayouts und des Kostenrahmens fest. In der darauf folgenden Feinplanung wird das Lagersystem detailliert ausgeplant und der Ablauf des Baus festgelegt. Die Spezifikationen der einzelnen Lagerkomponenten werden festgelegt und aufeinander abgestimmt. Die Kostenschätzung wird daraufhin verfeinert. Die Spezifikationen und Anforderungen der Feinplanung werden in der Ausschreibungsphase in Form eines Lastenheftes zusammengestellt, welches die Basis für die Angebote verschiedener Lieferanten bildet. In der Verhandlungsphase werden die Lieferanten für das Projekt ausgewählt

und es erfolgt die Freigabe für die Realisierungsphase. Die Errichtung des Lagersystems nimmt im Normalfall mehrere Monate in Anspruch. Nach Abschluss der Arbeiten erfolgt die Abnahme und Übergabe durch eine staatlich befugte Prüfinstitution und den Auftraggeber. Die Prüfinstitution stellt sicher, dass alle gesetzlichen Bauvorschriften eingehalten werden, der Auftraggeber prüft, ob die Spezifikationen korrekt umgesetzt sind. Nach der Übergabe ist die Errichtung offiziell beendet und das Lager wird in Betrieb genommen. [Fml-10a]

Das Ziel der integrierten Planungsvorgehensweise ist die Unterstützung des Planers in der Grobplanungsphase. Diese ist die Ausgangsbasis der weiteren Planungen und fehlerhafte Entscheidungen haben dementsprechend auch große Auswirkungen im weiteren Projektverlauf. Die Lagersystemplanung ist in dieser Phase ein in sich geschlossenes, komplexes System, auf das eine Vielzahl an Einflussgrößen einwirkt (siehe Abbildung 2-15). Die Parameter beeinflussen sich gegenseitig und sind teilweise gegenläufig.



**Abbildung 2-15:** Einflussgrößen auf die Lagersystemplanung

Die Anzahl der geforderten Stellplätze wird häufig aus der Artikelstruktur, den Produktionslosgrößen und dem Sicherheitsbestand abgeleitet. Die zur Verfügung stehende Fläche wird durch die jeweiligen Gegebenheiten vor Ort bestimmt. Es kann sein, dass das Lager in bestehende Strukturen eingegliedert werden soll oder mit wenigen Beschränkungen auf der grünen Wiese geplant wird. Die letzte Planungsvorgabe stellt die Umschlagsleistung dar, welche das Lagersystem erbringen muss. Die Leistung ergibt sich aus den Zu- und Abgängen an Ladeeinheiten, die pro Zeit-

einheit in das bzw. aus dem Lager führen. In den meisten Fällen wird die Auslegung des Systems auf die Belastungsspitze erfolgen. Die technischen Einflussgrößen, welche den Planungsvarianten zugrunde liegen und die Ausführungsform bestimmen, sind die Lagerkonfiguration, die Lagerstrategie und die Dimensionierung.

Obwohl der Detaillierungsgrad in der Grobplanungsphase noch sehr niedrig ist, werden aus Zeit- und Kostengründen nur einige wenige Alternativen untersucht. Ein automatisiertes Planungswerkzeug, welches den Suchraum in dieser Phase erweitert und eine fundierte Planungsgrundlage für die weiteren Planungsphasen darstellt, stellt einen signifikanten Mehrwert für den Planer dar. Mit dem zunehmendem Detaillierungsgrad in der Feinplanungsphase müssen immer mehr Besonderheiten beachtet werden, was eine automatische Auslegung erschwert und als nicht sinnvoll erscheint.

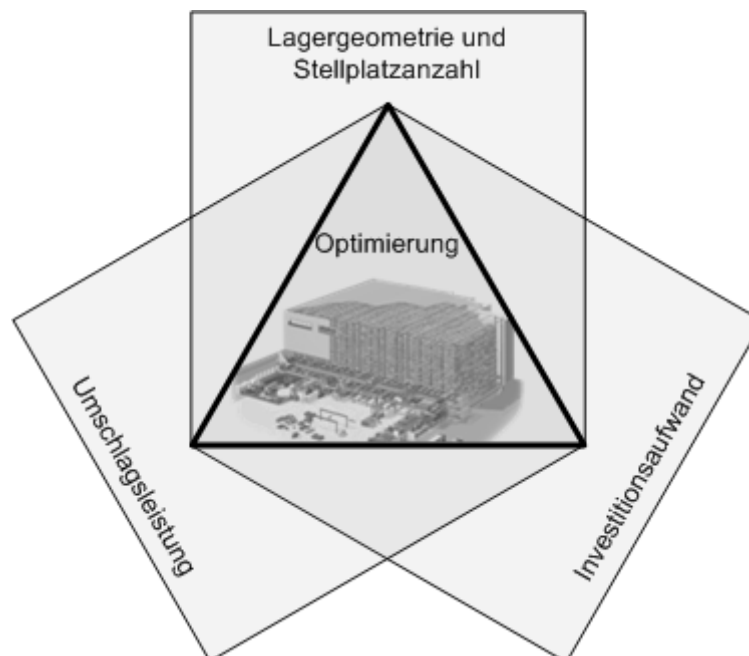
### **2.4.1 Konventionelle Lagersystemplanung**

Die konventionelle Planungsvorgehensweise ist ein komplexer Prozess, der iterativ durchlaufen wird. Die Vielzahl an Abhängigkeiten zwischen den Planungsgrößen wird durch den sequenziellen Ablauf nur bedingt berücksichtigt. Der Planungsvorgang startet mit der Erstellung eines Groblayouts. Dabei werden die Planungsvorgaben bezüglich der maximal zur Verfügung stehenden Fläche bzw. Höhe und der geforderten Stellplatzanzahl berücksichtigt. Anschließend erfolgt die Berechnung der Umschlagsleistung und der Kosten. Kann die geforderte Leistung nicht erreicht werden oder ist der entstehende Investitionsaufwand zu hoch, erfolgt ein Rücksprung zum ersten Schritt und das Layout wird anders gestaltet. Das Ausarbeiten des Layouts ist aufwendig und fordert Erfahrung des Planers, da dieser bereits abschätzen muss, welche Auswirkungen veränderte Lagerdimensionen oder Lagerkonfigurationen haben. Die Lagerbetriebsstrategien werden häufig nicht als Planungsparameter betrachtet, da sie in der analytischen Umschlagsleistungsberechnung schwierig abzubilden sind. Erst bei einer Absicherung mittels Simulation werden die Strategien berücksichtigt, dies erfolgt jedoch meist erst in der Feinplanungsphase, in welcher die Variantenauswahl bereits getroffen ist. Die sequenzielle Planungsvorgehensweise ist aufwendig und führt zu suboptimalen Lösungen. Häufig sind Lagersysteme falsch dimensioniert und erbringen eine zu hohe oder zu niedrige Leistung und können deshalb nicht effizient und wirtschaftlich betrieben werden.

## 2.4.2 Integrierte Lagersystemplanung

Den Kernpunkt der wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Problemstellung stellt die Entwicklung einer neuen Planungsvorgehensweise dar, welche die Nachteile der konventionellen Planungsvorgehensweise eliminiert und den Planer in seiner Arbeit unterstützt. Die Zusammenführung und parallele Berechnung der Leistung, Stellplatzanzahl und Kosten führt zu einer neuen Planungsvorgehensweise, welche über eine mehrdimensionale Optimierung die Suche nach der optimalen Lösung ermöglicht.

Die Planungsvorgehensweise basiert dabei auf drei Teilmodellen: Einem Modell zur Geometrie- und Stellplatzberechnung, welche die gängigen Lagerausführungsformen abdeckt, einem Modell zur Umschlagsleistungsberechnung, welches die Berücksichtigung von praxisrelevanten Lagerkonfigurationen und Lagerstrategien ermöglicht und einer Methodik zur Schätzung des Investitionsaufwandes für das automatische Lagersystem. Der Parameterbereich, in welchem eine Planungsvariante mit allen drei Modellen bewertet werden kann, stellt den Suchraum einer automatischen Optimierung dar (siehe Abbildung 2-16).



**Abbildung 2-16:** Teilmodelle zur Bewertung eines automatischen Lagersystems

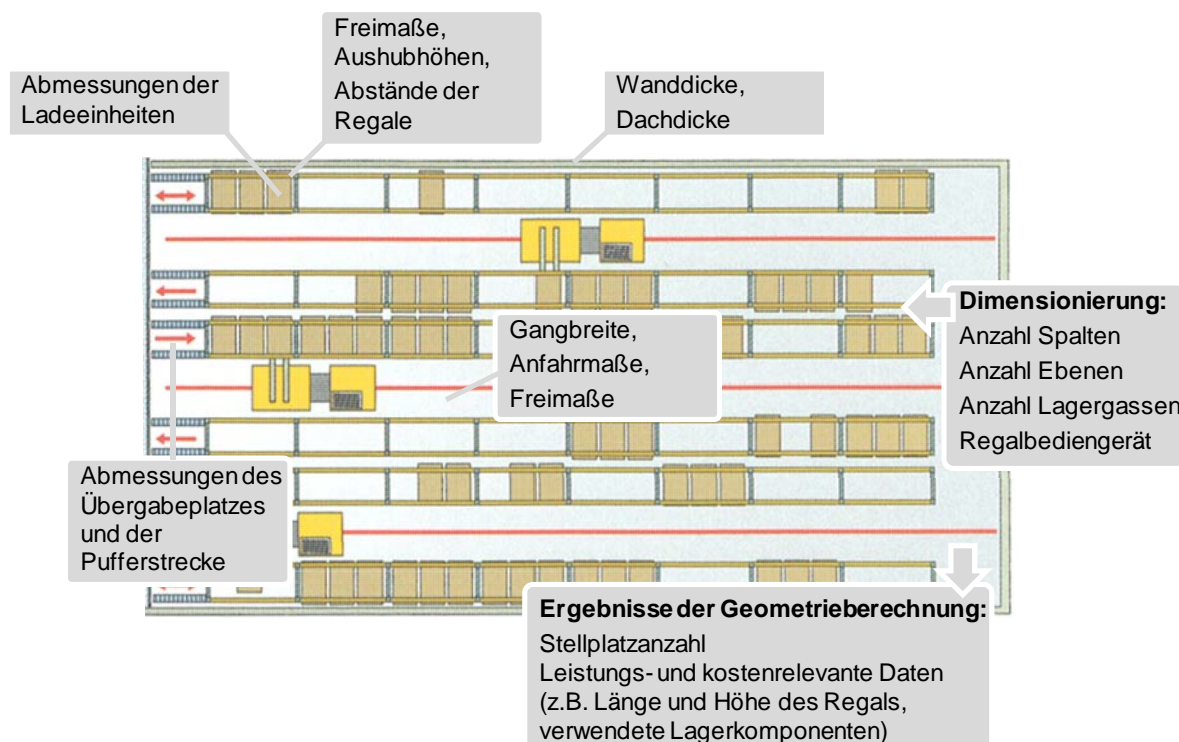


### 3 Berechnung der Lagergeometrie und Stellplatzanzahl

Mittels einer exakten Berechnung der Lagergeometrie werden die Anzahl der Stellplätze und die Abmessungen des Lagergebäudes bestimmt. Der physische Aufbau eines automatischen Lagersystems besteht aus Lagerkomponenten, die unterschiedlich ausgeführt und angeordnet sein können. Das gesamte Lagergebäude steht auf einer Bodenplatte, die in Abhängigkeit der Traglast verschieden stark ausgeführt wird. Auf der Bodenplatte verankert setzen die Regalkonstruktion und die Fahrschienen der RBG auf. Eine eventuelle Sprinkleranlage ist häufig in das Regalsystem integriert. Sowohl das Regalsystem als auch die Rohrleitungen der Sprinkleranlage werden durch die Bauhöhe in ihrer Ausführung beeinflusst. Die Steher eines Regals müssen beispielsweise bei großen Regalhöhen und/oder hohen Lasten massiver ausgeführt sein, um die resultierenden Kräfte aufnehmen zu können. Die Lagergassen sind über Pufferstrecken und Übergabepunkte an die Lagervorzone angebunden. Das gesamte Lagersystem wird von Wänden und einem Dach abgeschlossen. Neben den Verwendung findenden Lagerkomponenten wird die Lagergeometrie von der Dimensionierung bestimmt. Diese beschreibt die räumliche Ausdehnung des Lagersystems in den drei Dimensionen. Sie beschreibt damit die Anzahl der Spalten  $n_x$  und Ebenen  $n_y$  der Regalwände sowie die Anzahl der Lagergassen  $n_z$  die Ausgangsbasis zur Berechnung der Abmessungen des Lagergebäudes sind.

Die Parameter, welche Einfluss auf die Lagergeometrie haben, sind in Abbildung 3-1 abgebildet. Die Abbildung veranschaulicht den gebräuchlichsten Lageraufbau. Dabei ist das Lager ein kubisches Gebäude, welches aus identisch aufgebauten Lagergassen besteht. Es sind aber auch Ausführungsformen möglich, welche mehrere Lagerbereiche vorsehen, die unterschiedlich dimensionierte Lagergassen mit verschiedenen großen Ladeeinheiten beinhalten. Ein wesentlicher Punkt, welcher die Geometrie und Investitionskosten beeinflusst, ist die Ausführungsform des Lagergebäudes. Dieses kann in Silobauweise oder in der konventionellen Hallenbauweise ausgeführt sein. Bei der Silobauweise übernimmt die Regalkonstruktion die tragende Funktion der Decke und der Wände. Bei der Hallenbauweise ist das Regalsystem frei in einer

selbsttragenden Halle untergebracht. In der Praxis kommt die Silobauweise bei Palettenlagern ab einer Höhe von etwa 18 m zum Einsatz.



**Abbildung 3-1:** Ablauf und Einflussparameter auf die Lagergeometrieberechnung (Bildquelle [Gal-09])

Für die automatische Auslegung sind das Lagergebäude aus Regalsystem mit Übergabepunkten, Pufferstrecken und den Regalbediengeräten sowie die umgebende Gebäudehülle aus Wänden, Decke und Bodenplatte relevant. Die Abgrenzung erfolgt zur Lagervorzone hin. Nicht mehr betrachtet wird demnach die Fördertechnik, welche die Lagergassen verbindet und mit Ladeeinheiten ver- und entsorgt. Während das Lagergebäude als geschlossenes System betrachtet werden kann, ist die Lagervorzone oft eng mit der Kommissionierung und der Produktion verzahnt. Sie kann sehr verschieden ausgeführt sein und ist damit nicht für die automatische Lagerauslegung geeignet.

Die Berechnung der Lagergeometrie erfolgt vom Kleinen ins Große. Die geometrischen Abmessungen der Lagerkomponenten werden auf Basis ihrer Anordnung und Ausrichtung der Dimensionierung entsprechend skaliert und auf das Lagersystem übertragen. Im ersten Schritt werden auf Basis der Abmessungen der Ladeeinheiten und deren Ausrichtung die Abmessungen eines Regalfelds berechnet und auf das



gesamte Regal hochskaliert. Sind die exakte Höhe und Länge der Regalwand bekannt, kann ein passendes RBG bestimmt werden. Die aus technischen Gründen benötigten Anfahrmaße und Freimaße des RBG sowie die Flächen für die Übergabepunkte und die Puffstellplätze werden zu den Regalwänden addiert. Die Abmessungen der damit berechneten Lagergasse werden auf das gesamte Lager übertragen und mit der Gebäudehülle umschlossen (vgl. Tabelle 3-1).

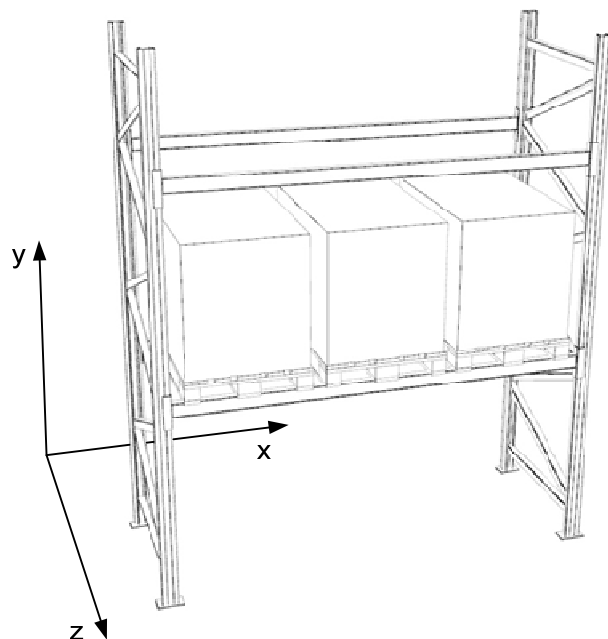
**Tabelle 3-1:** Vorgehensweise zur Bestimmung der Lagergeometrie

Ausgangsbasis	Dimensionierung des Lagersystems und Geometriedaten der Lagerkomponenten
Schritt 1	Regalfeld berechnen (vgl. Abschnitt: 3.1)
Schritt 2	Regalwand berechnen (vgl. Abschnitt: 3.2)
Schritt 3	Lagergasse berechnen (vgl. Abschnitt: 3.3)
Schritt 4	Lagergebäude berechnen (vgl. Abschnitt: 3.4)
<b>Ergebnis</b>	<b>Abmessungen des Lagergebäudes: Länge, Breite, Höhe</b>

### 3.1 Aufbau und Größe des Regalfelds

Die kleinste Einheit eines Regals ist das Regalfeld. Je nach Ausführungsform kann es ein bis drei Ladeeinheiten nebeneinander aufnehmen (Abbildung 3-2). Die Ladeeinheiten setzen sich aus einem Ladungsträger, wie z. B. eine EURO-Palette, oder einem VDA-Behälter und der Ladung zusammen. In automatisierten Lagersystemen darf die Ladung nicht über die Grundmaße des Ladungsträgers überstehen. Zum Regalfeld gehört neben den Ladeeinheiten ein Steher - und Querträgeranteil. Im Kleinteilelager nimmt jedes Feld nur einen Behälter auf. Die Behälter liegen dort i.d.R. auch nicht auf Querträgern, sondern auf Winkelauflagen oder Fachböden auf<sup>7</sup>. Im Palettenlager kommen meist drei- oder zwei-Platz-Systeme zum Einsatz.

<sup>7</sup> Bei Fachbödenregalen kann ein Regalfeld auch mehrere Behälter nebeneinander aufnehmen



**Abbildung 3-2:** Skizze eines Lagerfelds mit drei Ladeeinheiten

Zwischen den Ladeeinheiten wird der Abstand  $x_{LE-LE}$  und zum Steher hin  $x_{LE-S}$  eingehalten. Die Höhe eines Regalfelds  $H_{RF}$  ergibt sich aus der Höhe der Ladeeinheit sowie des Querträgers und der Aushubhöhe, die das RBG benötigt. Bei der doppel-tiefen Lagerung im HRL steht der hintere Ladungsträger leicht erhöht damit die Gabel einfahren kann. Für die vordere Ladeeinheit wird deshalb eine höhere Aushubhöhe angesetzt. Die Tiefe des Lagerfelds  $T_{RF}$  ist bei einfachtiefer Lagerung mit jener der Ladeeinheit identisch. Bei doppeltiefer Lagerung entspricht sie jener von zwei Ladeeinheiten mit dem Abstand  $z_{RF-RF}$  zwischen den Regalen:

$$L_{RF} = m \cdot B_{LE} + (m-1) \cdot x_{LE-LE} + 2 \cdot x_{LE-S} + B_S \quad (3-1)$$

$$H_{RF} = \begin{cases} H_{LE} + H_Q + y_{et} & \text{bei } etL \\ H_{LE} + H_Q + y_{et} + y_{dt} & \text{bei } dtL \end{cases} \quad (3-2)$$

$$T_{RF} = \begin{cases} T_{LE} & \text{bei } etL \\ 2 \cdot T_{LE} + z_{RF-RF} & \text{bei } dtL \end{cases} \quad (3-3)$$

mit:

$L_{RF}$	Länge des Regalfelds
$H_{RF}$	Höhe des Regalfelds
$T_{RF}$	Tiefe des Regalfelds

$B_{LE}$	Länge der Ladeinheit
$H_{LE}$	Höhe der Ladeinheit
$T_{LE}$	Tiefe der Ladeinheit
$x_{LE-LE}$	Abstand in x-Richtung zwischen Ladeeinheiten
$x_{LE-S}$	Abstand in x-Richtung zwischen Ladeeinheiten und Steher
$H_Q$	Höhe des Querträgers
$B_S$	Breite des Stehers
$y_{et}$	Aushubhöhe Ladungsträger bei einfachtiefer Lagerung
$y_{dt}$	Aushubhöhe Ladungsträger bei doppeltiefer Lagerung
$z_{RF-RF}$	Abstand in z-Richtung zwischen den Ladeeinheiten eines Regalfeldes bei doppeltiefer Lagerung
$m$	Lagerplätze pro Fach $\forall m \in \{1,2,3\}$

### 3.2 Abmessungen der Regalwand

Aus den Abmessungen des Regalfeldes werden jene der gesamten Regalwand berechnet. Um die Länge des Regals  $L_{RW}$  zu ermitteln, wird zuerst die ganzzahlige Anzahl der Regalfelder aus der Anzahl der Spalten  $n_x$  berechnet und dann mit der Länge eines Regalfelds multipliziert. Am Ende wird die Breite eines abschließenden Stehers addiert. Die Regalhöhe  $H_{RW}$  kann ebenfalls über die Höhe eines Regalfeldes und der Anzahl der Ebenen berechnet werden. Die Tiefe der Regalwand  $T_{RW}$  entspricht jener des Lagerfachs.

$$L_{RW} = L_{RF} \cdot [(n_x \setminus m) + 1] + B_S \quad (3-4)$$

$$H_{RW} = H_{RF} \cdot n_y \quad (3-5)$$

$$T_{RW} = T_{RF} \quad (3-6)$$

mit:

$L_{RW}$	Länge der Regalwand
$H_{RW}$	Höhe der Regalwand
$T_{RW}$	Tiefe der Regalwand
$n_x$	Anzahl Spalten
$n_y$	Anzahl Spalten

### 3.3 Platzbedarf einer Lagergasse

Eine Lagergasse besteht aus zwei gegenüberliegenden Regalwänden, dem Lagergang mit dem RBG und den Übergabepunkten mit Pufferplätzen. Die Länge der Gasse  $L_{LG}$  entspricht demnach der Summe der Regalwandlänge und des hinteren und vorderen Ausfahrtsmaßes des RBG. Diese Zonen sind für die Wartung und über das Regal hinausragenden Teile des RBG vorgesehen. Sind der Übergabepunkt und die Pufferstrecke länger als die für das RBG vorgesehene Zone, dann sind diese für die Gesamtlänge der Lagergasse ausschlaggebend. Die Regalwandhöhe mit dem unteren und oberen Anfahrtsmaß des RBG bestimmt die Höhe der Lagergasse  $H_{LG}$ . Das untere und obere Anfahrtsmaß geben die Abstände zwischen Bodenplatte und erstem Querträger bzw. dem oberen Abschluss des Regals und dem Dach wieder. In diesen Verlusthöhen sind die Fahrschienen und das Fahrwek berücksichtigt. Die Tiefe der Lagergasse  $T_{LG}$  setzt sich aus den beiden Regalwandtiefen und der Tiefe des Lagergangs zusammen. Diese wird von der Breite des LAM und den Freimaßen zum Regal bestimmt. Die Tiefe des Übergabepunkts entspricht normalerweise jener des Regals. Ist die Tiefe geringfügig größer, ist der überstehende Teil im üblichen Abstand zwischen den Regalwänden untergebracht:

$$L_{LG} = L_{RW} + \max(y_{RBG\ v}; L_{\ddot{U}P} + L_{PU}) + y_{RBG\ h} \quad (3-7)$$

$$H_{LG} = H_{RW} + y_{RBG\ u} + y_{RBG\ o} \quad (3-8)$$

$$T_G = 2 \cdot T_{RW} + B_{LE} + 2 \cdot y_{RBG-LE} \quad (3-9)$$

mit:

$L_{LG}$	Länge der Lagergasse
$H_{LG}$	Höhe der Lagergasse
$T_{LG}$	Tiefe der Lagergasse
$y_{RBG\ u}$	unteres Anfahrtsmaß
$y_{RBG\ o}$	oberes Anfahrtsmaß
$y_{RBG\ v}$	vorderes Anfahrtsmaß
$y_{RBG\ h}$	hinteres Anfahrtsmaß
$L_{\ddot{U}P}$	Länge Übergabepunkt
$L_{PU}$	Länge Puffer
$y_{RBG-LE}$	Abstand zwischen dem beladenen RBG und den Ladeeinheiten im Regal

### 3.4 Größe des Lagergebäudes

Das Lagergebäude besteht aus den einzelnen Lagergassen und der umschließenden Gebäudehülle. Zur Länge der Lagergasse werden auf beiden Seiten der Abstand  $x_W$  zur Außenwand und die Wanddicke  $D_W$  dazugezählt. Zur Gassenhöhe wird lediglich die Dachdicke  $D_D$  addiert. Die Breite bzw. Tiefe des Lagers  $T_L$  ergibt sich aus der Anzahl der Lagergassen  $n_z$  und den Abständen zwischen den Gassen. An den beiden Außenseiten werden der Abstand  $z_W$  und die Wanddicke  $D_W$  addiert.

$$L_L = L_{LG} + 2 \cdot (x_{R-W} + D_W) \quad (3-10)$$

$$H_L = H_{LG} + (D_D) \quad (3-11)$$

$$B_L = T_{LG} \cdot n_z + (n_z - 1) \cdot z_{R-R} + 2 \cdot (z_{R-W} + D_W) \quad (3-12)$$

mit:

$L_L$	Länge der Lagers
$H_L$	Höhe der Lagers
$T_L$	Tiefe der Lagers
$x_{R-W}$	Abstand der Lagergasse zur Wand in x-Richtung
$z_{R-R}$	Abstand zwischen zwei Regalen
$z_{R-W}$	Abstand der Lagergasse zur Wand in z-Richtung
$n_z$	Anzahl Lagergassen
$D_D$	Dachdicke
$D_W$	Wanddicke

### 3.5 Ergebnis

Das entwickelte Modell zur Berechnung der Stellplatzanzahl und Lagergeometrie kann die gängigen Typen automatischer Lagersysteme abdecken. Dazu gehören das Automatische Kleinteilelager, das Tablarlager und das Palettenlager. Das Modell beschränkt sich dabei auf einen einzigen Lagerbereich, welcher die Form eines kubischen Gebäudekörpers annimmt. Die Systemgrenze des betrachteten Lagerbereichs liegt bei der Anbindung der Lagergassen an die Fördertechnik der Lagervorzone.



## 4 Berechnung der Umschlagsleistung

Die Umschlagsleistung eines automatischen Lagersystems gibt die Anzahl der Ein- und/oder Auslagerungen je Zeiteinheit wieder. Sie ist abhängig von der Anzahl der RBG und der mittleren Arbeitsspieldauer. Ihre Berechnung ist seit über vier Jahrzehnten fester Bestandteil der Forschung auf dem Gebiet der Logistik. Eine präzise Schätzung der Leistungsfähigkeit eines Lagersystems ist das Fundament einer genauen Planung und verhindert Über- oder Unterdimensionierung, die zu hohen Investitions- oder Folgekosten führen können.

### 4.1 Überblick bestehender Spielzeitberechnungsmodelle

Die Bedeutung der Lagersystemplanung und die Komplexität der Bestimmung der durchschnittlichen Arbeitsspieldauer haben in den vergangenen Jahrzehnten zu einer Vielzahl an wissenschaftlichen Publikationen geführt, die sich mit dem Einfluss eines bestimmten Parameters oder Parameterkombinationen auf die mittlere Spielzeit befassen. Einen umfassenden Literaturüberblick über die Durchsatzberechnung von automatischen Hochregallagern geben Sarker und Babu [Sar-95], Johnson und Brandeau [Joh-96] sowie Roodbergen [Roo-09]. Ein mathematisch exaktes Modell, welches alle spielzeitbeeinflussenden Parameter vereinigt, ist noch nicht entwickelt.

Bei der Planung automatisierter Lagersysteme kommen analytische Auslegungsverfahren zur Anwendung. Deren Ergebnisse werden häufig in fortgeschrittenen Planungsphasen mittels Simulation überprüft. Die analytischen Berechnungsmethoden können grundsätzlich in zwei verschiedene Ströme unterschieden werden. In der deutschsprachigen Literatur werden Modelle verwendet, in denen die Regalwand überwiegend mittels kartesischen Koordinaten beschrieben wird, während in der englischsprachigen Literatur ein skaliertes und normiertes Fahrzeitkoordinatenmodell eingesetzt wird [Lip-03].

In den 60er Jahren werden durch Arbeiten von Zschau [Zsc-63] und Schaab [Sch-68] die ersten Berechnungsansätze für einfache Lagertypen entwickelt. Darauf aufbauend beschreibt Gudehus [Gud-72c] die Funktionsabläufe von Einzel- und Doppelspielen und entwickelt in sich geschlossene Formeln zur Bestimmung der Um-

schlagsleistung. Die Proportionen der Regalwandabmessungen müssen dabei ähnlich dem Verhältnis der Fahr- zur Hubgeschwindigkeit des RBG sein (Regalwandparameter nahe 1). Der Verein Deutscher Ingenieure und die Fédération Européenne de la Manutention erstellen in der Folge Richtlinien, die den Leistungsvergleich verschiedener Geräte und deren Abnahme erleichtern und vereinheitlichen. Die VDI-Richtlinie 3561: „Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen“ [VDI3561] definiert die Lage zweier Punkte bzw. Lagerfächer, deren Anfahrt für die mittlere Spielzeit des gesamten Lagers repräsentativ ist (Methode der repräsentativen Punkte) und ermöglicht die getrennte Berechnung von Einzel- und Doppelspielen. Der Vergleich der gemessenen mit der berechneten Spielzeit dient als Maß zur Abnahme der vom Lieferanten garantierten technischen Leistungen. Die VDI Richtlinie 4480 Blatt 1: „Durchsatz von automatischen Lagern mit gassengebundenen Regalbediengeräten“ [VDI4480-1], enthält Berechnungsvorschriften für gegenüber dem Eckpunkt der Regalwand verschobene Ein- und Auslagerungspunkte. Außerdem enthält sie einen Vorschlag für eine Spielzeitberechnung doppelttiefer Lager mit einfachbreitem LAM. Auch die FEM Richtlinie 9.851: „Leistungsnachweis für Regalbediengeräte – Spielzeiten“ [FEM9.851] dient zur Leistungsbewertung von automatischen Regalbediengeräten mit einem Lastaufnahmemittel. Sie enthält darüber hinaus Vorschläge zur Spielzeitberechnung für zwei Lastaufnahmemittel bei einfachtiefer Lagerung und für die Lagerkonfiguration mit einem einfachbreiten Lastaufnahmemittel bei doppelttiefer Lagerung. Die Richtlinie enthält Berechnungsvorschriften für gegenüber dem Eckpunkt der Lagerzeile verschobene Ein- und Auslagerungspunkte und beruht wie die VDI-Richtlinie 3561 ebenfalls auf der Methode der repräsentativen Punkte. Die drei Richtlinien haben eine hohe Praxisrelevanz, sind jedoch nur bedingt als Planungshilfsmittel zu verwenden, da nur einfache Lagerkonfigurationen berechnet werden können und lagerorganisatorische Einflussgrößen auf die Umschlagsleistung außer Acht gelassen werden.

Erweiterte Lagerkonfigurationen mit integrierten Lagerstrategien können mittels der Ansätze von Lippolt [Lip-03] und Seemüller [See-06] berechnet werden. Lippolt entwickelt Formeln für die doppeltiefe Lagerung und Seemüller gliedert die Spielzeiten in die einzelnen Fahrzeitkomponenten auf und bildet Arbeitsspiele für RBG mit mehreren oder doppelbreiten Lastaufnahmemitteln ab.

Im englischsprachigen Raum befassen sich Hausman et al. [Hau-76] und Schwarz [Sch-78] mit einfachen Berechnungsmethoden für automatische Lagersysteme.



Bozer und White [Boz-84] erweitern diese Modelle für einen beliebigen Regalwandparameter und unterschiedlich angeordnete Übergabepunkte. Um neuen Lagerstrategien gerecht zu werden, werden Modelle entwickelt, welche die Auswirkungen einer Fahrwegoptimierung abschätzen [Mel-97] und die Ruhepositionsstrategie des RBG in die Leistungsberechnung mit einbeziehen [Egb-91].

## 4.2 Grundlagen der Spielzeitberechnung

Die Modelle zur Berechnung der Spielzeit beruhen auf grundlegenden physikalischen Bewegungsgesetzen zur Beschreibung von Fahrzeiten des RBG. In diesem Abschnitt werden diese sowie deren Auswirkung auf die Lagerberechnung erläutert.

### 4.2.1 Einzelbewegungen

Die Bewegung eines Regalbediengeräts setzt sich aus den Bewegungen des Fahr- und Hubwerks sowie des LAM zusammen. Das Fahrwerk bestimmt die Position und Geschwindigkeit in horizontaler Dimension (x-Richtung), das Hubwerk jene in vertikaler Dimension (y-Richtung) und das LAM verfährt in z-Richtung in die Tiefe des Regals.

Die Komponenten sind jeweils durch eine maximale Geschwindigkeit  $v$ , die Beschleunigung  $a^+$  und die Verzögerung  $a^-$  charakterisiert. Die Fahrzeiten werden durch die Geschwindigkeitsprofile  $v(t)$  bestimmt. Ein typisches Geschwindigkeitsprofil ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

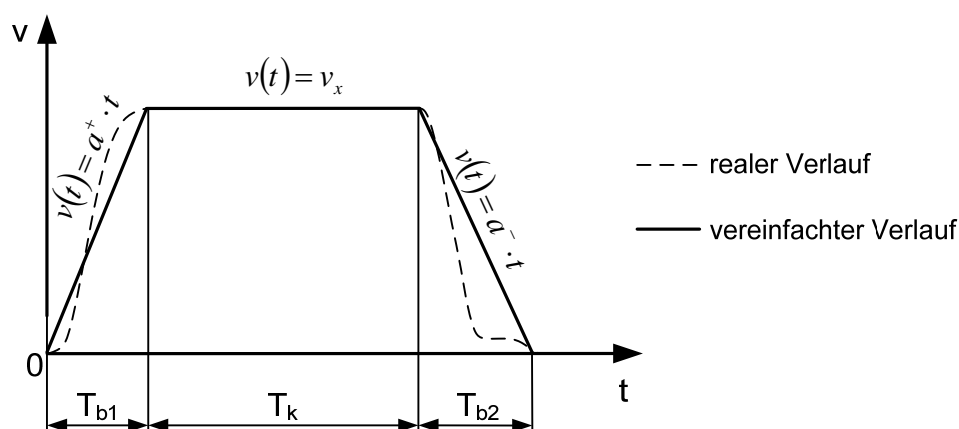


Abbildung 4-1: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm einer RBG-Komponente

## Berechnung der Umschlagsleistung

---

Bei der Berechnung der Fahrzeit kann das reale Profil ausreichend durch ein idealisiertes angenähert werden [Gud-72c]. Das idealisierte, trapezförmige Fahrprofil gliedert sich in eine Beschleunigungsphase  $T_{b1}$ , eine Konstantfahrt  $T_k$  und eine Verzögerungsphase  $T_{b2}$ . Bei einer ausreichend langen Strecke erreicht eine RGB-Komponente die maximale Geschwindigkeit  $v$  und verfährt dann konstant, bis das Abbremsen beginnt. Dem Geschwindigkeitsverlauf entsprechend wird dieser Fall Trapezfahrt genannt. Kann die maximale Geschwindigkeit nicht erreicht werden, dann entfällt die Konstantfahrt und die Beschleunigung geht direkt in eine Verzögerung über. Die Bezeichnung dieses Falles ist die Dreiecksfahrt.

Aus den Bewegungsgesetzen für die konstante Geschwindigkeit und die konstante Beschleunigung wird folgendes Gleichungssystem für die Fahrzeit  $t_s$  einer RGB-Komponente bei der Strecke  $l$  abgeleitet:

$$t_s = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{\frac{l}{a}} & \text{für } l \leq \frac{v^2}{a} \\ \frac{l}{v} + \frac{v}{a} & \text{sonst} \end{cases} \quad (4-1)$$

mit:

$t_s$	Fahrzeit einer RGB-Komponente
$l$	Streckenlänge
$v$	Geschwindigkeit der RGB-Komponente
$a$	Brems-/Beschleunigungskonstante

Die Brems-/Beschleunigungskonstante  $a$  ist der Mittelwert der Beschleunigung  $a^+$  und der Verzögerung  $a^-$ :

$$a = \frac{2 \cdot |a^+ \cdot a^-|}{a^+ + |a^-|} \quad (4-2)$$

mit:

$a^+$	Beschleunigung
$a^-$	Verzögerung

## 4.2.2 Zusammengesetzte Bewegungen

Soll ein bestimmtes Regalfach der Regalwand angefahren werden, sind i.d.R. Horizontal- und Vertikalbewegungen des Fahrwerks bzw. Hubwerks notwendig. Bei schienengeführten RBGs können die Antriebe der beiden Komponenten gleichzeitig eingesetzt werden. Fahrbewegungen mit parallelen Fahrten in zwei Dimensionen werden in der Literatur als Tschebyscheffahrt<sup>8</sup> [Kra-11] bezeichnet.

Die zusammengesetzte Fahrzeit ist somit nicht die Summe der beiden Einzelfahrzeiten  $t_{sx}$  und  $t_{sy}$ , sondern entspricht der größeren der beiden.

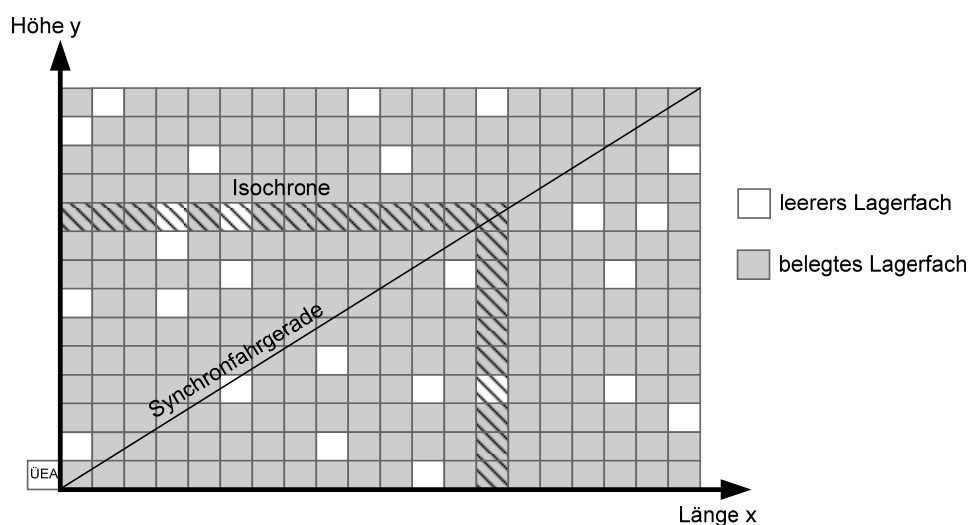
$$t_f = \max(t_{sx}, t_{sy}) \quad (4-3)$$

mit:

- $t_f$       zusammengesetzte Fahrzeit der zwei RBG-Komponenten
- $t_{sx}$      Fahrzeit in x-Richtung
- $t_{sy}$      Fahrzeit in y-Richtung

## 4.2.3 Bewegung in Regalgasse

Sind der Fahr- und der Hubantrieb eines RBG gleichzeitig eingeschaltet, bewegt sich das LAM mit einer linearen Bewegung diagonal durch die Regalgasse. Beim Start in der linken unteren Ecke des Regals bilden die durchfahrenen Punkte die sogenannte Synchronfahrtsgerade. Alle Punkte auf dieser Gerade werden vom Fahr- und vom Hubwerk in derselben Zeit erreicht. Abbildung 4-2 zeigt eine Regalwand mit eingezeichneten Synchronfahrgeraden.



**Abbildung 4-2:** Regalwand mit Synchronfahrgerade und Isochrone

<sup>8</sup> Auch unter dem Namen Tchebychevfahrt oder -metrik bekannt.

## Berechnung der Umschlagsleistung

---

Die Lagerfächer werden durch die Synchronfahrgerade in zwei logische Bereiche aufgeteilt. Alle Fächer oberhalb der Geraden sind hubzeitkritisch, das bedeutet, dass ausgehend vom Übergabepunkt in der linken unteren Ecke die Hubzeit zu jedem dieser Fächer größer als die Fahrzeit dorthin ist. Alle Fächer unter der Synchronfahrgeraden sind fahrzeitkritisch, d.h. die Fahrzeit ist die bestimmende Komponente der Tschebyscheffahrt. Innerhalb des hubzeitkritischen Bereichs werden alle Fächer, die auf der gleichen Höhe liegen ( $y=\text{konstant}$ ), in derselben Zeit erreicht. Im fahrzeitkritischen Bereich gilt dasselbe für alle Fächer mit der gleichen  $x$ -Koordinate. Fächer mit identischer Anfahrtszeit werden Isochrone genannt.

Die Steigung der Synchronfahrgeraden ist durch das Verhältnis der Maximalgeschwindigkeit des Fahr- und Hubwerks bestimmt. Die Steigung kann durch das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten berechnet werden:

$$m = \frac{v_y}{v_x} \quad (4-4)$$

mit:

$m$	Steigung der Synchronfahrgeraden
$v_x$	Geschwindigkeit in $x$ -Richtung
$v_y$	Geschwindigkeit in $y$ -Richtung

Die Steigung der Synchronfahrgeraden beeinflusst den Regalwandparameter  $b$ . Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen den kinematischen Eigenschaften des RBG und den Abmessungen der Regalwand. Der Regalwandparameter wird mit der folgenden Formel berechnet:

$$b = \frac{H_R}{L_R} = \frac{H_R}{L_R} \cdot \frac{v_x}{v_y} \quad (4-5)$$

mit:

$H_R$	Regalhöhe
$L_R$	Regallänge
$v_x$	Geschwindigkeit in $x$ -Richtung
$v_y$	Geschwindigkeit in $y$ -Richtung

Bei einem Regalwandparameter von 1 schneidet die Synchronfahrgerade die rechte obere Ecke der Regalwand. In diesem Fall gibt es ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen fahr- und hubzeitkritischen Fächern und die Antriebe des RBG werden optimal genutzt. Bei einem Parameter kleiner 1 schneidet die Gerade das Lager über dem rechten oberen Eck. In diesem Fall überwiegt die Anzahl der fahrzeitkritischen Fächer und es wird von einem fahrzeitkritischen Lager gesprochen. Bei einem Regalwandfaktor größer 1 liegt ein hubzeitkritisches Lager vor. Bei freier Wahl sollten RBG und Regal aufeinander abgestimmt und ein Faktor von  $b = 1$  angestrebt werden, da dort eine minimale Spielzeit erreicht wird [Gud-72c].

### **4.3 Einheitlicher Ansatz zur Bestimmung der Umschlagsleistung unterschiedlich ausgeprägter Lagersysteme**

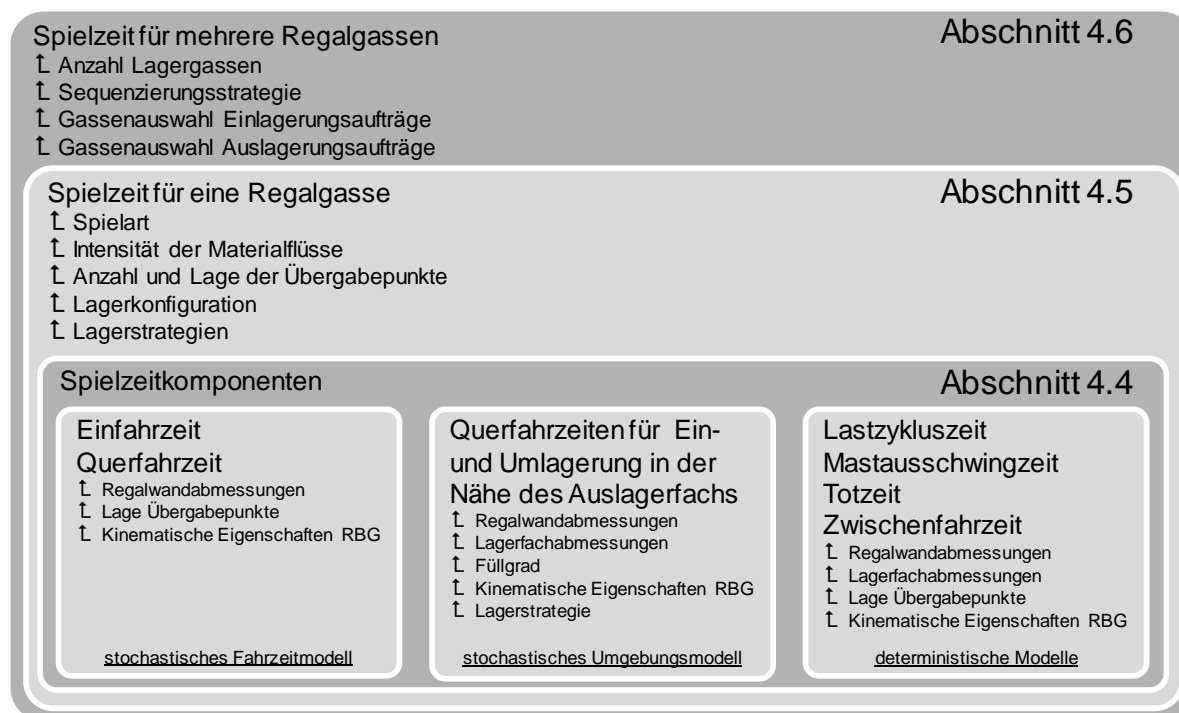
Die integrierte Planungsvorgehensweise basiert auf einem einheitlichen, leicht anwendbaren Modell zur Bestimmung der Umschlagsleistung eines automatischen Lagersystems, welches praxisrelevante Lagerkonfigurationen abdeckt und entsprechende Lagerstrategien integriert.

Die einfachste Art, ein solches Modell zu entwickeln, bietet die Ablaufsimulation. Diese hat durch die Möglichkeit eines hohen Detaillierungsgrades das Potenzial, sämtliche Konfigurationen und Strategien abbilden zu können [Gün-08]. Zur Bestimmung der Leistung eines Lagersystems müssen mitunter mehrere rechenintensive Simulationläufe durchgeführt werden, was einen hohen Zeitaufwand bedeutet. Bei der hohen Anzahl an Funktionsauswertungen, welche die neue Planungsvorgehensweise erfordert, ist dieser Umstand problematisch. Diesem Nachteil kann durch den Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen entgegengewirkt werden [Kra-11]. Diese Netze sind informationsverarbeitende Systeme, die aus einer großen Anzahl einfacher Einheiten (Zellen, Neuronen) bestehen, welche lokale Daten verarbeiten und über Verbindungen erhalten oder weiterleiten [Zel-03]. Aufbau und Funktionsweise dieser Systeme orientieren sich am menschlichen Gehirn. Analog zum biologischen Vorbild erfordern künstliche neuronale Netze ein Training, um mathematische Beziehungen, in diesem Falle die Umschlagsleistung in Abhängigkeit von Eingangsparametern, lernen und wiedergeben zu können. Bei der sehr hohen Anzahl an Parametern, die Ein-

## Berechnung der Umschlagsleistung

fluss auf die Umschlagsleistungsberechnung von Lagersystemen haben, ist der Trainingsaufwand für diese Netze nicht mehr durchführbar.

Das für die neue Planungsvorgehensweise entwickelte Modell basiert deshalb auf aufeinander aufbauenden, analytischen Teilmodellen, da diese sehr effizient berechnet werden können und trotzdem ein großes Spektrum an Einflussgrößen berücksichtigen. Das mathematische Gesamtmodell aus Abbildung 4-3 führt diese Teilmodelle zusammen, vereinheitlicht und erweitert sie um fehlende Aspekte. Dabei werden Teilmodelle zur Berechnung von Spielzeitkomponenten, der Spielzeit einer Regalgasse und der Spielzeit mehrerer abhängiger Regalgassen verwendet. Abbildung 4-3 stellt neben der Gliederung des Gesamtmodells auch die wichtigsten Einflussgrößen auf die Teilmodelle dar.



**Abbildung 4-3:** mathematisches Gesamtmodell mit Teilmodellen und Einflussgrößen zur Berechnung der Umschlagsleistung eines automatischen Lagersystems

Die Basis des Modells ist die Berechnung der Spielzeitkomponenten, welche charakteristische Fahrten und Abläufe des RBG abbilden. Die Einfahrzeit ist beispielsweise die mittlere Fahrzeit von einem Übergabepunkt am Rand der Regalwand zu einem beliebigen Lagerfach in der Regalwand. Die Querfahrzeit entspricht der mittleren Fahrzeit von einem beliebigen Lagerfach zu einem anderen beliebigen Lagerfach.

Die Arbeitsspiele eines RBG bestehen im Wesentlichen aus einer Aneinanderreihung dieser Spielzeitkomponenten. Die Berechnung der Komponenten erfolgt mittels stochastischer und deterministischer Modelle und ist Ausgangsbasis zur Berechnung der mittleren Spielzeit eines RBG. Die Modelle zur Berechnung der Spielzeitkomponenten werden im folgenden Abschnitt 4.4 beschrieben. Die Zusammensetzung der Arbeitsspiele und die Berechnung der mittleren Spielzeit eines RBG werden im Abschnitt 4.5 erläutert. Im Abschnitt 4.6 wird dann auf die Umschlagsleistung eines gesamten Lagersystems geschlossen.

### **4.4 Modelle zur Berechnung einzelner Spielzeitkomponenten**

Für die Lagerplanung ist i.d.R. die im Mittel erreichbare Umschlagsleistung ausschlaggebend. Deshalb ist es notwendig, für Spielzeitkomponenten, deren Zeitdauern statistisch verteilt sind (z. B. abhängig von der Entfernung des jeweiligen Lagerfachs, das angefahren wird), den Mittelwert zu berechnen. In dieser Arbeit sind die Spielzeitkomponenten nach der ihrer Berechnung zugrundeliegenden Modellart untergliedert.

#### **4.4.1 Stochastisches Fahrzeitmodell**

Zur Berechnung der Einfahr- und Querfahrzeit wird ein stochastisch-analytisches Modell nach der Idee von Bozer und White entwickelt [Boz-84]. Dieses Modell beruht auf einem auf Zeitkoordinaten normierten Regalwandmodell. Mittels eines stochastischen Ansatzes werden die mittleren Fahrzeiten für die Einfahrzeit und die Querfahrzeit hergeleitet.

Alternativ zum Fahrzeitmodell kann das Modell der repräsentativen Punkte aus [VDI3561] und [FEM9.851] zur Berechnung der beiden Fahrzeiten hergenommen werden. Das stochastische Fahrwegemodell hat jedoch den Vorteil, unabhängig vom Regalwandparameter  $b$  zu sein. Somit können auch ungewöhnliche Regalabmessungen, bei denen  $b$  ungleich 1 ist, mit hoher Genauigkeit berechnet werden. Bei diesen Konfigurationen stößt das Modell der repräsentativen Punkte an seine Grenzen und liefert ungenaue Ergebnisse.

### 4.4.1.1 Annahmen

Dem stochastischen Fahrzeitmodell liegen die folgenden Annahmen zu Grunde:

- Die Regalwand ist eine kontinuierliche rechteckige Fläche mit der Länge  $L$  und der Höhe  $H$ .
- Der Übergabepunkt befindet sich im Standardmodell in der linken unteren Ecke.
- Die Anfahrtswahrscheinlichkeit aller Punkte in der Regalwand ist gleich groß.
- Das RBG kann in x- und y-Richtung parallel verfahren.

### 4.4.1.2 Anwendung des Fahrzeitmodells

Der erste Schritt der Verwendung des Fahrzeitmodells zur Berechnung von Spielzeitkomponenten besteht in der Transformation der kartesischen Regalkoordinaten in Zeitkoordinaten und der Skalierung auf normierte Fahrzeiten. Für die Normierung werden die maximalen Fahrzeiten des RBG in Längsrichtung  $T_x$  und Höhe  $T_y$  berechnet (ohne Berücksichtigung der dafür notwendigen Brems- und Beschleunigungszeiten).

$$T_x = \frac{L_R}{v_x}; \quad T_y = \frac{H_R}{v_y} \quad (4-6)$$

Der Skalierungsfaktor  $T$  entspricht dem Maximum der beiden Fahrzeiten.

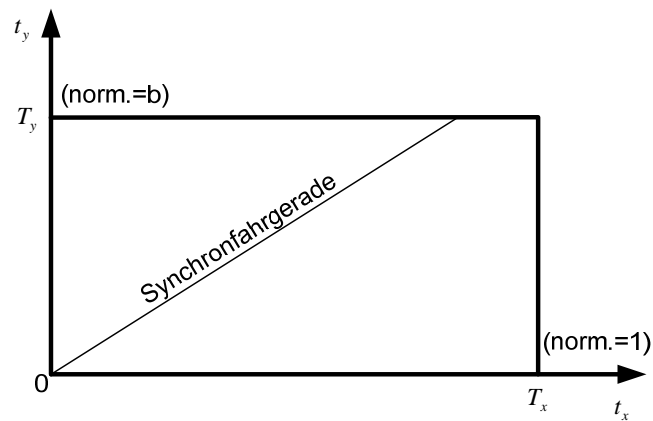
$$T = \max(T_x; T_y) \quad (4-7)$$

Die Zeitäquivalenten der Regallänge und -höhe werden durch den Skalierungsfaktor dividiert. Der Regalwandparameter  $b$  ist das Minimum der beiden skalierten Fahrzeiten.

$$b = \min\left(\frac{T_x}{T}; \frac{T_y}{T}\right) \quad (4-8)$$

Das Ergebnis der Transformation ist im fahrzeitkritischen Lager eine Regalwand mit der Länge 1 und der Höhe  $b$  (Abbildung 4-4).



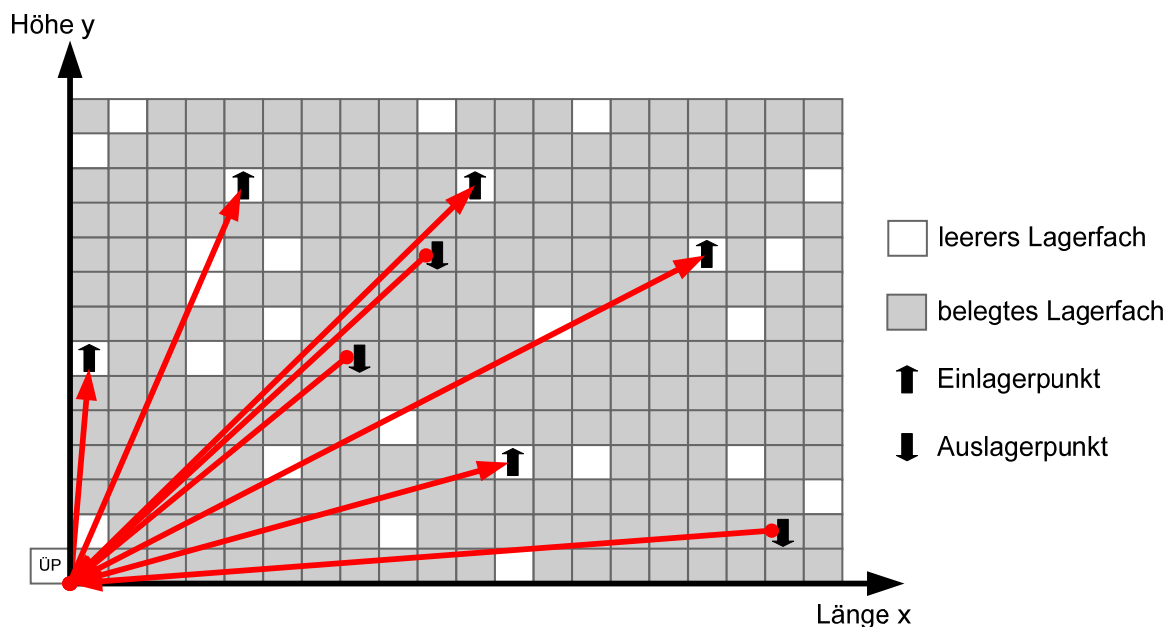


**Abbildung 4-4:** Skizze einer normierten Regalwand im fahrzeitkritischen Lager entsprechend dem Fahrzeitmodell nach Bozer und White

Bei einem hubzeitkritischen Lager ist  $T_y$  die ausschlaggebende Komponente und die Regalwandhöhe wird auf den Wert 1 normiert. Die Koordinaten  $t_x$  und  $t_y$  geben dabei anstatt räumlicher Entfernungen die Fahrzeiten des RBG in x- oder y-Richtung an. Im zweiten Schritt werden die normierte mittlere Einfahrzeit (vgl. Abschnitt 0) oder Querfahrzeit (vgl. Abschnitt 4.4.1.4) berechnet. Diese liefern normierte Fahrzeitmittelwerte als Ergebnis und müssen deshalb in einem letzten Schritt denormiert und auf einen Zeitwert gebracht werden. Die Denormierung erfolgt durch die Multiplikation mit dem Skalierungsfaktor  $T$ . Zur denormierten Zeit wird dann noch der Wert  $t_a$  addiert, welcher sämtliche Zeiten, die zur Beschleunigung und Verzögerung anfallen, berücksichtigt.

### 4.4.1.3 Einfahrzeit

Die Einfahrzeit ist die mittlere Zeit die vom RBG benötigt wird, um vom ÜP aus zu einem beliebigen Lagerfach im Regal zu fahren oder um von einem beliebigen Lagerfach zum ÜP zu fahren (vgl. Abbildung 4-5)



**Abbildung 4-5:** Ein- und Ausfahrten zwischen dem Übergabepunkt und einem Fach im Regal

### Einfahrzeit $E_{norm}(t_{ü,p})$

Mit dem Fahrzeitmodell (vgl. [Boz-84]) wird die normierte mittlere Fahrzeit für die Einfahrt hergeleitet. Diese ist nur vom Parameter  $b$  abhängig:

$$E_{norm}(t_{ü,p}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot b^2 \quad \text{wobei} \quad \frac{1}{2} \leq E_{norm}(t_{ü,p}) \leq \frac{2}{3} \quad (4-9)$$

mit:

$E_{norm}(t_{ü,p})$  normierte mittlere Fahrzeit vom ÜP zu einem Punkt in der Regalwand  
 $P$  Regalwandparameter

Der Wert  $1/2$  für  $E_{norm}(t_{ü,p})$  tritt bei einer Regalwand auf, die lediglich eine Ausdehnung in eine einzige Dimension besitzt, und somit keine Fläche, sondern eine Linie ist. Der Mittelwert der Strecke bzw. Zeitdistanz vom Anfangspunkt der Line zu einem

anderen Punkt auf der Linie ist dementsprechend  $1/2$  der Länge der Linie. Bei einem Regalwandparameter von  $b = 1$  nimmt  $E_{norm}(t_{ü,p})$  den Wert  $2/3$  an.

### Nachträgliche Addition der mittleren Brems-/Beschleunigungszeit

Das Modell, welches der Berechnung der Einfahrzeit zugrunde liegt, vernachlässigt die Beschleunigungs- und Verzögerungszeiten, die bei jeder Bewegung des RBG anfallen. Weil das Modell davon ausgeht, dass das RBG unmittelbar nach dem Start die maximale Geschwindigkeit erreicht, wird die reale mittlere Fahrzeit unterschätzt. Eine einfache Form um diese zu berücksichtigen führt über die mittlere Brems-/Beschleunigungszeit  $t_a$  [Gud-72c].

$$t_a = \begin{cases} \left(1 - \frac{b}{2}\right) \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{b}{2} \cdot \frac{v_y}{a_y} & \text{für } b \leq 1 \\ \frac{1}{2b} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \left(1 - \frac{1}{2b}\right) \cdot \frac{v_y}{a_y} & \text{sonst} \end{cases} \quad (4-10)$$

Die Zeit  $t_a$  hängt vom Regalwandparameter  $b$  und den kinematischen Eigenschaften des RBG ab. Keinen Einfluss darauf haben die Abmessungen des Regals. Ist die Beschleunigung auf Fahrten bezogen, die im Mittel sehr kurz sind (z. B. kleine mittlere Abstände im Regal oder sehr kleine Regalabmessungen), wird die volle Geschwindigkeit häufig nicht erreicht und  $t_a$  überschätzt diese Zeit.

Die mittlere Brems-/Beschleunigungszeit wird zur denormierten mittleren Fahrzeit addiert:

$$E(t_{ü,p}) = E_{norm}(t_{ü,p}) \cdot T + t_a \quad (4-11)$$

### Integrierte Brems-/Beschleunigungszeit

Chang et al. [Cha-95] und Hwang et al. [Hwa-90] entwickeln andere Lösungsansätze zur Integration der Brems-/Beschleunigungszeit und erweitern das Fahrzeitmodell. Mit dem Modell können häufig bessere Ergebnisse erzielt werden, als über die nachträgliche Berechnung von  $t_a$ . Dem erweiterten Modell wird das trapezförmige Geschwindigkeitsprofil mit der Brems- und Beschleunigungsphase zugrunde gelegt. Die

Normierung der Regalwand erfolgt in diesem Fall ebenfalls anhand des trapezförmigen Geschwindigkeitsprofils und berücksichtigt damit die Brems-/Beschleunigungszeit.

$$T_x = \frac{L_R}{v_x} + \frac{v_x}{a_x}; \quad T_y = \frac{H_R}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} \quad (4-12)$$

Der Skalierungsfaktor  $T$  und der Regalwandparameter  $b$  werden entsprechend den Formeln (4-7) und (4-8) berechnet.

In einem zweiten Schritt werden die Parameter  $\lambda_x$  und  $\lambda_y$  geschätzt:

$$\lambda_x = \frac{\ln(0,5)}{\ln(t_x(L_R \cdot 0,5)) - \ln(T_x)}; \quad \lambda_y = \frac{\ln(0,5)}{\ln(t_y(H_R \cdot 0,5)) - \ln(T_y)} \quad (4-13)$$

Dann kann die Formel für die normierte mittlere Einfahrzeit unter Berücksichtigung der Beschleunigung angewendet werden.

$$E_{norm}(t_{ü,p}^{exakt}) = 2 \left( \frac{\lambda_x}{\lambda_x + 1} + b^{\lambda_x + 1} \left( \frac{1}{\lambda_x + 1} - \frac{1}{\lambda_x + \lambda_y + 1} \right) \right) \quad \text{für } b \geq 1 \quad (4-14)$$

Für den Fall  $b < 1$  werden  $\lambda_x$  und  $\lambda_y$  vertauscht.

Nach der Berechnung erfolgt die Denormierung.

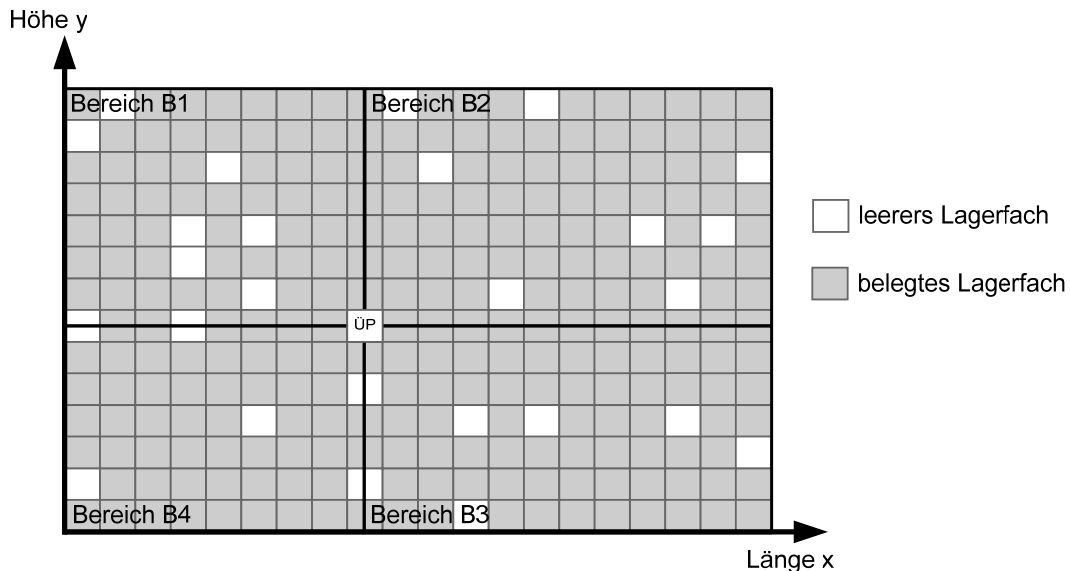
$$E(t_{ü,p}) = E_{norm}(t_{ü,p}^{exakt}) \cdot T \quad (4-15)$$

### Verschiebung des Übergabepunkts

Aus technischen Gründen liegt der ÜP nicht immer in einer der Ecken des Regals, sondern ist oftmals an der Regalstirnseite in die Höhe versetzt oder in die Längsrichtung des Regals verschoben. Es sind zudem Lagerkonfigurationen möglich, in denen sich der ÜP in der Regalfläche befindet. Eine Verschiebung des ÜP ändert den mittleren Abstand zu den Regalfächern und somit auch die mittlere Einfahrzeit.

Die Berechnungsmethodik für die Einfahrzeit bei verschobenen ÜP teilt die Regalwandfläche entsprechend der Verschiebung des ÜP in zwei bzw. vier Regalbereiche.

Diese Regalbereiche können durch die gleichverteilte Anfahrt aller Punkte als eigenständige Regale mit ÜP in einer ihrer Ecken interpretiert und mit den beschriebenen Modellen berechnet werden (siehe Abbildung 4-6).



**Abbildung 4-6:** Regalwand mit verschobenem Übergabepunkt

Zunächst werden die Einfahrzeiten  $E(t_{ü,p})^{Bn}$  für die 1 bis n Regalbereiche berechnet. Um die Einfahrzeit für die ursprüngliche gesamte Regalwand zu erhalten, müssen die Einfahrzeiten mit ihren Anfahrtswahrscheinlichkeiten  $p_n$  gewichtet werden. Diese entsprechen dem Flächenanteil des jeweiligen Regalbereichs:

$$p_1 = \frac{x_{\text{ÜP}} \cdot (b - y_{\text{ÜP}})}{b}; \quad p_2 = \frac{(1 - x_{\text{ÜP}}) \cdot (b - y_{\text{ÜP}})}{b};$$

$$p_3 = \frac{(1 - x_{\text{ÜP}}) \cdot y_{\text{ÜP}}}{b}; \quad p_4 = \frac{x_{\text{ÜP}} \cdot y_{\text{ÜP}}}{b}$$

**(4-16)**

mit:

$p_n$  Anfahrtswahrscheinlichkeit des Bereichs n

Die Einfahrzeit  $E(t_{ü,p})_{x=x_{\text{ÜP}}, y=y_{\text{ÜP}}}$  für das gesamte Regal entspricht demnach:

$$E(t_{ü,p})_{x=x_{\text{ÜP}}, y=y_{\text{ÜP}}} = E(t_{ü,p})^{B1} \cdot p_1 + E(t_{ü,p})^{B2} \cdot p_2 + E(t_{ü,p})^{B3} \cdot p_3 + E(t_{ü,p})^{B4} \cdot p_4$$

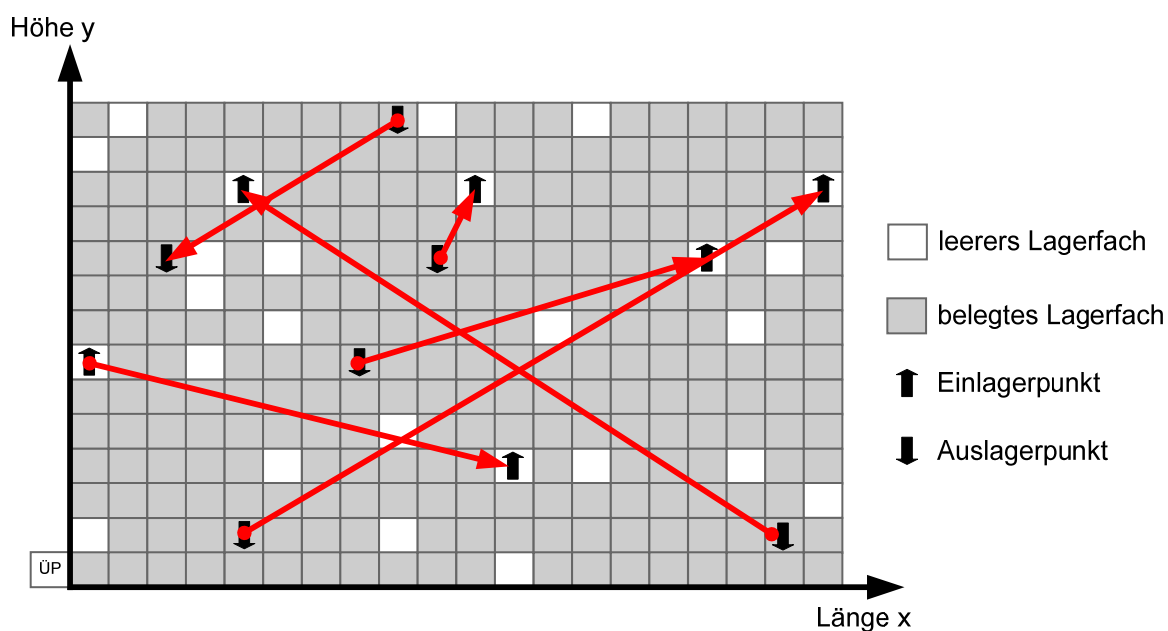
**(4-17)**

mit:

$$E(t_{\ddot{u},p})_{x=x_{\ddot{u}p},y=y_{\ddot{u}p}} \quad \text{Einfahrzeit mit Verschiebung des Übergabepunkts in x- und y-Richtung}$$

#### 4.4.1.4 Querfahrzeit

Die Querfahrzeit ist die mittlere Zeit, die vom RBG benötigt wird, um von einem beliebigen Punkt im Regal zu einem anderen beliebigen Punkt im Regal zu fahren (vgl. Abbildung 4-7).



**Abbildung 4-7:** Querfahrten zwischen den Lagerfächern im Regal

#### Querfahrzeit $E_{norm}(t_{p,p})$

Mit dem Fahrzeitmodell (vgl. [Boz-84]) wird die normierte mittlere Fahrzeit für die Querfahrt hergeleitet. Diese ist nur vom Parameter  $b$  abhängig.

$$E_{norm}(t_{p,p}) = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} \cdot b^2 - \frac{1}{30} \cdot b^3 \quad \text{wobei } \frac{1}{3} \leq E_{norm}(t_{p,p}) \leq \frac{14}{30} \quad (4-18)$$

mit:

- $E_{norm}(t_{p,p})$  normierte mittlere Fahrzeit von einem Punkt zu einem anderen Punkt in der Regalwand
- $L_R$  Regalwandparameter

Der Wert  $1/3$  für  $E_{norm}(t_{p,p})$  tritt bei einer Regalwand auf, die lediglich eine Ausdehnung in eine einzige Dimension besitzt, also keine Fläche, sondern eine Linie ist. Der

Mittelwert der Strecke bzw. die Zeitdistanz von einem Punkt auf der Linie zu einem anderen Punkt auf der Linie ist dementsprechend 1/3 der Länge der Linie. Bei einem Regalwandparameter von  $b=1$  nimmt  $E_{norm}(t_{p,p})$  den Wert 14/30 an.

### Nachträgliche Addition der mittleren Brems-/Beschleunigungszeit

Auch bei der Berechnung der Querfahrzeit ist die Brems-/Beschleunigungszeit nicht enthalten und ist mittels  $t_a$  aus der Formel (4-10) nachträglich mit einzurechnen.

$$E(t_{p,p}) = E_{norm}(t_{p,p}) \cdot T + t_a \quad (4-19)$$

### Integrierte Brems-/Beschleunigungszeit

Eine weitere Möglichkeit, die Brems-/Beschleunigungszeit zu berücksichtigen, stellt das Fahrwegmodell nach Chang [Cha-95] dar. Es werden wiederum  $T_x$  und  $T_y$  aus der Formel (4-12) auf Basis des trapezförmigen Geschwindigkeitsprofils errechnet. Anschließend werden der Skalierungsfaktor  $T$  aus der Formel (4-7) sowie der Regalwandparameter  $b$  aus Formel (4-8) bestimmt und die Parameter  $\lambda_x$  und  $\lambda_y$  aus Formel (4-13) abgeschätzt.

Dann wird die Formel für die normierte mittlere Einfahrzeit unter Berücksichtigung der Beschleunigung angewendet:

$$E_{norm}(t_{p,p}^{exakt}) = \left( 1 - \frac{2}{\lambda_x + 1} + \frac{1}{2\lambda_x + 1} \right) + b^{\lambda_x + 1} \left( \frac{2}{\lambda_x + 1} - \frac{4}{\lambda_x + \lambda_y + 1} + \frac{2}{\lambda_x + 2\lambda_y + 1} \right) + b^{2\lambda_x + 1} \left( \frac{2}{2\lambda_x + \lambda_y + 1} - \frac{1}{2\lambda_x + 2\lambda_y + 1} - \frac{1}{2\lambda_x + 1} \right) \quad \text{für } b \geq 1 \quad (4-20)$$

Für den Fall  $b < 1$  werden  $\lambda_x$  und  $\lambda_y$  vertauscht.

Nach der Berechnung der normierten Einfahrzeit erfolgt die Denormierung

$$E(t_{p,p}) = E_{norm}(t_{p,p}^{exakt}) \cdot T \quad (4-21)$$

### Querfahrzeit zu $n$ Punkten

Beim Einsatz mehrerer Lastaufnahmemittel oder bei speziellen Auslagerstrategien ist es für die Steuerung des RBG möglich, das nächste anzufahrende Lagerfach aus mehreren Fächern auszuwählen. Wenn ein möglichst kurzer Weg gewählt werden soll, wird eine Fahrwegoptimierung durchgeführt und das jeweils am nächsten gelegene Lagerfach angefahren. Die mittlere Querfahrzeit verkürzt sich somit, je größer die Anzahl  $n$  der potentiellen Anfahrlagerfächer ist. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird das Fahrzeitmodell erweitert und die mittlere Querfahrzeit für  $n$  beliebige Anfahrtspunkte  $E_{norm}(t_{p,np})$  hergeleitet. Für  $n=1$  bis 3 gilt:

$$E_{norm}(t_{p,p}) = \frac{1}{3} + \frac{1}{6}b^2 - \frac{1}{30}b^3 \quad (4-22)$$

$$E_{norm}(t_{p,2p}) = \frac{1}{5} + \frac{1}{3}b^2 - \frac{31}{105}b^3 + \frac{5}{42}b^4 - \frac{11}{630}b^5 \quad (4-23)$$

$$E_{norm}(t_{p,3p}) = \frac{1}{7} + \frac{1}{2}b^2 - \frac{11}{14}b^3 + \frac{143}{210}b^4 - \frac{793}{2310}b^5 + \frac{31}{330}b^6 - \frac{107}{10010}b^7 \quad (4-24)$$

Die Brems-/Beschleunigungszeit  $t_a$  kann auch zu diesen Mittelwerten nachträglich addiert werden. Je größer  $n$  ist, desto kleiner werden die mittleren Fahrzeiten und desto wahrscheinlicher ist es, dass das RBG auf einer Fahrt nicht seine maximale Geschwindigkeit erreicht. Mit zunehmendem  $n$  wird die tatsächliche Brems-/Beschleunigungszeit mit  $t_a$  überschätzt.

#### 4.4.1.5 Beispiel

Es sei eine Regalwand mit den Abmessungen  $L=40\text{ m}$  und  $H=20\text{ m}$  gegeben. Der Übergabepunkt befindet sich in der linken unteren Ecke des Regals. Das RBG hat die folgenden kinematischen Eigenschaften:

$$v_x = 2\text{ m/s}; \quad a_x = 0,5\text{ m/s}^2$$

$$v_y = 1\text{ m/s}; \quad a_y = 0,5\text{ m/s}^2$$

Es sollen die Einfahrzeit und die einfache und verkürzten Querfahrzeiten berechnet werden.



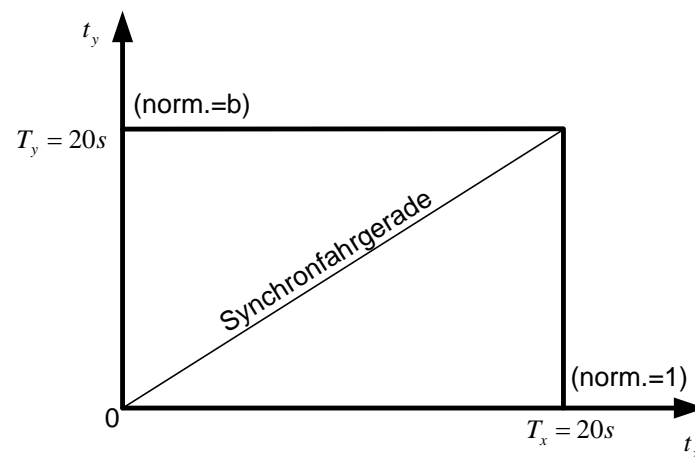
Zunächst erfolgt die Normierung der Regalabmessungen. Dazu werden die maximalen Fahrzeiten des RBG in die beiden Dimensionen des Regals berechnet:

$$T_x = \frac{L_R}{v_x} = \frac{40 \text{ m}}{2 \text{ m/s}} = 20 \text{ s}; \quad T_y = \frac{H_R}{v_y} = \frac{20 \text{ m}}{1 \text{ m/s}} = 20 \text{ s}$$

Mit den beiden maximalen Fahrzeiten können der Skalierungsfaktor  $T$  und der Regalwandparameter  $b$  berechnet werden:

$$T = \max(T_x; T_y) = \max(20 \text{ s}; 20 \text{ s}) = 20 \text{ s}$$

$$b = \min\left(\frac{T_x}{T}; \frac{T_y}{T}\right) = \min\left(\frac{20 \text{ s}}{20 \text{ s}}; \frac{20 \text{ s}}{20 \text{ s}}\right) = 1$$



**Abbildung 4-8:** Skizze der skalierten Regalwand

Nachdem die Regalwand skaliert ist (vergl. Abbildung 4-8), erfolgen die Berechnungen der normierten Fahrzeiten. Die normierte Einfahrzeit wird anhand der Formel (4-9) berechnet:

$$E_{norm}(t_{ü,p}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot b^2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot 1^2 = 0,666$$

Um die tatsächliche Einfahrzeit zu berechnen, wird dieser Wert mit  $T$  denormiert und die mittlere Bremsbeschleunigungszeit  $t_a$  nach Formel (4-10) addiert:

$$t_a = \left(1 - \frac{b}{2}\right) \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{b}{2} \cdot \frac{v_y}{a_y} = \left(1 - \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{2 \text{ m/s}}{0,5 \text{ m/s}^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1 \text{ m/s}}{0,5 \text{ m/s}^2} = 3 \text{ s}$$

$$E(t_{ü,p}) = E_{norm}(t_{ü,p}) \cdot T + t_a = 0,666 \cdot 20 \text{ s} + 3 \text{ s} = 16,33 \text{ s}$$

Die mittlere Einfahrzeit vom Übergabepunkt in der linken unteren Ecke der Regalwand zu einem der Lagerfächer entspricht also 16,33 s.

## Berechnung der Umschlagsleistung

---

Um die mittlere Querfahrzeit zu berechnen, wird die Formel (4-18) verwendet:

$$E_{norm}(t_{p,p}) = \frac{1}{3} + \frac{1}{6}b^2 - \frac{1}{30}b^3 = \frac{1}{3} + \frac{1}{6}1^2 - \frac{1}{30}1^3 = 0,466$$

Auch hier erfolgt die Denormierung und die Addition der Brems-/Beschleunigungszeit, deren Werte bereits bekannt sind:

$$E(t_{p,p}) = E_{norm}(t_{p,p}) \cdot T + t_a = 0,466 \cdot 20 \text{ s} + 3 \text{ s} = 12,33 \text{ s}$$

Kann nun bei der Querfahrt aus mehreren Punkten der am nächsten gelegene ausgewählt und angefahren werden, verkürzt sich die mittlere Fahrzeit und es kommen die Formeln der Anfahrt zu n Punkten zur Anwendung. Formel (4-23) ermöglicht die Fahrzeitberechnung bei der Auswahl aus zwei Punkten:

$$E_{norm}(t_{p,2p}) = \frac{1}{5} + \frac{1}{3}b^2 - \frac{31}{105}b^3 + \frac{5}{42}b^4 - \frac{11}{630}b^5 = 0,339$$

$$E(t_{p,2p}) = E_{norm}(t_{p,2p}) \cdot T + t_a = 0,339 \cdot 20 \text{ s} + 3 \text{ s} = 9,79 \text{ s}$$

Formel (4-24) ermittelt die mittlere Querfahrzeit bei drei zur Verfügung stehenden Anfahrpunkten:

$$E_{norm}(t_{p,3p}) = \frac{1}{7} + \frac{1}{2}b^2 - \frac{11}{14}b^3 + \frac{143}{210}b^4 - \frac{793}{2310}b^5 + \frac{31}{330}b^6 - \frac{107}{10010}b^7 = 0,278$$

$$E(t_{p,3p}) = E_{norm}(t_{p,3p}) \cdot T + t_a = 0,278 \cdot 20 \text{ s} + 3 \text{ s} = 8,573 \text{ s}$$

Die mittlere Querfahrzeit nimmt demnach deutlich ab, wenn mehrere Punkte zur Auswahl stehen.

Als Alternative zur Berechnung der Einfahrzeit über die Brems-/Beschleunigungszeit  $t_a$  kann das Rechenverfahren mit integrierter Brems-/Beschleunigungszeit verwendet werden. Dabei muss die Normierung der Regalwand anhand des trapezförmigen Geschwindigkeitsprofils (nach Formel (4-12)) vollzogen werden:

$$T_x = \frac{L_R}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} = \frac{40 \text{ m}}{2 \text{ m/s}} + \frac{2 \text{ m/s}}{0,5 \text{ m/s}^2} = 24 \text{ s}; \quad T_y = \frac{H_R}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} = \frac{20 \text{ m}}{1 \text{ m/s}} + \frac{1 \text{ m/s}}{0,5 \text{ m/s}^2} = 22 \text{ s}$$

Es werden wiederum der Skalierungsfaktor und der Regalwandparameter berechnet:

$$T = \max(T_x; T_y) = \max(24 \text{ s}; 22 \text{ s}) = 24 \text{ s}$$

$$b = \min\left(\frac{T_x}{T}; \frac{T_y}{T}\right) = \min\left(\frac{24 \text{ s}}{24 \text{ s}}; \frac{22 \text{ s}}{24 \text{ s}}\right) = 0,916$$

Über die Formel (4-1) für die einfache Bewegung eines RBG werden die Fahrzeiten auf die Hälfte der Regallänge  $t_x = 14 \text{ s}$  bzw. die Hälfte der Regalhöhe  $t_y = 12 \text{ s}$  berechnet. Diese Werte dienen als Eingangswerte der Parameter  $\lambda_x$  und  $\lambda_y$  nach Formel (4-13):

$$\lambda_x = \frac{\ln(0,5)}{\ln(t_x(L_R \cdot 0,5)) - \ln(T_x)} = \frac{\ln(0,5)}{\ln(14) - \ln(24)} = 1,285$$

$$\lambda_y = \frac{\ln(0,5)}{\ln(t_y(H_R \cdot 0,5)) - \ln(T_y)} = \frac{\ln(0,5)}{\ln(12) - \ln(22)} = 1,143$$

Wenn diese beiden Werte bestimmt sind, kann die normierte Einfahrzeit berechnet werden (Formel (4-14)):

$$E_{norm}(t_{ü,p}^{exakt}) = 2 \left( \frac{\lambda_x}{\lambda_x + 1} + b^{\lambda_x + 1} \left( \frac{1}{\lambda_x + 1} - \frac{1}{\lambda_x + \lambda_y + 1} \right) \right)$$

$$= 2 \left( \frac{1,285}{1,285 + 1} + 1^{1,285 + 1} \left( \frac{1}{1,285 + 1} - \frac{1}{1,285 + 1,143 + 1} \right) \right) = 0,682$$

Über die Denormierung wird ein Zeitwert ermittelt, der in diesem Fall  $b = 1$  sehr nahe dem zuvor ermittelten (Berechnungsmethode über die Brems-/Beschleunigungszeit) ist:

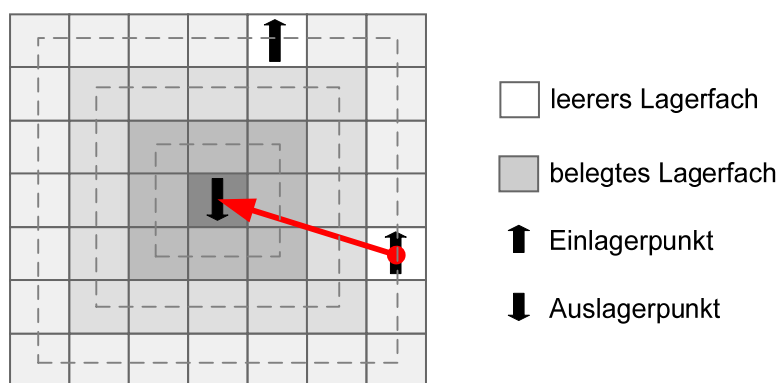
$$E(t_{ü,p}) = E_{norm}(t_{ü,p}^{exakt}) \cdot T = 0,682 \cdot 22 \text{ s} = 16,37 \text{ s}$$

Eine Validierung der unterschiedlichen Berechnungsmethoden wird anhand einer MonteCarlo-Simulation durchgeführt. Parameterstudien mit unterschiedlichen RBG-Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie verschiedenen Regalwandabmessungen zeigen, dass zur Berechnung der Einfahrzeit die Methode nach Chang besser geeignet ist, während bei der Querfahrzeit die einfachere Berechnungsmethode basierend auf dem Fahrzeitmodell mit nachträglicher Addition der mittleren Brems-/Beschleunigungszeit  $t_a$  ausreicht.

#### 4.4.2 Stochastisches Umgebungsmodell

Neben der beschriebenen Querfahrtszeit zwischen Lagerfächern, die in der gesamten Regalwand verteilt sind, gibt es bei einigen Lagerstrategien eine weitere Art von Querfahrten, welche im Normalfall wesentlich kürzer sind. Diese Querfahrten entste-

hen bei Lagerstrategien, bei welchen das Ein- oder Umlagerfach so nahe wie möglich am Auslagerfach gewählt wird und deshalb die Annahme einer gleichverteilten Anfahrt aller Punkte im Regal nicht mehr gültig ist. Der Fahrweg, der dabei zwischen dem Ein- oder Umlagerfach und dem Auslagerfach anfällt, ist im Wesentlichen nur von den kinematischen Eigenschaften des RBG, den Lagerfachabmessungen und vom Lagerfüllgrad abhängig. Je voller das Lager, desto weiter entfernt ist im Mittel das Ein- oder Umlagerfach. Um die dafür benötigte Fahrzeit abzuschätzen, wird das in Abbildung 4-9 skizzierte Umgebungsmodell nach Lippolt [Lip-03] und Seemüller[See-06] eingesetzt.



**Abbildung 4-9:** Umgebungsmodell zur numerischen Approximation der mittleren Fahrzeiten vom nächstgelegenen leeren Lagerfach zum Auslagerfach

Das Modell umfasst einen Regalwandabschnitt mit kartesischen Lagerplatzkoordinaten. In einem ersten Schritt wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass ein leeres Lagerfach in einem bestimmten Abstand vom Auslagerfach frei ist. Lagerfächer mit demselben Fachabstand bilden eine Umgebung und sind in der Abbildung farblich einheitlich hinterlegt. Die Abbildung zeigt nur eine Regalwand. Je größer der Füllgrad, desto wahrscheinlicher wird es, dass sich kein leeres Fach innerhalb nahen Umgebungen befindet und umso ungenauer wird das Modell, wenn zu wenige Umgebungen betrachtet werden. Das Modell setzt voraus, dass bei der Existenz mehrerer freier Lagerfächer mit demselben Fachabstand eines von ihnen zufällig ausgewählt wird, um sicher zu stellen, dass die gleichverteilte Belegung der Regalwand erhalten bleibt.

In einem zweiten Schritt wird die Fahrzeit jedes Lagerfachs der Umgebungen zum Auslagerfach berechnet und die mittlere Fahrzeit für jede Umgebung ermittelt. Die

Gewichtung mit der Nutzungswahrscheinlichkeit ergibt die mittlere Fahrzeit zwischen dem Ein- oder Umlagerfach und dem Auslagerfach.

Durch leichte Abwandlungen des Modells werden die Querfahrzeiten für die Einlagerungen im einfachtiefen Lager und die Ein- und Umlagerungen im doppeltiefen Lager und/oder mit doppelbreitem LAM berechnet.

#### 4.4.2.1 Belegungswahrscheinlichkeiten im einfachtiefen Lager

Eine Grundvoraussetzung zur Berechnung von Spielzeitkomponenten mit Hilfe des stochastischen Umgebungsmodells ist die Kenntnis der Belegungswahrscheinlichkeiten der einzelnen Lagerfächer. Diese Wahrscheinlichkeiten sind von der Lagerkonfiguration und dem Lagerfüllgrad abhängig. Der Lagerfüllgrad  $z$  beschreibt, wie viele Lagerfächer im Verhältnis zu den gesamten Lagerfächern des Lagersystems belegt sind.

$$z = \frac{N_b}{N_b + N_l} \quad (4-25)$$

mit:

$z$	Lagerfüllgrad
$N_b$	Anzahl belegte Lagerfächer des Regals
$N_l$	Anzahl leere Lagerfächer des Regals

Im einfachtiefen Lager kann jedes Lagerfach die zwei Zustände belegt oder leer annehmen. Die Wahrscheinlichkeit  $P_b^{etL}$  dass, ein Lagerfach belegt ist, entspricht dabei dem Lagerfüllgrad  $z$ , die Wahrscheinlichkeit  $P_l^{etL}$  eines leeren Lagerfachs ist die Gegenwahrscheinlichkeit.

$$P_b^{etL} = z \quad (4-26)$$

$$P_l^{etL} = 1 - z \quad (4-27)$$

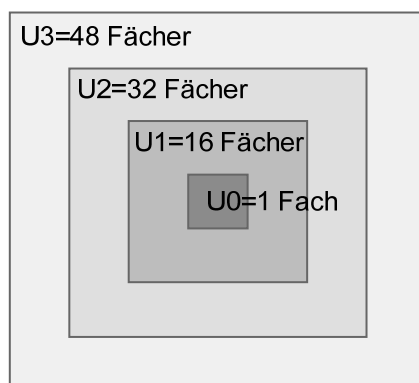
mit:

$P_b^{etL}$	Wahrscheinlichkeit für ein belegtes Lagerfach
$P_l^{etL}$	Wahrscheinlichkeit für ein leeres Lagerfach

#### 4.4.2.2 Querfahrzeiten bei der Einlagerung nahe Auslagerung im einfach tiefen Lager

##### Querfahrzeit vom Einlagerfach zum Auslagerfach $E(t_{EnNetL})$

Zur Bestimmung der mittleren Fahrzeit zwischen Ein- und Auslagerfach im einfach tiefen Lager bei der Einlagerstrategie *Einlagerung nahe Auslagerung* werden in einem ersten Schritt die Wahrscheinlichkeiten für die unterschiedlich möglichen Fachabstände zwischen den beiden Fächern berechnet. In der dem Auslagerfach gegenüberliegenden Regalwand gibt es ein Lagerfach, welches den Fachabstand 0 hat und die nullte Umgebung  $U_0$  darstellt. Den Fachabstand 1 weisen 16 Lagerfächer auf, acht in jeder der beiden Regalwände. Sie bilden die erste Umgebung  $U_1$ . Im Normalfall umfasst der betrachtete Regalausschnitt die Umgebungen bis zum Fachabstand 3 (vgl. Abbildung 4-10).



**Abbildung 4-10:** Skizze der Anzahl der Lagerfächer zweier gegenüberliegender Regalwände mit den Fachabständen 0-3 zu einem Auslagerfach

Je größer der betrachtete Abschnitt, desto wahrscheinlicher wird es, mindestens ein freies Lagerfach für die Einlagerung zu finden. Die Wahrscheinlichkeit, für die Einlagerung geeignet zu sein, ist für jedes einzelne Lagerfach  $P_i^{etL}$ . Daraus ergibt sich für die nullte Umgebung die folgende Einlagerwahrscheinlichkeit:

$$P_{U_0} = 1 - P_b^{etL} \quad (4-28)$$

Ist dieses Lagerfach belegt, gibt es in der ersten Umgebung weitere 16 Lagerfächer, die frei sein können. Die Wahrscheinlichkeit, erst in dieser Umgebung die Einlagerung tätigen zu können, stellt  $P_{U_1}$  dar:

$$P_{U1} = P_b^{etL} \cdot (1 - P_b^{etL})^{16} \quad (4-29)$$

Sind auch alle Lagerfächer der ersten Umgebung belegt, werden die Lagerfächer der zweiten Umgebung untersucht. Werden auch dort keine freien Lagerfächer gefunden, werden Schritt für Schritt nach außen hin die weiteren Umgebungen untersucht. Die Wahrscheinlichkeit, in den Umgebungen zwei oder drei die Einlagerung zu tätigen, ist durch die zwei folgenden Gleichungen beschrieben:

$$P_{U2} = P_b^{etL} \cdot P_b^{etL16} \cdot (1 - P_b^{etL})^{32} \quad (4-30)$$

$$P_{U3} = P_b^{etL} \cdot P_b^{etL16} \cdot P_b^{etL32} \cdot (1 - P_b^{etL})^{48} \quad (4-31)$$

Das Modell kann für beliebig viele Umgebungen fortgeführt werden. Nach drei Umgebungen beträgt die Wahrscheinlichkeit, bei einem Lagerfüllgrad von 95% ein Einlagerfach zu finden, bereits 99,31% und ist für die Berechnung ausreichend. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Einlagerfach erst außerhalb dieses Bereichs befindet, wird durch  $P_{U\text{Rest}}$  abgebildet:

$$P_{U\text{Rest}} = 1 - P_{U0} - P_{U1} - P_{U2} - P_{U3} \quad (4-32)$$

In einem zweiten Schritt werden Fahrzeiten zwischen den einzelnen Umgebungen und dem Auslagerfach berechnet. Die Anfahrzeit von einer Umgebung aus ist der Mittelwert der Fahrzeiten von den einzelnen Fächern der Umgebung. Zur Berechnung der Fahrzeit wird das trapezförmige Geschwindigkeitsprofil nach der Formel (4-1) verwendet. Die sehr kurzen Fahrten finden in der Beschleunigungsphase des RBG statt, dementsprechend wichtig ist die korrekte Berücksichtigung der Beschleunigung.

Die mittlere Anfahrzeit für die Lagerfächer außerhalb der dritten Umgebung wird in erster Näherung durch die Querfahrtzeit  $E(t_{p,p})$  abgebildet. Damit wird sichergestellt, dass der Grenzwert der Fahrzeit zwischen Einlagerfach und Auslagerfach bei einem Füllgrad gegen 1 den Wert einer normalen Querfahrtzeit annimmt. In diesem Fall sind

also keine Fahrzeiteinsparungen durch die Suche eines möglichst nahen Einlagerfachs im Vergleich zur zufälligen Auswahl des Einlagerfachs zu erwarten.

Um die mittlere Fahrzeit  $E(t_{EnNetL})$  zwischen dem Einlagerfach und dem Auslagerfach zu berechnen, werden die Fahrzeiten zu den einzelnen Umgebungen mit ihrer Nutzungswahrscheinlichkeit gewichtet:

$$E(t_{EnNetL}) = P_{U1} \cdot E(t_{U1}) + P_{U2} \cdot E(t_{U2}) + P_{U3} \cdot E(t_{U3}) + P_{U_{Rest}} \cdot E(t_{p,p}) \quad (4-33)$$

mit:

- $E(t_{EnNetL})$  (Einlagerung nächster Nachbar) = mittlere Querfahrzeit vom Einlagerfach zum Auslagerfach
- $P_{Un}$  Nutzungswahrscheinlichkeit der n-ten Umgebung
- $E(t_{Un})$  mittlere Fahrzeit zwischen der n-ten Umgebung und Auslagerfach

### 4.4.2.3 Belegungswahrscheinlichkeiten im doppeltiefen Lager

Es gibt zwei grundlegend verschiedene Methoden, ein doppeltiefes Lager zu betreiben, welche sich aus der Einlagerstrategie ergeben. Bei der ersten Möglichkeit werden mittels gezielter Einlagerungen zuerst alle hinteren Lagerfächer des doppeltiefen Regals befüllt, und erst nach der vollständigen Füllung dieser Fächer die vorderen Fächer des Lagerkanals verwendet. Damit ist sichergestellt, dass die Einlagerungen ohne Umlagerungen durchgeführt werden können. Die zweite Möglichkeit, die in der Praxis gebräuchlicher ist, verwendet die zufällige, gleichverteilte Einlagerung in einen Lagerkanal. Wenn der Kanal leer ist, wird in das hintere Lagerfach eingelagert, ist der Kanal schon einfach belegt, wird das vordere Lagerfach benutzt. Auch bei dieser Strategie fallen beim Einlagerprozess keine Umlagerungen an. Im Vergleich zur ersten Möglichkeit besteht zudem der Vorteil, dass die zeitaufwändigeren doppeltiefen Lastzyklen weniger häufig sind. Lippolt [Lip-03] modelliert für diese Methode die stochastischen Ein- und Auslagerungsprozesse und leitet daraus die Belegungswahrscheinlichkeiten  $P_l^{dtL}$ ,  $P_e^{dtL}$  und  $P_d^{dtL}$  der einzelnen Lagerkanäle ab:

$$P_l^{dtL} = \frac{1-z}{1+z} \quad (4-34)$$

$$P_e^{dtL} = \frac{2z \cdot (1-z)}{1+z} \quad (4-35)$$



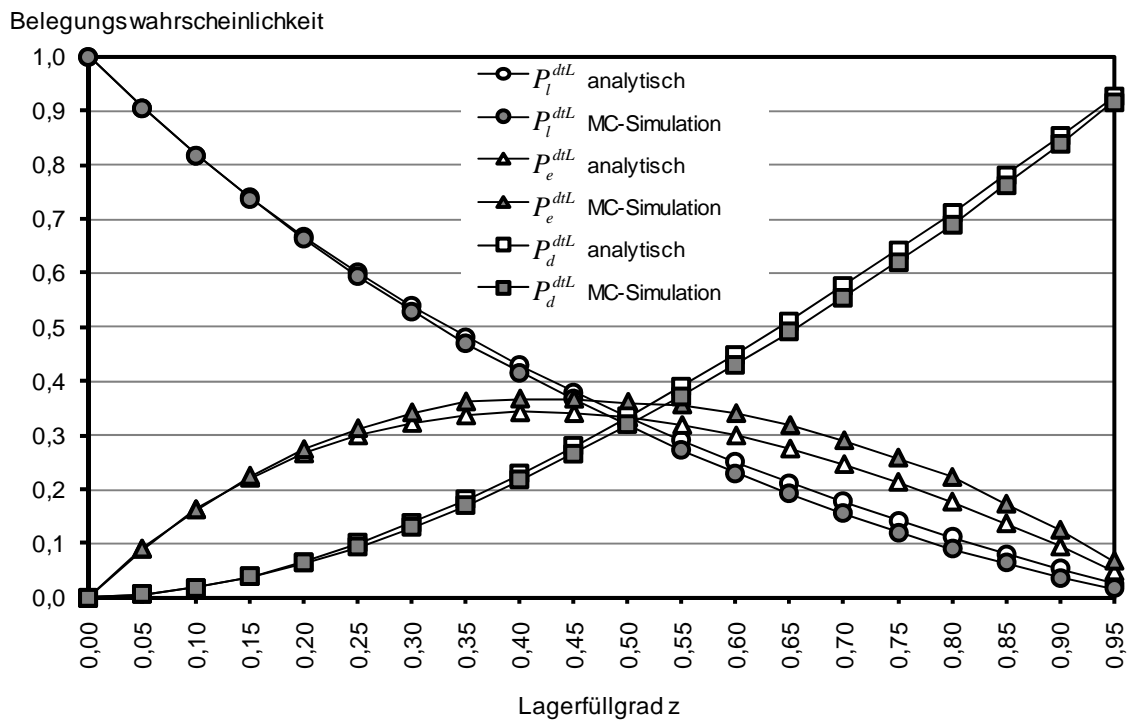
$$P_d^{dtL} = \frac{2z^2}{1+z} \quad (4-36)$$

mit:

- $z$  Lagerfüllgrad
- $P_l^{dtL}$  Wahrscheinlichkeit für einen leeren Lagerkanal
- $P_e^{dtL}$  Wahrscheinlichkeit für einen einfach belegten Lagerkanal
- $P_d^{dtL}$  Wahrscheinlichkeit für einen doppelt belegten Lagerkanal

**Abbildung 4-11** gibt die Belegung eines doppeltiefen Lagersystems bei unterschiedlichen Füllgraden wieder. Die Wahrscheinlichkeit für leere Lagerkanäle nimmt bei zunehmendem Füllgrad kontinuierlich ab. Die Wahrscheinlichkeit für doppeltbelegte Lagerkanäle verhält sich umgekehrt dazu. Mit zunehmendem Füllgrad entstehen immer mehr doppelt belegte Lagerkanäle. Bei ca. 41,5% erreicht die Anzahl der einfach belegten Lagerkanäle ihr Maximum und nimmt dann mit steigendem Lagerfüllungsgrad wieder ab. Bei einem Füllgrad von 50% sind im Regal gleich viele leere, einfach und doppelt belegte Lagerkanäle vorhanden.

Die Gleichungen zur Beschreibung der Belegungswahrscheinlichkeiten werden mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation überprüft und positiv validiert.



**Abbildung 4-11:** Belegungswahrscheinlichkeiten im doppeltiefen Lager bei variablem Lagerfüllgrad

#### 4.4.2.4 Querfahrzeiten bei der Ein- und Umlagerung nahe Auslagerung im doppeltiefen Lager

Querfahrzeit vom Einlagerfach zum Auslagerfach  $E(t_{EnNdtL})$  und

Querfahrzeit vom Auslagerfach zum Umlagerfach  $E(t_{UnNdtL})$

Die Berechnung der mittleren Fahrtdauer vom Ein- oder Umlagerfach zum Auslagerfach im doppeltiefen Lager erfolgt analog zur Methodik beim einfachtiefen Lager.

Im Fachabstand 0 gibt es einen Lagerkanal, der zur Ein- oder Umlagerung herangezogen werden kann. Dieser kann in dem Fall benutzt werden, wenn er nicht doppelt belegt ist:

$$P_{U0} = 1 - P_d^{dtL} \quad (4-37)$$

In der ersten Umgebung sind 16 Lagerkanäle, die leer oder einfach belegt sein können. Ein Lagerfach in dieser Umgebung kann nur benutzt werden, wenn der gegenüberliegende Lagerkanal doppelt belegt ist:

$$P_{U1} = P_d^{dtL} \cdot (1 - P_d^{dtL^{16}}) \quad (4-38)$$

Die Berechnungen werden bis zur dritten Umgebung fortgeführt:

$$P_{U2} = P_d^{dtL} \cdot P_d^{dtL^{16}} \cdot (1 - P_d^{dtL^{32}}) \quad (4-39)$$

$$P_{U3} = P_d^{dtL} \cdot P_d^{dtL^{16}} \cdot P_d^{dtL^{32}} \cdot (1 - P_d^{dtL^{48}}) \quad (4-40)$$

Die Wahrscheinlichkeit  $P_{U_{Rest}}$ , dass kein Lagerkanal innerhalb der betrachteten Umgebungen benutzt werden kann ist:

$$P_{U_{Rest}} = 1 - P_{U0} - P_{U1} - P_{U2} - P_{U3} \quad (4-41)$$

Bei einem Füllgrad von 95% beträgt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Lagerkanal innerhalb der ersten drei Umgebungen genutzt werden kann, 99,94%.

Im Anschluss werden die mittleren Fahrzeiten zwischen den einzelnen Umgebungen und dem Ein- oder Umlagerfach berechnet und mit der Nutzungswahrscheinlichkeit der Umgebungen gewichtet. Daraus ergibt sich die mittlere Dauer einer Fahrt:

$$E(t_{EnNdtL}) = E(t_{UnNdtL}) = P_{U1} \cdot E(t_{U1}) + P_{U2} \cdot E(t_{U2}) + P_{U3} \cdot E(t_{U3}) + P_{U\text{Rest}} \cdot E(t_{p,p}) \quad (4-42)$$

mit:

- $E(t_{EnNdtL})$  (Einlagerung nächster Nachbar) = mittlere Querfahrzeit vom Einlagerfach zum Auslagerfach
- $E(t_{UnNdtL})$  (Umlagerung nächster Nachbar) = mittlere Querfahrzeit vom Umlagerfach zum Auslagerfach
- $P_{Un}$  Nutzungswahrscheinlichkeit der n-ten Umgebung
- $E(t_{Un})$  mittlere Fahrzeit zwischen der n-ten Umgebung und dem Auslagerfach

### Querfahrzeit vom Auslagerfach zum Umlagerfach nach vorhergehender Einlagerung $E(t_{UnNnEdtL})$

Wird im doppeltiefen Lager eine Umlagerung durchgeführt nachdem aufgrund der Einlagerstrategie bereits in der Nähe des Auslagerfachs eine Einlagerung durchgeführt wurde, verlängert sich die mittlere Querfahrzeit für die Umlagerung. Das ursprünglich zum Auslagerfach am nächsten gelegene freie oder einfach belegte Lagerfach wurde in diesem Fall bereits bei der Einlagerung benutzt. Im Mittel vergrößert sich deshalb der Fachabstand zum nächsten Umlagerfach.

Die Umlagerung in den gegenüberliegenden Lagerkanal ist nur dann möglich, wenn der Lagerkanal ursprünglich leer war. Die Wahrscheinlichkeit  $P_{U0}$ , im Fachabstand 0 eine Umlagerung tätigen zu können, ist demnach:

$$P_{U0} = P_l^{dtL} \quad (4-43)$$

Um in der ersten Umgebung die Umlagerung durchführen zu können, müssen der gegenüberliegende Lagerkanal doppelt belegt und mindestens zwei Lagerfächer in der ersten Umgebung frei sein. Eine zweite Möglichkeit der Nutzung der ersten Umgebung entsteht, wenn der dem Auslagerfach gegenüberliegende Lagerkanal einfach belegt war und es noch mindestens ein freies Lagerfach in der ersten Umgebung gibt, bzw. nicht alle Fächer der ersten Umgebung doppelt belegt sind:

$$P_{U1} = P_d^{dtL} \cdot \left[ 1 - \left( P_d^{dtL16} + 16 \cdot P_d^{dtL15} \cdot P_e^{dtL} \right) \right] + P_e^{dtL} \cdot \left( 1 - P_d^{dtL16} \right) \quad (4-44)$$

Die Berechnungen werden bis zur dritten Umgebung fortgeführt:

$$P_{U2} = P_d^{dtL17} \cdot \left[ 1 - \left( P_d^{dtL32} + 32 \cdot P_d^{dtL31} \cdot P_e^{dtL} \right) \right] + 17 \cdot P_d^{dtL16} \cdot P_e^{dtL} \cdot \left( 1 - P_d^{dtL32} \right) \quad (4-45)$$

$$P_{U3} = P_d^{dtL49} \cdot \left[ 1 - \left( P_d^{dtL48} + 48 \cdot P_d^{dtL47} \cdot P_e^{dtL} \right) \right] + 49 \cdot P_d^{dtL48} \cdot P_e^{dtL} \cdot \left( 1 - P_d^{dtL48} \right) \quad (4-46)$$

Die Wahrscheinlichkeit  $P_{U_{Rest}}$ , dass kein Lagerkanal innerhalb der betrachteten Umgebungen benutzt werden kann, ist:

$$P_{U_{Rest}} = 1 - P_{U0} - P_{U1} - P_{U2} - P_{U3} \quad (4-47)$$

Bei einem Füllgrad von 95% beträgt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Lagerkanal innerhalb der ersten drei Umgebungen genutzt werden kann, 99,66%.

Im Anschluss werden wiederum die mittleren Fahrzeiten zu den einzelnen Umgebungen berechnet und mit der Nutzungswahrscheinlichkeit gewichtet. Daraus ergibt sich die mittlere Dauer einer Fahrt:

$$E(t_{UnNnEdtL}) = P_{U1} \cdot E(t_{U1}) + P_{U2} \cdot E(t_{U2}) + P_{U3} \cdot E(t_{U3}) + P_{U_{Rest}} \cdot E(t_{p,p}) \quad (4-48)$$

mit:

- $E(t_{UnNnEdtL})$  (Umlagerung nächster Nachbar nach Einlagerung) = mittlere Querfahrzeit vom Auslagerfach zum Umlagerfach nach vorhergehender Einlagerung
- $P_{Un}$  Nutzungswahrscheinlichkeit der n-ten Umgebung
- $E(t_{Un})$  mittlere Fahrzeit zwischen der n-ten Umgebung und Auslagerfach

#### 4.4.2.5 Belegungswahrscheinlichkeiten im doppeltiefen Lager mit doppelbreiter Gasse

Ein Vorteil der doppelbreiten Lagergasse ist die Möglichkeit der gleichzeitigen Einlagerung zweier Ladeeinheiten in einen leeren Lagerkanal. Durch die gemeinsame Einlagerung entfällt eine RBG-Fahrt und eine Lastzykluszeit. Die Verwendung dieser Einlagerstrategie verändert die Belegungscharakteristik im Vergleich zum einfachbreiten doppeltiefen Lager. Seemüller [See-06] leitet die Belegungswahrscheinlichkeiten unter den Voraussetzungen her, dass die Umlagerung immer in einen einfach belegten Lagerkanal und die Auslagerung immer aus einem doppelt belegten Lagerkanal erfolgt. Daraus ergibt sich der Zusammenhang, dass es gleich viele einfach belegte wie leere Lagerkanäle gibt. In Anlehnung an die Berechnungsmethode von Seemüller werden die folgenden Belegungswahrscheinlichkeiten ermittelt:

$$P_l^{dbG} = \begin{cases} \frac{2-2z}{3} & \text{für } z \geq \frac{1}{4} \\ 1-2z & \text{sonst} \end{cases} \quad (4-49)$$

$$P_e^{dbG} = \begin{cases} \frac{2-2z}{3} & \text{für } z \geq \frac{1}{4} \\ 2z & \text{sonst} \end{cases} \quad (4-50)$$

$$P_d^{dbG} = \begin{cases} \frac{4z}{3} - \frac{1}{3} & \text{für } z \geq \frac{1}{4} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4-51)$$

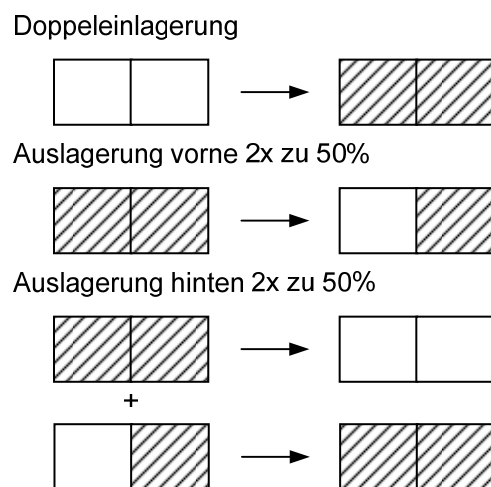
mit:

$z$	Lagerfüllgrad
$P_l^{dbG}$	Wahrscheinlichkeit für einen leeren Lagerkanal
$P_e^{dbG}$	Wahrscheinlichkeit für einen einfach belegten Lagerkanal
$P_d^{dbG}$	Wahrscheinlichkeit für einen doppelt belegten Lagerkanal

In diesem Modell werden Auslagerungen aus einfach belegten Lagerkanälen nicht berücksichtigt. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist bei hohen Lagerfüllgraden vernachlässigbar, bei niedrigeren muss das Gleichgewicht der Belegungszustände der Lagerkanäle durch einzelne Einlagerungen wiederhergestellt werden. Diese Spiele be-

nötigen etwas mehr Zeit (eine zusätzliche RBG-Fahrt sowie Lastzykluszeit), werden hier aber nicht weiter betrachtet.

Bei einem hohen Lagerfüllungsgrad ist Abbildung 4-12 gültig. Die Doppeleinlagerung erfolgt dann immer im leeren Lagerkanal und die Auslagerung erfolgt aus einem doppelt belegten Lagerkanal. Zu 50% wird dabei die vordere Ladeeinheit ausgelagert, was eine Umwandlung eines doppelt belegten Lagerkanals in einen einfach belegten bedeutet. Soll der Zugriff auf die hintere Ladeeinheit erfolgen, werden beide Ladeeinheiten des Lagerkanals gleichzeitig ausgelagert und die vordere Ladeeinheit dann in der Nähe des Auslagerfachs eingelagert. Ist das LAM vor der Auslagerung bereits mit einer Ladeeinheit besetzt, wird die Umlagerung wie im doppeltiefen Lager durchgeführt. Die vordere Ladeeinheit wird zuerst umgelagert und erst dann erfolgt der Zugriff auf die hintere Ladeeinheit. In beiden Fällen wird der Auslagerkanal komplett geleert und ein einfach belegter Lagerkanal durch die Umlagereinheit zu einem doppelt belegten aufgefüllt (vgl. auch mit 4.5.1.3). Durch den kombinierten Ein- und Auslagervorgang bleibt die Belegungscharakteristik der Regalwand unverändert.

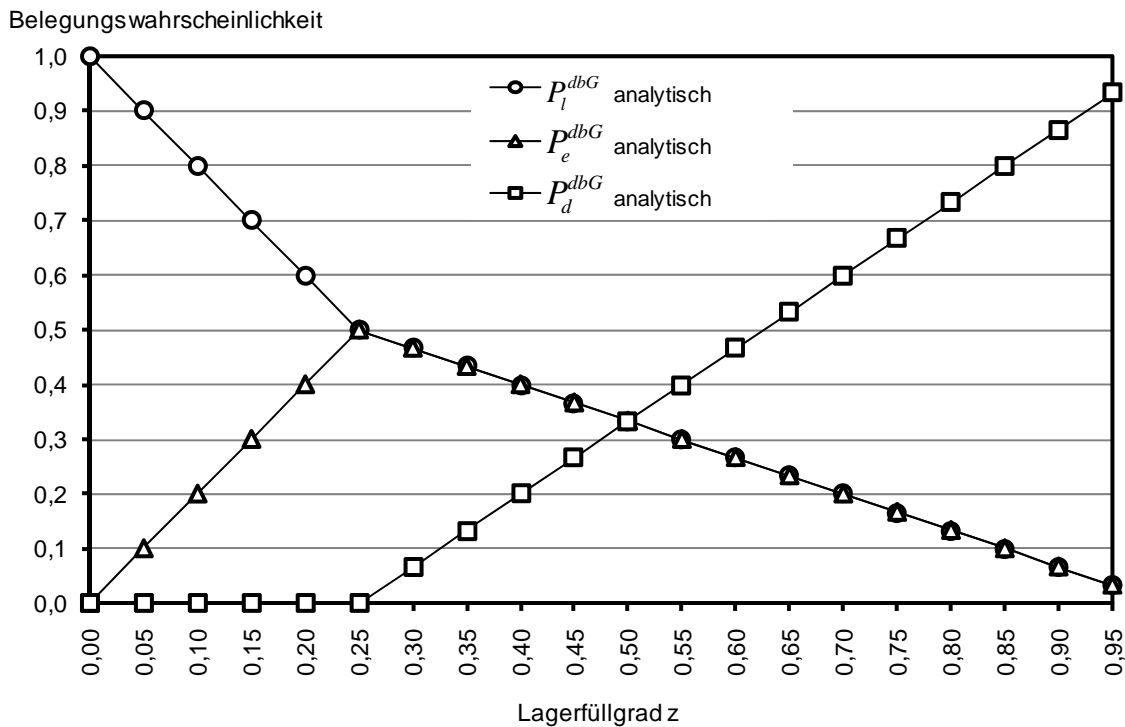


**Abbildung 4-12:** Zustandsänderungen der Lagerkanäle bei einer Doppeleinlagerung und zwei Auslagerungen

Abbildung 4-13 gibt die Belegung eines doppeltiefen Lagersystems mit doppelbreiter Gasse bei unterschiedlichen Füllgraden wieder. Bis zu einem Lagerfüllgrad von 25% befindet sich das Lager in einem Zustand, der für die beschriebenen Strategien nicht sinnvoll ist. Erst mit zunehmendem Füllgrad werden die Annahmen gültig und das

System kann in einen stationären Zustand kommen, in welchem sich die charakteristische Belegung der Lagergase nicht mehr ändert.

Die Gleichungen zur Beschreibung der Belegungswahrscheinlichkeiten können aufgrund der hier nicht beachteten Spiele zur Herstellung der Belegungsgleichgewicht nicht mit einer Monte-Carlo-Simulation überprüft werden.



**Abbildung 4-13:** Belegungswahrscheinlichkeiten im doppeltiefen Lager mit doppelter Gasse bei variablem Lagerfüllgrad

#### 4.4.2.6 Querfahrzeiten bei der Ein- und Umlagerung nahe Auslagerung im doppeltiefen Lager mit doppelter Gasse

Querfahrzeit vom doppelt bedienten Einlagerfach zum Auslagerfach  $E(t_{dEnNdbG})$

Wird im doppeltiefen Lager mit doppelter Gasse eine Doppelinlagerung durchgeführt, wird dazu ein leerer Lagerkanal benötigt. Die Wahrscheinlichkeit, dass der dem Auslagerfach gegenüberliegende Lagerkanal leer ist, entspricht der Gegenwahrscheinlichkeit für einen einfach oder doppelt belegten Lagerkanal:

$$P_{U0} = P_l^{dbG} = 1 - (P_e^{dbG} + P_d^{dbG}) \tag{4-52}$$

## Berechnung der Umschlagsleistung

---

Wenn der gegenüberliegende Lagerkanal nicht leer ist, kann das Einlagerfach in der ersten Umgebung liegen. Die Voraussetzung dafür ist, dass mindestens einer der 16 Lagerkanäle leer ist:

$$P_{U1} = (P_e^{dbG} + P_d^{dbG}) \cdot \left[ 1 - (P_e^{dbG} + P_d^{dbG})^{16} \right] \quad (4-53)$$

Die Berechnungen werden bis zur vierten Umgebung fortgeführt:

$$P_{U2} = (P_e^{dbG} + P_d^{dbG}) \cdot (P_e^{dbG} + P_d^{dbG})^{16} \cdot \left[ 1 - (P_e^{dbG} + P_d^{dbG})^{32} \right] \quad (4-54)$$

$$P_{U3} = (P_e^{dbG} + P_d^{dbG}) \cdot (P_e^{dbG} + P_d^{dbG})^{16} \cdot (P_e^{dbG} + P_d^{dbG})^{32} \cdot \left[ 1 - (P_e^{dbG} + P_d^{dbG})^{48} \right] \quad (4-55)$$

$$P_{U4} = (P_e^{dbG} + P_d^{dbG})^{97} \cdot \left[ 1 - (P_e^{dbG} + P_d^{dbG})^{64} \right] \quad (4-56)$$

Die Wahrscheinlichkeit  $P_{U_{Rest}}$ , dass kein Lagerkanal innerhalb der vier betrachteten Umgebungen benutzt werden kann, ist:

$$P_{U_{Rest}} = 1 - P_{U0} - P_{U1} - P_{U2} - P_{U3} - P_{U4} \quad (4-57)$$

Bei einem Füllgrad von 95% beträgt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Lagerkanal innerhalb der ersten vier Umgebungen genutzt werden kann, 99,57%.

Im Anschluss werden wiederum die mittleren Fahrzeiten zu den einzelnen Umgebungen berechnet und mit der Nutzungswahrscheinlichkeit gewichtet. Daraus ergibt sich die mittlere Dauer einer Fahrt:

$$E(t_{dEnN dbG}) = P_{U1} \cdot E(t_{U1}) + P_{U2} \cdot E(t_{U2}) + P_{U3} \cdot E(t_{U3}) + P_{U4} \cdot E(t_{U4}) + P_{U_{Rest}} \cdot E(t_{p,p}) \quad (4-58)$$

mit:

$E(t_{dEnN dbG})$  (doppelte Einlagerung nächste Nachbar) = mittlere Querfahrzeit vom doppelt bedienten Einlagerfach zum Auslagerfach

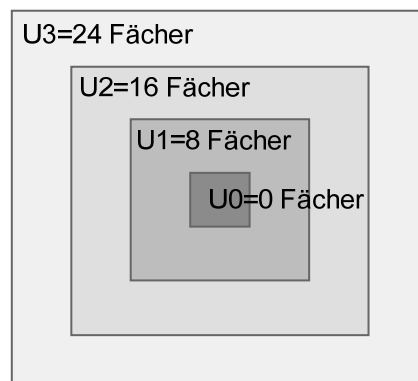
$P_{Un}$  Nutzungswahrscheinlichkeit der n-ten Umgebung

$E(t_{Un})$  mittlere Fahrzeit zwischen der n-ten Umgebung und Auslagerfach



**Querfahrzeit vom Auslagerfach zum Umlagerfach**  $E(t_{UnNdG})$

Wenn im doppeltiefen Lager mit doppelbreiter Gasse eine verdeckte Ladeinheit ausgelagert werden soll, wird der ganze Lagerkanal ausgelagert, wenn dem RBG ein leeres LAM zur Verfügung steht. Die nicht gebrauchte Ladeinheit wird anschließend in einen einfach belegten Lagerkanal eingelagert. Wenn das LAM bereits eine Auslagereinheit geladen hat, erfolgt die Umlagerung der vorderen Ladeinheit des Auslagerkanals und dann der Zugriff auf die eigentliche Ladeinheit, die ausgelagert werden soll. In beiden Fällen erfolgt die Umlagerung in einen einfach belegten Lagerkanal. Die umzulagernde Ladeinheit kann dabei nur auf eine Seite abgegeben werden, da sich auf der anderen Seite auf dem LAM eine Ladeinheit befindet. Die Suche nach dem nächsten einfach belegten Lagerkanal beschränkt sich deshalb nur auf eine Regalwand. Abbildung 4-14 gibt die Anzahl der Lagerfächer wieder, die je Umgebung für die Umlagerung in Betracht gezogen werden:



**Abbildung 4-14:** Skizze Anzahl der Lagerfächer einer Regalwand mit den Fachabständen 0-3 zu einem Auslagerfach

Bei der Umlagerung im doppeltiefen Lager mit doppelbreiter Gasse kann der dem Auslagerfach gegenüberliegende Lagerkanal nicht benutzt werden:

$$P_{U0} = 0 \tag{4-59}$$

In der ersten Umgebung sind 8 Lagerkanäle, die einfach belegt sein können:

$$P_{U1} = \left[ 1 - (P_t^{dbG} + P_d^{dbG})^8 \right] \tag{4-60}$$

## Berechnung der Umschlagsleistung

---

Wenn sich in der ersten Umgebung kein einfach belegter Lagerkanal befindet, kann das Umlagerfach in der zweiten Umgebung liegen. Dazu muss einer der 16 Lagerkanäle der zweiten Umgebung einfach belegt sein:

$$P_{U_2} = (P_l^{dbG} + P_d^{dbG})^8 \cdot \left[ 1 - (P_l^{dbG} + P_d^{dbG})^{16} \right] \quad (4-61)$$

Die selbe Berechnung wird für die Umgebungen drei bis fünf erweitert:

$$P_{U_3} = (P_l^{dbG} + P_d^{dbG})^8 \cdot (P_l^{dbG} + P_d^{dbG})^{16} \cdot \left[ 1 - (P_l^{dbG} + P_d^{dbG})^{24} \right] \quad (4-62)$$

$$P_{U_4} = (P_l^{dbG} + P_d^{dbG})^{48} \cdot \left[ 1 - (P_l^{dbG} + P_d^{dbG})^{32} \right] \quad (4-63)$$

$$P_{U_5} = (P_l^{dbG} + P_d^{dbG})^{80} \cdot \left[ 1 - (P_l^{dbG} + P_d^{dbG})^{40} \right] \quad (4-64)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass kein Lagerkanal innerhalb der betrachteten Umgebungen benutzt werden, kann ist:

$$P_{U_{Rest}} = 1 - P_{U_0} - P_{U_1} - P_{U_2} - P_{U_3} - P_{U_4} - P_{U_5} \quad (4-65)$$

Bei einem Füllgrad von 95% beträgt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Lagerkanal innerhalb der ersten fünf Umgebungen genutzt werden kann, 98,29%.

Im zweiten Schritt werden wiederum die mittleren Fahrzeiten zu den einzelnen Umgebungen berechnet und mit der Nutzungswahrscheinlichkeit der Umgebungen gewichtet. Daraus ergibt sich die mittlere Dauer einer Fahrt:

$$E(t_{UnNdG}) = P_{U_1} \cdot E(t_{U_1}) + P_{U_2} \cdot E(t_{U_2}) + P_{U_3} \cdot E(t_{U_3}) + P_{U_4} \cdot E(t_{U_4}) + P_{U_5} \cdot E(t_{U_5}) + P_{U_{Rest}} \cdot E(t_{p,p}) \quad (4-66)$$

mit:

- $E(t_{UnNdG})$  (Umlagerung nächster Nachbar) = mittlere Querfahrzeit vom doppelt bedienten Einlagerfach zum Auslagerfach
- $P_{U_n}$  Nutzungswahrscheinlichkeit der n-ten Umgebung
- $E(t_{U_n})$  mittlere Fahrzeit zwischen der n-ten Umgebung und Auslagerfach

### 4.4.3 Deterministische Modelle

Neben den bereits beschriebenen Spielzeitkomponenten, die den Mittelwert stochastisch verteilter Fahrzeiten abbilden, gibt es eine Reihe von Spielzeitkomponenten, welche deterministisch ermittelt werden können.

#### 4.4.3.1 Fachpositionierzeit

Neben den reinen Fahrzeiten des Fahr- und Hubwerks, müssen bei Arbeitsspielen noch Beruhigungs- und Positionierzeiten von RBG und LAM beachtet werden. Nach der Durchführung der Fachanfahrt ist es notwendig, den Mast des RBG ausschwingen zu lassen und das LAM für das Gabelspiel exakt auszurichten. In der Praxis überwiegt der Zeitanteil der Mastausschwingzeit die Positionierzeit, welche daher vernachlässigt werden kann. Die Mastausschwingzeit ist wesentlich von der Arbeitshöhe des LAM abhängig und ist nicht über die gesamte Regalhöhe konstant. Je größer die Höhe ist, in welcher sich das LAM mit der Ladeinheit bewegt, desto größere Schwingungen treten auf und umso höher ist die Beruhigungszeit. Von RBG sind häufig die Mastausschwingzeiten bei minimaler und maximaler Höhe des LAM bekannt. Durch eine lineare Interpolation können die Werte für die Zwischenhöhen angenähert werden. Bei gleichverteilter Belegung der Regalwand befindet sich das LAM in allen Bereichen des Regals mit der gleichen Wahrscheinlichkeit. Die mittlere Mastausschwingzeit  $t_{Mast}$  wird deshalb mit der folgenden Formel berechnet:

$$t_{Mast} = \frac{t_{Mast,max} - t_{Mast,min}}{h_{Mast}} \cdot \frac{h_R}{2} \quad (4-67)$$

mit:

$t_{Mast}$	mittlere Mastausschwingzeit
$t_{Mast,max}$	Mastausschwingzeit mit LAM auf maximaler Masthöhe
$t_{Mast,min}$	Mastausschwingzeit mit LAM auf minimaler Masthöhe
$h_{Mast,max}$	Masthöhe
$h_R$	Regalhöhe

#### 4.4.3.2 Totzeit

Bewegungen des RBG werden von Sensorik und Steuerungseinheiten ausgelöst und gesteuert. Durch Schalt- und Kontrollvorgänge treten deshalb bei jeder RBG- und LAM-Bewegung Totzeiten auf. Die Totzeiten sind unterschiedlich lang, werden in der

Praxis aber durch die Konstante  $t_{Tot} = 0,3 s$  angenähert. Diese Näherung ist sowohl für Hochregallager als auch für das Kleinteilelager gültig.

### 4.4.3.3 Lastzykluszeit

Die Übergabe von Ladeeinheiten mit dem LAM verursacht einen konstanten Zeitbedarf. Dieser setzt sich aus der Hub- und Senkzeit sowie der Fahrzeit des LAM zusammen und ist von der Geschwindigkeit und Beschleunigung des LAM und der zu überbrückenden Strecke abhängig. In der Praxis kommen unterschiedliche LAM-Konzepte zum Einsatz. Im Kleinteilebereich werden der Klemmriemenförderer und der Riemenzugförderer eingesetzt, Tablare werden mit der Tablarverschiebeinrichtung manipuliert und im Palettenlager wird vor allem die Teleskopgabel eingesetzt.

Auf die Lastzykluszeit für die Ein- oder Auslagerung einer Ladeeinheit hat neben den Eigenschaften des LAM die Lagertiefe Einfluss. Im einfachtiefen Lager fällt  $t_{L,et}$  bei der Ein- oder Auslagerung an. Im doppeltiefen Lager wird  $t_{L,dt}$  benötigt, um auf ein hinteres Lagerfach zugreifen zu können:

$t_{L,et}$  Lastzykluszeit für den einfachtiefen Lastzyklus

$t_{L,dt}$  Lastzykluszeit für den doppeltiefen Lastzyklus

Werden am Übergabepunkt nur Ladeeinheiten auf- oder abgegeben, wird dafür  $t_{L,ÜP,Aufn}$  bzw.  $t_{L,ÜP,Abg}$  benötigt.

$t_{L,ÜP,Aufn}$  Lastzykluszeit für die Aufnahme am Übergabepunkt

$t_{L,ÜP,Abg}$  Lastzykluszeit für die Abgabe am Übergabepunkt

Bei einem Mehrfachspiel erfolgt die Auf- und Abgabe nacheinander, weshalb  $t_{L,ÜP,Abg}$  und  $t_{L,ÜP,Aufn}$  summiert werden. Im Kleinteilebereich werden die Ladeeinheiten am Übergabepunkt häufig zeitgleich aufgegeben und abgenommen (vergleiche Abschnitt 2.3.2.8). Die benötigte Lastzykluszeit  $t_{L,ÜP,Aufn+Abg}$  entspricht dabei im Idealfall genau der längeren Komponente der Aufgabe und Abnahme:

$$\max(t_{L,ÜP,Aufn}; t_{L,ÜP,Abg}) \leq t_{L,ÜP,Aufn+Abg} \leq t_{L,ÜP,Aufn} + t_{L,ÜP,Abg} \quad (4-68)$$

mit:

$t_{L,ÜP,Aufn+Abg}$  Lastzykluszeit für die Aufnahme und Abgabe am Übergabepunkt

#### 4.4.3.4 Wechselfahrzeiten

Wechselfahrzeiten  $t_{W \ddot{U}A \rightarrow \ddot{U}E}$  zwischen den Übergabepunkten werden notwendig, wenn der Aufnahme- und Abgabepunkt (ÜE und ÜA) getrennt sind und sich nicht mehr auf einer Höhe gegenüberliegen. Die Fahrten zwischen diesen Punkten werden über die Fahrzeitberechnung unter Berücksichtigung der Tschebyschefffahrt berechnet (Formel (4-3)).

### 4.5 Berechnung der mittleren Spielzeit einer Lagergasse

Für die Umschlagsleistungsbestimmung eines Hochregallagers sind drei Fälle zu unterscheiden, die je nach Einsatzfall unterschiedlich wichtig sind. Die Maximalleistung eines Lagersystems wird meistens für kombinierte Arbeitsspiele, d.h. für Spiele, in denen Ein- und Auslagerungen kombiniert durchgeführt werden, angegeben. Die Kenngröße ist dabei die Anzahl der Ladeeinheiten pro Zeiteinheit, die ein- oder ausgelagert werden. Für gewisse Anwendungsfälle ist aber nicht die kombinierte Leistung  $\lambda_{EA}$  ausschlaggebend, sondern die Umschlagsleistung in Spitzenzeiten, in denen reine Einlagerspiele  $\lambda_E$  (z. B. Einlagerung von angelieferter Ware zu einer bestimmten Tageszeit) oder reine Auslagerspiele  $\lambda_A$  (z. B. schnelle Auslagerung von Kundenbestellungen zu einer bestimmten Tageszeit) gefahren werden. Das entwickelte Modell ist dafür ausgelegt, alle drei Spielarten abzudecken und erlaubt es auch, vermischte Grenzleistungen zu berechnen.

Die Basis zur Bestimmung der Umschlagsleistung ist die Berechnung der Spielzeit eines Arbeitsspiels. Das Arbeitsspiel setzt sich in Abhängigkeit von Lagerkonfiguration und -strategie aus der Summe von Spielzeitkomponenten zusammen. Mit den in Abschnitt 4.4 vorgestellten Spielzeitkomponenten können die in Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 dargestellten Lagerkonfigurationen und Lagerstrategien abgebildet werden. Die durchgestrichenen Ausprägungen werden mit den angewendeten Modellen nicht abgebildet, sind aber prinzipiell durch eine Erweiterung dieser darstellbar.

**Tabelle 4-1: Abgebildete Lagerkonfigurationen**

Lagerkonfigurationsparameter	Ausprägungsformen		
Lagertiefe	einfachtief (etL)		doppeltief (dtL)
Anzahl Lastaufnahmemittel pro RBG	1	2	3
Lastaufnahmemittel- / Gassenbreite <sup>9</sup>	einfachbreit		doppelbreit (dbG)
Wirkungsbereich des RBG	eingassig		mehrgassig
Anzahl Übergabepunkte pro Gasse	2	3	4
Lage der Übergabepunkte	In einem Eckpunkt des Regals		In x- oder y-Richtung verschoben

**Tabelle 4-2: Abgebildete Lagerstrategien**

Lagerstrategien	Ausprägungsformen			
Spielart / Bewegungsstrategie	reines Einlagerspiel		reines Auslagerspiel	kombiniertes Ein- und Auslagerspiel
Ruhepositionsstrategie	Verweilen am letzten Aktionsort	Rückkehr zum ÜE beim Einlagerspiel - Verweilen am ÜA beim Auslagerspiel und kombinierten Spiel	Rückkehr zum ÜE	Fahrt in die Regalgasse
Einlagerstrategie	zufällige Einlagerung <sup>10</sup>	Einlagerung nahe Auslagerung	zonierte Einlagerung (ABC)	Doppeleinlagerung nahe Auslagerung
Auslagerstrategie	strenges FIFO		abgeschwächtes FIFO	
Umlagerstrategie	keine Umlagerung	zufällige Umlagerung	Umlagerung nahe Auslagerung	
Übergabepunktstrategie	getrennte Abgabe und Aufnahme		parallele Abgabe und Aufnahme	
Reihenfolgestrategie	keine Reihenfolgestrategie		Fahrwegoptimierung	

Insgesamt werden in dem Forschungsprojekt „Integrierte Lagersystemplanung“ 117 praxisrelevante Arbeitsspiele definiert, die sich aus Kombinationen der Lagerkonfigurationen mit den Lagerstrategien ableiten. Eine Verschiebung der Übergabepunkte und unterschiedliche Übergabepunktstrategien sind dabei noch zusätzlich möglich. Diese beeinflussen lediglich die Länge von Spielzeitkomponenten, nicht aber den prinzipiellen Aufbau der Arbeitsspiele.

<sup>9</sup> auch als Gassentiefe bezeichnet

<sup>10</sup> auch als chaotische Lagerung bekannt

### 4.5.1 Berechnung der Spielzeit unabhängiger Arbeitsspiele

Werden die drei Spielarten Einlagerspiel, Auslagerspiel und kombiniertes Ein- und Auslagerspiel nur für sich betrachtet, sind diese unabhängig voneinander und die Berechnung der Arbeitsspiele erfolgt unabhängig von den Leistungsanforderungen an das Lagersystem.

#### 4.5.1.1 Einfachtiefes Lager

Das Arbeitsspiel im einfachtiefen Lager setzt sich aus Vorgängen für die Aufnahme und Abgabe von Ladeeinheiten am Übergabepunkt, Ein- und Auslagervorgängen sowie Fahrten zwischen diesen Vorgängen zusammen (vgl. Abbildung 4-15). Bei Ein- oder Auslagerspielen mit mehreren LAM wiederholen sich die Vorgänge, bis alle Ladeeinheiten ein- oder ausgelagert sind. Bei kombinierten Ein- und Auslagerspielen wechseln sich die Ein- und Auslagervorgänge ab.



**Abbildung 4-15:** Ein- und Auslagervorgänge im einfachtiefen Lager

#### Einlagervorgang

Der Einlagervorgang besteht aus der Fahrt zum Fach und der eigentlichen Einlagerung, welche durch die Lastzykluszeit  $t_{Let}$  abgebildet wird.

#### Auslagervorgang

Der Auslagervorgang besteht aus der Fahrt zum Auslagerfach und der Auslagerung. Diese wird durch die Lastzykluszeit  $t_{Let}$  abgebildet.

### Fahrten

Die Spielzeitkomponenten, welche die Fahrten zu den Lagerfächern abbilden, sind von der Lagerstrategie und dem Startpunkt der Fahrt abhängig. Erfolgt die Fahrt vom Übergabepunkt aus, dann wird die Einfahrtzeit  $E(t_{\ddot{u},p})$  oder bei einem verschobenem Übergabepunkt  $E(t_{\ddot{u},p})_{x=x_{\ddot{u}P},y=y_{\ddot{u}P}}$  angewendet. Liegt der Startpunkt nach einer vorangegangenen Ein- oder Auslagerung in der Regalgasse (wie es beim Einsatz mehrerer LAM möglich ist), dann erfolgt eine Querfahrt  $E(t_{p,p})$ . Stehen dem RBG bei der Querfahrt mehrere Ein- oder Auslagerfächer zu Auswahl, dann wird eine Fahrwegoptimierung über die verkürzten Querfahrzeiten zu  $n$  Punkten  $E(t_{p,np})$  abgebildet. Wenn die Einlagerstrategie *Einlagerung nahe Auslagerung* angewendet wird, bildet  $E(t_{EnNetL})$  die Querfahrzeit zwischen dem Ein- und dem Auslagerfach ab.

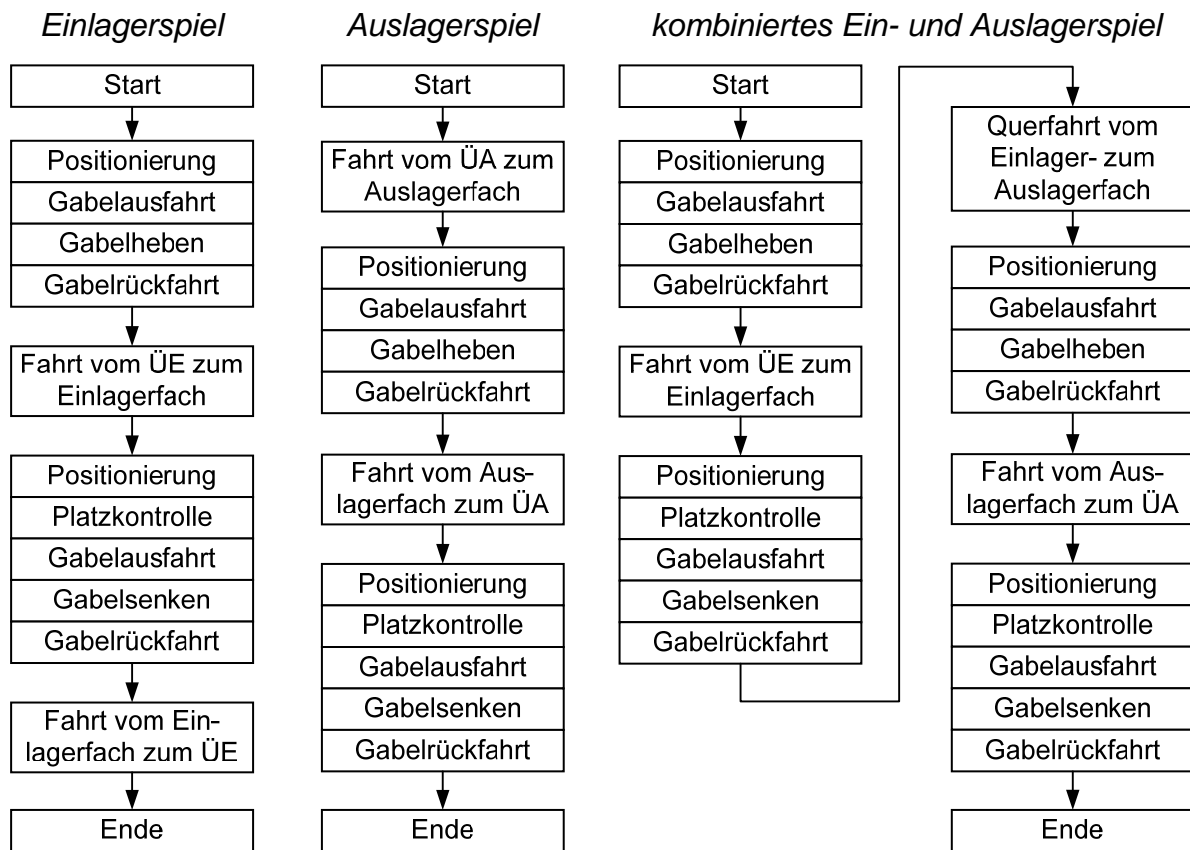
### Aufnahme und Abgabe

Nachdem die letzte Ladeeinheit ein- bzw. ausgelagert wurde, erfolgt die Ausfahrt aus der Regalgasse. Am Übergabepunkt werden die Ladeeinheiten abgegeben (in der Zeit  $t_{L\ddot{u}P\ Abg}$ ) und/oder neue Ladeeinheiten aufgenommen (mit der Zeitdauer  $t_{L\ddot{u}P\ Aufn}$ ). Liegen sich ÜA und ÜE direkt gegenüber, können beim kombinierten Spiel und entsprechender Übergabepunktstrategie die Ladeeinheiten gleichzeitig abgegeben und aufgenommen werden ( $t_{L\ddot{u}P\ Aufn+Abg}$ ). Ansonsten erfolgt eine Wechselfahrt der Dauer  $t_{W\ \ddot{u}A\rightarrow\ddot{u}E}$  zwischen den beiden ÜP.

### Beispiel 1

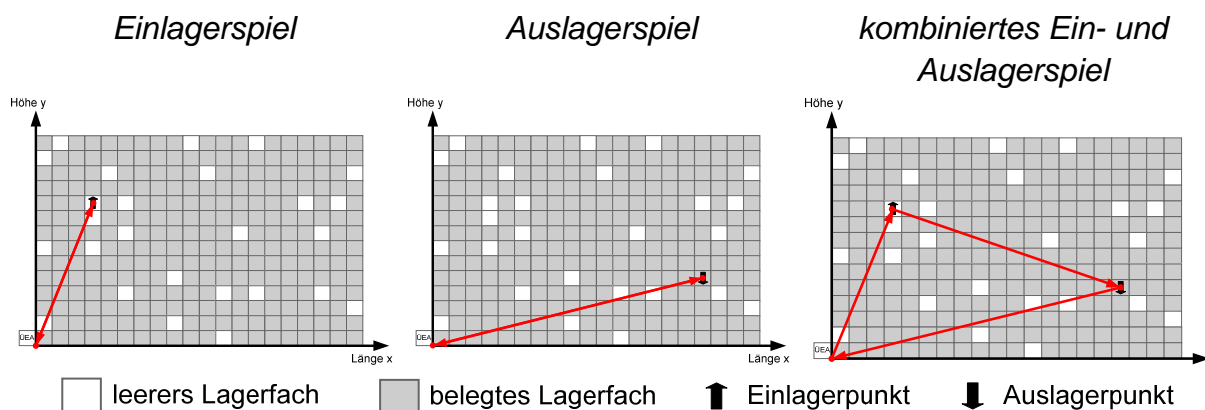
Die Richtlinie FEM 9.851 [FEM9.851] beschreibt für das einfachtiefe Lager, welches mit einem RBG mit einem LAM und der Strategie *zufällige Einlagerung* betrieben wird, den Spielablauf für die zwei Einzelspiele und das kombinierte Ein- und Auslagerpiel (vgl. Abbildung 4-16).





**Abbildung 4-16:** Spielablauf im einfachtiefen Lager mit einem LAM nach [FEM9.851]

Mit dem in dieser Arbeit beschriebenen Modell werden die Abläufe für das mittlere Arbeitsspiel analog dazu nachgebildet. Abbildung 4-17 skizziert die Arbeitsspiele.



**Abbildung 4-17:** Skizze Einfachtiefes Lager mit einem LAM und der Strategie zufällige Einlagerung

Das Einlagerspiel beginnt mit der Aufnahme am Übergabepunkt und der anschließenden Einfahrt in die Regalgasse zum Einlagerfach. Die Ladeinheit wird einfach-

tief eingelagert und im Anschluss daran erfolgt die Ausfahrt aus dem Regal zum Übergabepunkt. Die Fahrten werden mittels der stochastischen Mittelwerte aus Abschnitt 0 abgebildet und mit der Mastauschwingzeit sowie Totzeit ergänzt. Zu den Bewegungen des LAM wird lediglich die Totzeit addiert:

$$E(t_{E\text{ Spiel}}) = t_{L\ddot{U}P\text{ Aufn}} + t_{Tot} + E(t_{\ddot{u},p}) + t_{Tot} + t_{Mast} + t_{Let} + t_{Tot} + E(t_{\ddot{u},p}) + t_{Tot} + t_{Mast} \quad (4-69)$$

Das Auslagerspiel beginnt ebenfalls am Übergabepunkt. Es erfolgt unmittelbar die Einfahrt in die Regalgasse zum Auslagerfach. Nach der einfachtiefen Auslagerung fährt das RBG aus der Gasse aus und übergibt die Ladeeinheit am Übergabepunkt:

$$E(t_{A\text{ Spiel}}) = E(t_{\ddot{u},p}) + t_{Tot} + t_{Mast} + t_{Let} + t_{Tot} + E(t_{\ddot{u},p}) + t_{Tot} + t_{Mast} + t_{L\ddot{U}P\text{ Abg}} + t_{Tot} \quad (4-70)$$

Das kombinierte Spiel ist in diesem Fall ein Doppelspiel. Es ist eine Kombination der beiden vorangegangenen Spielarten. Am Übergabepunkt erfolgt je nach Übergabepunktstrategie die gleichzeitige oder getrennte Abgabe und Aufnahme einer Ladeeinheit. Das RBG fährt dann in die Regalgasse ein und führt die Einlagerung aus. Aufgrund der Einlagerstrategie findet diese in einem beliebigen leeren Lagerfach im Regal statt. Um zum Auslagerfach zu kommen und das frei gewordene LAM zu befüllen, wird eine Querfahrt durchgeführt. Der Auslagervorgang wird mit der einfachtiefen Lastzykluszeit nachgebildet. Als letzter Schritt erfolgt die Ausfahrt:

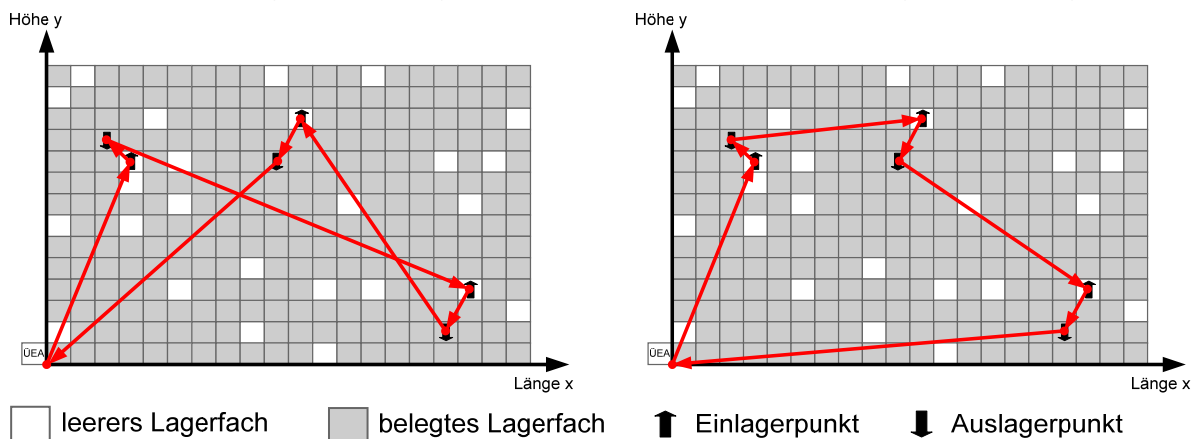
$$E(t_{EA\text{ Spiel}}) = t_{L\ddot{U}P\text{ Aufn+Abg}} + t_{Tot} + E(t_{\ddot{u},p}) + t_{Tot} + t_{Mast} + t_{Let} + t_{Tot} + E(t_{p,p}) + t_{Tot} + t_{Mast} + t_{Let} + t_{Tot} + E(t_{\ddot{u},p}) + t_{Tot} + t_{Mast} \quad (4-71)$$

### Beispiel 2

Kommen mehrere LAM zum Einsatz, verlängern sich die Arbeitsspiele. Im Folgenden werden zwei Arbeitsspiele vorgestellt, welche im einfachtiefen Lager mit drei LAM und der Einlagerstrategie *Einlagerung nahe Auslagerung* anfallen. Einmal wird das Arbeitsspiel ohne Fahrwegoptimierung durchgeführt und einmal mit der Strategie (vgl. Abbildung 4-18)

kombiniertes Ein- und Auslagerspiel ohne Fahrwegoptimierung

kombiniertes Ein- und Auslagerspiel mit Fahrwegoptimierung



**Abbildung 4-18:** Skizze für das einfachtiefe Lager mit drei LAM, der Strategie *Einlagerung nahe Auslagerung* und unterschiedlichen Reihenfolgestrategien

Die Skizzen zeigen ein einfachtiefes Lager mit drei LAM und der Strategie *Einlagerung nahe Auslagerung*. Das kombinierte Spiel setzt sich aus der Aufnahme und Abgabe der Ladeeinheiten am Übergabepunkt und der Einfahrt zum ersten Einlagerfach, welches in der Nähe des ersten Auslagerfachs liegt, zusammen. Nach der Einlagerung erfolgen die Fahrt zum Auslagerfach und die Auslagerung. In der linken Skizze fährt das RBG anschließend mittels einer Querfahrt zu einem leeren Fach in der Nähe eines der beiden verbleibenden Auslagerfächer, wo die nächste Einlagerung stattfinden kann. Die Vorgänge zur Ein- und Auslagerung wiederholen sich zwei weitere Male, bis alle drei LAM ihre Ladeeinheiten eingelagert und die vorgegebenen Ladeeinheiten ausgelagert haben.

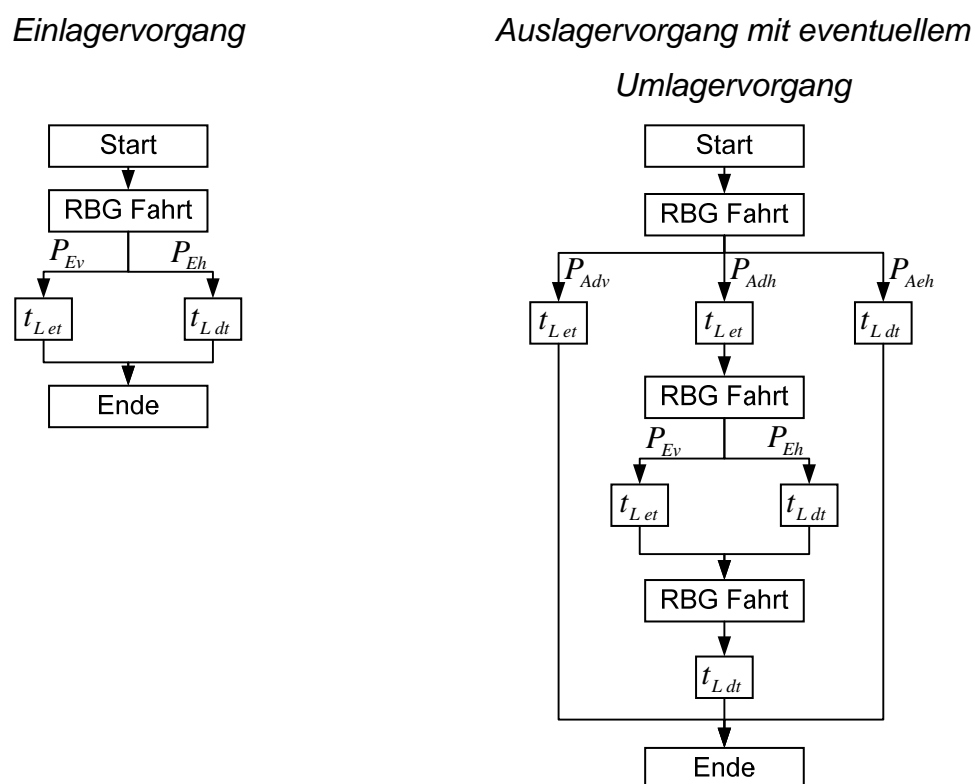
$$\begin{aligned}
 E(t_{EA\text{Spiel}}) &= t_{LÜP\text{ Aufn+Abg}} + 6 \cdot t_{Let} + \\
 E(t_{ü,p}) + E(t_{EnNetL}) + E(t_{p,p}) + E(t_{EnNetL}) + E(t_{p,p}) + E(t_{EnNetL}) + E(t_{ü,p}) + & \quad (4-72) \\
 + 14 \cdot t_{Tot} + 7 \cdot t_{Mast}
 \end{aligned}$$

Bei einer Reihenfolgeoptimierung kann nach der ersten Einlagerung aus zwei Einlagerfächern ausgewählt werden. Für diesen Fall kommen verkürzte Querfahrzeiten zur Anwendung (siehe auch die rechte Skizze):

$$\begin{aligned}
 E(t_{EA\text{Spiel}}) &= t_{LÜP\text{ Aufn+Abg}} + 6 \cdot t_{Let} + \\
 E(t_{ü,p}) + E(t_{EnNetL}) + E(t_{2p,p}) + E(t_{EnNetL}) + E(t_{p,p}) + E(t_{EnNetL}) + E(t_{ü,p}) + & \quad (4-73) \\
 + 14 \cdot t_{Tot} + 7 \cdot t_{Mast}
 \end{aligned}$$

### 4.5.1.2 Doppeltiefes Lager

Das Arbeitsspiel im doppeltiefen Lager setzt sich aus Vorgängen für die Aufnahme und Abgabe von Ladeinheiten am Übergabepunkt, Ein-, Aus- und Umlagervorgängen sowie Fahrten zwischen diesen Vorgängen zusammen (vgl. Abbildung 4-19). Bei Ein- oder Auslagerspielen mit mehreren LAM wiederholen sich die Vorgänge bis alle Ladeeinheiten ein- oder ausgelagert sind. Bei kombinierten Ein- und Auslagerspielen wechseln sich die Ein- und Auslagervorgänge ab.



**Abbildung 4-19:** Ein- und Auslagervorgänge im doppeltiefen Lager

#### Einlagerung

Der Einlagervorgang setzt sich aus der Fahrt zum Fach und der Einlagerung zusammen. Diese kann einfachtief  $t_{L,et}$  oder doppeltief  $t_{L,dt}$  erfolgen. Die Wahrscheinlichkeiten  $P_{Ev}$  für die Einlagerung in einen einfach belegten Lagerkanal und  $P_{Eh}$  für die Einlagerung in einen leeren Lagerkanal ergeben sich aus der Belegung der Regalwand [Lip-03]. Die beiden Wahrscheinlichkeiten entsprechen den mittleren Häufigkeiten für den einfachtiefen und doppeltiefen Lastzyklus.

$$P_{Ev} = H_{E\,dtL}(t_{L\,et}) = \frac{P_e^{dtL}}{P_e^{dtL} + P_l^{dtL}} \quad (4-74)$$

mit:

$P_{Ev}$  Wahrscheinlichkeit für eine Einlagerung in einen einfach belegten Lagerkanal vorne  
 $H_{E\,dtL}(t_{L\,et})$  Mittlere Häufigkeit für einen einfachtiefen Lastzyklus bei einem Einlagervorgang

$$P_{Eh} = H_{E\,dtL}(t_{L\,dt}) = \frac{P_l^{dtL}}{P_e^{dtL} + P_l^{dtL}} \quad (4-75)$$

mit:

$P_{Eh}$  Wahrscheinlichkeit für eine Einlagerung in einen leeren Lagerkanal hinten  
 $H_{E\,dtL}(t_{L\,dt})$  Mittlere Häufigkeit für einen doppeltiefen Lastzyklus bei einem Einlagervorgang

### Auslagerung

Der Auslagervorgang setzt sich aus der Fahrt zum Auslagerfach und der Auslagerung mit einer eventuell notwendigen Umlagerung zusammen. Die Auslagerung selbst kann wiederum einfachtief  $t_{L\,et}$  oder doppeltief  $t_{L\,dt}$  erfolgen. Mit der Wahrscheinlichkeit  $P_{Aeh}$  wird auf eine Ladeeinheit zugegriffen, die in einem einfach belegten Lagerkanal hinten steht. In einem doppelt belegten Lagerkanal wird mit der Wahrscheinlichkeit  $P_{Adv}$  auf die vordere Ladeeinheit zugegriffen. Erfolgt im doppeltiefen Lager der Zugriff auf eine verdeckt stehende Ladeeinheit (mit der Wahrscheinlichkeit  $P_{Adh}$ ), so muss eine Umlagerung durchgeführt werden, um an die Ladeeinheit zu kommen. Die Wahrscheinlichkeiten  $P_{Aeh}$ ,  $P_{Adv}$  und  $P_{Adh}$  werden aus der Belegung der Regalwand abgeleitet [Lip-03]:

$$P_{Adv} = P_{Adh} = \frac{P_d^{dtL}}{P_e^{dtL} + 2P_d^{dtL}} \quad (4-76)$$

mit:

$P_{Adv}$  Wahrscheinlichkeit für eine Auslagerung aus einem doppelt belegten Lagerkanal vorne  
 $P_{Adh}$  Wahrscheinlichkeit für eine Auslagerung aus einem doppelt belegten Lagerkanal hinten

$$P_{Aeh} = \frac{P_e^{dtL}}{P_e^{dtL} + 2P_d^{dtL}} \quad (4-77)$$

mit:

$P_{Aeh}$  Wahrscheinlichkeit für eine Auslagerung aus einem einfach belegten Lagerkanal hinten

Bei der Umlagerung wird die vorne stehende Ladeeinheit ausgelagert ( $t_{L,et}$ ) und mit dem RBG zu einem freien Lagerfach gefahren. An dem Fach erfolgt die Einlagerung der Ladeeinheit (mit  $P_{Ev}$  einfachtief und  $P_{Eh}$  doppeltief). Nach der Einlagerung erfolgt die Rückfahrt zum Auslagerfach und die doppeltiefe Auslagerung  $t_{L,dt}$  der ursprünglichen Auslagerladeeinheit.

Die Häufigkeit  $H_{A,dtL}(t_{L,et})$  der einfachtiefen und  $H_{A,dtL}(t_{L,dt})$  der doppeltiefen Lastzyklen, die bei einem Auslagervorgang im Mittel anfallen, werden über die beiden folgenden Formeln ausgedrückt:

$$H_{A,dtL}(t_{L,et}) = P_{Adv} + P_{Adh} \cdot (1 + P_{Ev}) \quad (4-78)$$

$$H_{A,dtL}(t_{L,dt}) = P_{Aeh} + P_{Adh} \cdot (1 + P_{Eh}) \quad (4-79)$$

mit:

$H_{A,dtL}(t_{L,et})$  Mittlere Häufigkeit für einen einfachtiefen Lastzyklus bei einem Auslagervorgang  
 $H_{A,dtL}(t_{L,dt})$  Mittlere Häufigkeit für einen doppeltiefen Lastzyklus bei einem Auslagervorgang

### Fahrten

Die Spielzeitkomponenten, welche die Fahrten zu den Lagerfächern abbilden, sind von der Lagerstrategie und dem Startpunkt der Fahrt abhängig. Erfolgt die Fahrt vom Übergabepunkt aus, dann wird die Einfahrtzeit  $E(t_{ü,p})$  oder bei einem verschobenem Übergabepunkt  $E(t_{ü,p})_{x=x_{ÜP}, y=y_{ÜP}}$  angewendet. Liegt der Startpunkt nach einer vorangegangenen Ein- oder Auslagerung im Regal, wie es beim Einsatz mehrerer LAM möglich ist, dann erfolgt eine Querfahrt  $E(t_{p,p})$ . Kann das RBG bei der Querfahrt aus mehreren Ein- oder Auslagerfächern auswählen, dann wird eine Fahrwegoptimierung über die verkürzten Querfahrzeiten zu  $n$  Punkten  $E(t_{p,np})$  abgebildet. Wenn die Einlagerstrategie *Einlagerung nahe Auslagerung* angewendet wird, bildet  $E(t_{EnN,dtL})$  die Querfahrzeit zwischen dem Ein- und dem Auslagerfach ab. Die Fahrten zum Umla-

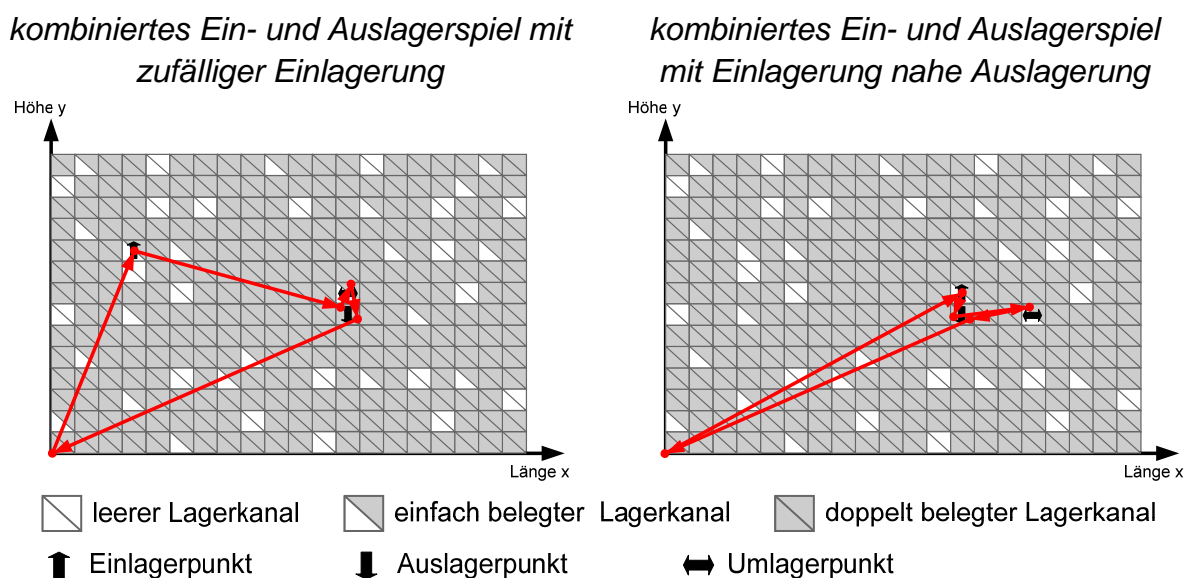
gerfach finden bei der *zufälligen Umlagerung* zu einem zufällig ausgewählten freien Lagerfach in der Regalwand statt und werden mit der Querfahrt  $E(t_{p,p})$  dargestellt. Wird die Strategie *Umlagerung nahe Auslagerung* verwendet, verkürzt sich die Querfahrt  $E(t_{UnNdL})$ . Hat aufgrund der Einlagerstrategie bereits eine Einlagerung in der Nähe des Auslagerfachs stattgefunden, muss die Querfahrt  $E(t_{UnNdL})$  verwendet werden, da diese den Einfluss des bereits für die Einlagerung genutzten Lagerfachs berücksichtigt.

### Aufnahme und Abgabe

Die Abgabe und Aufnahme der Ladeeinheiten unterscheidet sich nicht von der Vorgehensweise im einfachtiefen Lager (vgl. Abschnitt 4.5.1.1).

### Beispiel

In Abbildung 4-20 sind zwei Arbeitsspiele für die doppeltiefe Lagerungen skizziert. Es kommt jeweils ein LAM zum Einsatz, welches in der linken Skizze mit der Einlagerstrategie *zufällige Einlagerung* und in der rechten Skizze mit der Strategie *Einlagerung nahe Auslagerung* betrieben wird. Die Umlagerungen werden bei beiden Arbeitsspielen in der Nähe des Auslagerfachs durchgeführt.



**Abbildung 4-20:** Skizze für das doppeltiefe Lager mit einem LAM, der Strategie *Umlagerung nahe Auslagerung* und unterschiedlichen Einlagerstrategien

Das links dargestellte kombinierte Ein- und Auslagerspiel startet mit der Aufnahme und Abgabe der Ladeeinheiten am Übergabepunkt und einer Einfahrt zum ersten Einlagerfach. Dieses Lagerfach wird zufällig aus allen freien Lagerfächern ausgewählt. Nach der Einlagerung erfolgen die Fahrt zum Auslagerfach und die Auslagerung. Im Falle der Auslagerung einer verdeckt stehenden Ladeeinheit wird eine Umlagerung möglichst nahe am Auslagerfach durchgeführt und nach der Rückkehr zum Auslagerfach kann dann die gewünschte Ladeeinheit ausgelagert werden. Im Anschluss erfolgt die Rückfahrt zum Übergabepunkt.

$$\begin{aligned}
 E(t_{EA\text{Spiel}}) &= t_{L\ddot{U}P\text{Aufn+Abg}} + t_{Tot} + \\
 &E(t_{\ddot{u},p}) + t_{Tot} + t_{Mast} + H_{E\text{dtL}}(t_{L\text{et}}) \cdot (t_{L\text{et}} + t_{Tot}) + H_{E\text{dtL}}(t_{L\text{dt}}) \cdot (t_{L\text{dt}} + t_{Tot}) + \\
 &E(t_{p,p}) + t_{Tot} + t_{Mast} + \\
 &2 \cdot (E(t_{UnN\text{dtL}}) + t_{Tot} + t_{Mast}) + H_{A\text{dtL}}(t_{L\text{et}}) \cdot (t_{L\text{et}} + t_{Tot}) + H_{A\text{dtL}}(t_{L\text{dt}}) \cdot (t_{L\text{dt}} + t_{Tot}) + \\
 &E(t_{\ddot{u},p}) + t_{Tot} + t_{Mast}
 \end{aligned} \tag{4-80}$$

Das Arbeitsspiel in der rechten Skizze ist sehr ähnlich aufgebaut. Das Arbeitsspiel unterscheidet sich nur darin, dass aufgrund der Einlagerstrategie das Einlagerfach in der Nähe des Auslagerfachs gewählt wird. Deshalb ist bei einer eventuellen Umlagerung darauf zu achten, dass das zum Auslagerfach am nächsten freie Lagerfach bereits besetzt wurde.

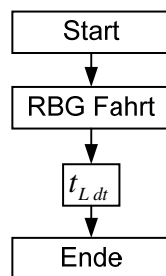
$$\begin{aligned}
 E(t_{EA\text{Spiel}}) &= t_{L\ddot{U}P\text{Aufn+Abg}} + t_{Tot} + \\
 &E(t_{\ddot{u},p}) + t_{Tot} + t_{Mast} + H_{E\text{dtL}}(t_{L\text{et}}) \cdot (t_{L\text{et}} + t_{Tot}) + H_{E\text{dtL}}(t_{L\text{dt}}) \cdot (t_{L\text{dt}} + t_{Tot}) + \\
 &E(t_{EnN\text{dtL}}) + t_{Tot} + t_{Mast} + \\
 &2 \cdot (E(t_{UnN\text{nE\text{dtL}}}) + t_{Tot} + t_{Mast}) + H_{A\text{dtL}}(t_{L\text{et}}) \cdot (t_{L\text{et}} + t_{Tot}) + H_{A\text{dtL}}(t_{L\text{dt}}) \cdot (t_{L\text{dt}} + t_{Tot}) + \\
 &E(t_{\ddot{u},p}) + t_{Tot} + t_{Mast}
 \end{aligned} \tag{4-81}$$



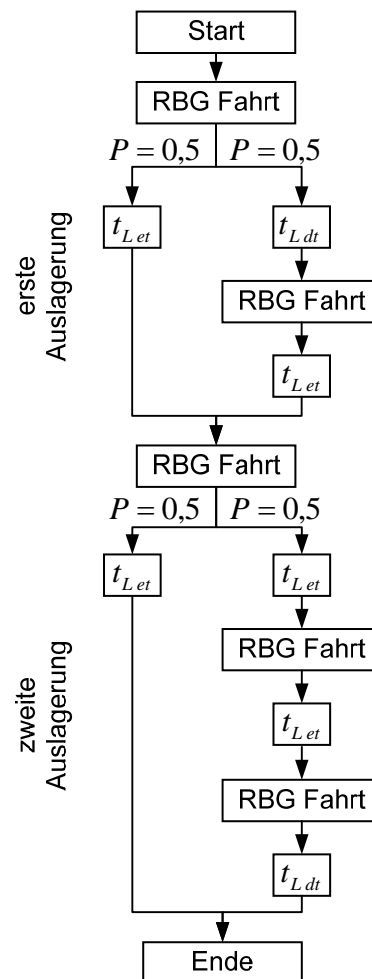
### 4.5.1.3 Doppeltiefes Lager mit doppelbreiter Gasse

Das Arbeitsspiel im doppeltiefen Lager mit doppelbreiter Gasse setzt sich aus Vorgängen für die Aufnahme und Abgabe von Ladeeinheiten am Übergabepunkt, Ein-, Aus- und Umlagervorgängen sowie Fahrten zwischen diesen Vorgängen zusammen (vgl. Abbildung 4-21). Bei Ein- oder Auslagerspielen mit mehreren LAM wiederholen sich die Vorgänge, bis alle Ladeeinheiten ein- oder ausgelagert sind. Bei kombinierten Ein- und Auslagerspielen wechseln sich die Ein- und Auslagervorgänge ab.

*Doppeleinlagerungsvorgang*



*zwei zusammenhängende Auslagerungsvorgänge mit Umlagervorgang*



**Abbildung 4-21:** Ein- und Auslagervorgänge im doppeltiefen Lager mit doppelbreiter Gasse

### Einlagerung

Der Einlagervorgang setzt sich aus der Fahrt zu einem leeren Lagerkanal und der doppeltiefen Einlagerung  $t_{Ldt}$  zusammen. Die mittlere Häufigkeit für den doppeltiefen Lastzyklus wird analog dem vorhergehenden Abschnitt ausgedrückt und ist genau 1. Arbeitsspiele mit einer ungeraden Anzahl an einzulagernden Ladeeinheiten, welche dementsprechend einfache Einlagerungsvorgänge anstatt Doppeleinlagerungsvorgängen bedingen würden, werden nicht berücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.4.2.5).

$$H_{E\,dbG}(t_{Let})=0 \quad (4-82)$$

$$H_{E\,dbG}(t_{Ldt})=1 \quad (4-83)$$

mit:

$H_{E\,dbG}(t_{Let})$  Mittlere Häufigkeit für einen einfachtiefen Lastzyklus bei einer Doppeleinlagerung  
 $H_{E\,dbG}(t_{Ldt})$  Mittlere Häufigkeit für einen doppeltiefen Lastzyklus bei einer Doppeleinlagerung

### Auslagerung

Um das doppelbreite LAM ausnutzen zu können, beinhaltet ein Auslagervorgang zwei einzelne Auslagerungen<sup>11</sup>, eventuelle Umlagerungen, sowie die dafür benötigten Fahrten. Der Fall einer einzelnen Auslagerung wird nicht berücksichtigt. Sowohl der erste als auch der zweite Auslagervorgang können einfachtief (in der Zeit  $t_{Let}$ ) oder doppeltief (mit der Dauer  $t_{Ldt}$ ) erfolgen. Beim ersten Auslagervorgang wird mit der Wahrscheinlichkeit von 50% die vordere Ladeeinheit in einem einfachtiefen Lastzyklus ausgelagert. Ansonsten werden in einem doppeltiefen Lastzyklus beide Ladeeinheiten gleichzeitig auf das doppelbreite LAM geladen. Die nicht benötigte Ladeeinheit wird anschließend in ein einfach belegtes Lagerfach umgelagert ( $t_{Let}$ ). Beim zweiten Auslagervorgang besteht wiederum zu 50% die Möglichkeit, auf die vordere Ladeeinheit eines Lagerkanals zugreifen zu können. Ansonsten muss diese Ladeeinheit zuerst einfachtief ausgelagert ( $t_{Let}$ ) und über eine Umlagerfahrt zu einem einfach belegten Lagerkanal gefahren werden. Nach der dortigen einfachtiefen Einlage-

---

<sup>11</sup> Der Fall bei welchem beide Ladeeinheiten eines Lagerkanals gleichzeitig ausgelagert werden sollen und somit der Auslagervorgang in einem Lastzyklus durchgeführt wird, ist sehr unwahrscheinlich und wird deshalb nicht beachtet.

nung erfolgt die Rückkehr zum Auslagerfach und die Auslagerung der ursprünglich benötigten Ladeinheit aus dem hinteren Lagerfach ( $t_{Ldt}$ ).

Die Häufigkeit  $H_{AdbG}(t_{Let})$  der einfachtiefen und  $H_{AdbG}(t_{Ldt})$  der doppeltiefen Lastzyklen, die bei einem Auslagervorgang im Mittel anfallen, werden über die beiden folgenden Formeln ausgedrückt:

$$H_{AdbG}(t_{Let}) = 2,5 \quad (4-84)$$

$$H_{AdbG}(t_{Ldt}) = 1 \quad (4-85)$$

mit:

- $H_{AdbG}(t_{Let})$  Mittlere Häufigkeit für einen einfachtiefen Lastzyklus bei einem Auslagervorgang bestehend aus zwei Auslagerungen
- $H_{AdbG}(t_{Ldt})$  Mittlere Häufigkeit für einen doppeltiefen Lastzyklus bei einem Auslagervorgang bestehend aus zwei Auslagerungen

### Fahrten

Die Spielzeitkomponenten, welche die Fahrten zu den Lagerfächern abbilden, sind von der Lagerstrategie und dem Startpunkt abhängig. Erfolgt die Fahrt vom Übergabepunkt aus, dann wird die Einfahrtzeit  $E(t_{ü,p})$  oder bei einem verschobenem Übergabepunkt  $E(t_{ü,p})_{x=x_{ÜP}, y=y_{ÜP}}$  angewendet. Liegt der Startpunkt nach einer vorangegangenen Ein- oder Auslagerung im Regal, wie es zwischen der ersten und der zweiten Auslagerung eines doppelbreiten LAM, bzw. beim Einsatz mehrerer LAM möglich ist, erfolgt eine Querfahrt  $E(t_{p,p})$ . Bei der Einlagerstrategie *Doppeleinlagerung nahe Auslagerung* bildet  $E(t_{dEnNdbG})$  die Querfahrzeit zwischen dem Einlagerkanal und dem Auslagerfach ab. Die Fahrten zum Umlagerfach sind unabhängig von einer vorangegangenen Einlagerung, da die Umlagerung in einen einfach belegten Lagerkanal stattfindet. Die Querfahrt, welche für die Umlagerung nahe des Auslagerfachs benötigt wird, ist  $E(t_{UnNdG})$  und trägt dem Umstand Rechnung, dass für die Umlagerung nur eine Regalwand berücksichtigt werden kann.

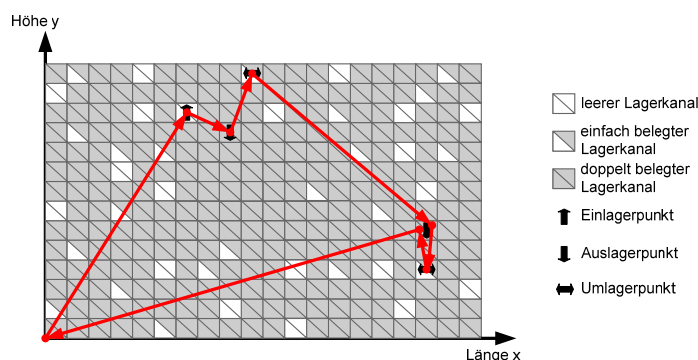
### Aufnahme und Abgabe

Die Abgabe und Aufnahme der Ladeinheiten unterscheidet sich nicht von der Vorgehensweise im einfachtiefen und doppeltiefen Lager (vgl. Abschnitt 4.5.1.1). Im

Kleinteilebereich kommen häufig doppeltiefe Übergabepunkte zur Anwendung, was sich auf die Länge der Übergabezeiten auswirkt.

### Beispiel

In Abbildung 4-22 ist ein Arbeitsspiel für das doppeltiefe Lager mit doppelbreiter Gasse skizziert. Es kommt ein doppelbreites LAM zum Einsatz, welches mit der Einlagerstrategie *Doppeleinlagerung nahe Auslagerung* und der Umlagerstrategie *Umlagerung nahe Auslagerung* betrieben wird.



**Abbildung 4-22:** Skizze für das doppeltiefe Lager mit doppelbreiter Gasse und einem LAM mit der Einlagerstrategie *Doppeleinlagerung nahe Auslagerung* und der Umlagerstrategie *Umlagerung nahe Auslagerung*

Das kombinierte Arbeitsspiel startet mit der Aufnahme und Abgabe der Ladeeinheiten am Übergabepunkt und einer Einfahrt zum Einlagerkanal. Dieser Lagerkanal wird in der Nähe des Auslagerfachs gewählt. Nach der Doppeleinlagerung erfolgt die Fahrt zum Auslagerfach und die Auslagerung. Im Falle der Auslagerung einer verdeckt stehenden Ladeeinheit werden beide Ladeeinheiten gleichzeitig ausgelagert und die nicht benötigte Ladeeinheit wird anschließend umgelagert. Dazu verfährt das RBG an einen nahe gelegenen einfach belegten Lagerkanal in der Regalwandseite der Umlagereinheit und lagert die Ladeeinheit darin ein. Anschließend erfolgt die Fahrt zum zweiten Auslagerfach und die Auslagerung. Im Falle der Auslagerung einer verdeckt stehenden Ladeeinheit wird eine Umlagerung möglichst nahe am Auslagerfach durchgeführt und nach der Rückkehr zum Auslagerfach kann dann die gewünschte Ladeeinheit ausgelagert werden. Im Anschluss erfolgt die Rückfahrt zum Übergabepunkt:

$$\begin{aligned}
 E(t_{EA, Spiel}) &= t_{L \ddot{U}P \text{ Aufn+Abg}} + t_{Tot} + \\
 &E(t_{\ddot{u}, p}) + t_{Tot} + t_{Mast} + H_{E \text{ dbG}}(t_{L \text{ dt}}) \cdot (t_{L \text{ dt}} + t_{Tot}) + \\
 &E(t_{dEnN \text{ dbG}}) + t_{Tot} + t_{Mast} + 0,5 \cdot E(t_{UnN \text{ dbG}}) + t_{Tot} + t_{Mast} + \\
 &E(t_{p, p}) + t_{Tot} + t_{Mast} + 0,5 \cdot 2 \cdot E(t_{UnN \text{ dbG}}) + t_{Tot} + t_{Mast} \\
 &+ H_{A \text{ dbG}}(t_{L \text{ et}}) \cdot (t_{L \text{ et}} + t_{Tot}) + H_{A \text{ dbG}}(t_{L \text{ dt}}) \cdot (t_{L \text{ dt}} + t_{Tot}) + \\
 &E(t_{\ddot{u}, p}) + t_{Tot} + t_{Mast}
 \end{aligned} \tag{4-86}$$

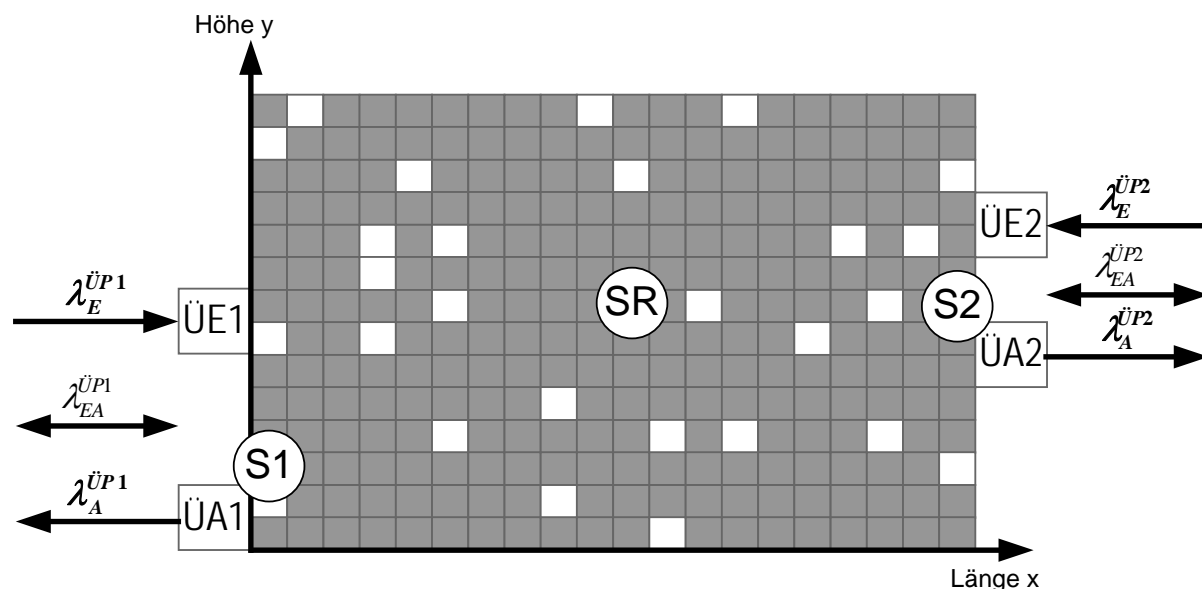
#### 4.5.2 Berechnung der Spielzeit abhängiger Arbeitsspiele

Die Leistungsfähigkeit eines Lagersystems wird zumeist auf die Belastungsspitze ausgelegt. Bei der statischen Lagerauslegung liegt es am Planer, die geforderten Ein- und Auslagerungen pro Zeiteinheit sowie deren Lastsymmetrie abzuschätzen. Die spezifische Belastungsanforderung an das Lagersystem wird in Form der Materialstrombelastungen  $\lambda_E$ ,  $\lambda_A$  und  $\lambda_{EA}$  beschrieben. Der Materialstrom  $\lambda_E$  drückt aus, wie viele Ladeeinheiten vom RBG mittels reiner Einlagerspiele eingelagert werden,  $\lambda_A$  beschreibt analog dazu die Anzahl der Auslagerladeeinheiten. Der Materialstrom  $\lambda_{EA}$  gibt an, wie viele Ladeeinheiten mittels kombinierter Arbeitsspiele ein- und ausgelagert werden.

Sehr häufig führt das RBG innerhalb des planungsrelevanten Zeitabschnitts mehr als eine Spielart durch. In diesem Fall können die Arbeitsspiele nicht mehr (wie im vorhergehenden Abschnitt) als unabhängig voneinander betrachtet werden. Der Endpunkt eines Arbeitsspiels bestimmt zugleich auch den Startpunkt des nächsten. In Abhängigkeit der Anzahl der  $\ddot{U}P$  und der Ruhepositionsstrategie gibt es mehrere End- bzw. Startpositionen für ein Arbeitsspiel. Nach Bozer und White [Boz-84] existieren vier sinnvolle Ruhepositionsstrategien (vgl. 2.3.2.2):

- *Verweilen am letzten Aktionsort*  
Nach einer Auslagerung verweilt das RBG am  $\ddot{U}A$ . Nach einem Einlagerspiel verharrt das RBG im Regal und ist daher bei einer eventuell folgenden Auslagerung näher am Auslagerfach.
- *Rückkehr zum  $\ddot{U}E$  beim Einlagerspiel - Verweilen am  $\ddot{U}A$  beim Auslagespiel und kombinierten Spiel*
- *Rückkehr zum  $\ddot{U}E$*
- *Fahrt in die Regallgasse*

Die Strategie *Verweilen am letzten Aktionsort* zielt darauf ab, keine unnötige Fahrten bei maximaler Auslastung des RBG durchzuführen und ist am besten dazu geeignet, die Grenzleistung zu bestimmen. Bei dieser Ruhepositionsstrategie und vier Übergabepunkten sind drei Startpunkte eines Arbeitsspiels möglich: Der erste Abgabepunkt ÜA1 (nach einem Auslagerspiel oder einem kombinierten Ein- und Auslagerspiel), der zweite Abgabepunkt ÜA2 (nach einem Auslagerspiel oder einem kombinierten Ein- und Auslagerspiel über den zweiten Abgabepunkt) und im Regal selbst (nach erfolgtem Einlagerspiel). Abbildung 4-23 skizziert eine Regalwand mit den Übergabepunkten ÜP1 und ÜP2 (die jeweils aus zwei getrennten Aufnahme und Abgabepunkten bestehen), die ein- und ausgehenden Materialströme sowie die daraus resultierenden Startpunkte eines Arbeitsspiels:



**Abbildung 4-23:** Skizze der Materialströme und Startpunkte für eine Regalwand mit vier Übergabepunkten

Um die einzelnen Materialströme abarbeiten zu können, muss das RBG die entsprechenden Arbeitsspiele durchführen. Für jeden Materialstrom können die drei Startpunkte zur Anwendung kommen, so dass in Summe für jede der drei Spielarten sechs verschiedene zusammengesetzte Arbeitsspiele gefahren werden können. Für die Auslegung des automatischen Lagersystems sind i.d.R. die mittleren Zeiten für das reine Einlagerspiel, das reine Auslagerspiel und das kombinierte Ein- und Auslagerspiel relevant. Zur einfacheren Kalkulation der 18 verschiedenen Arbeitsspiele werden zwei Spielanteile unterschieden:

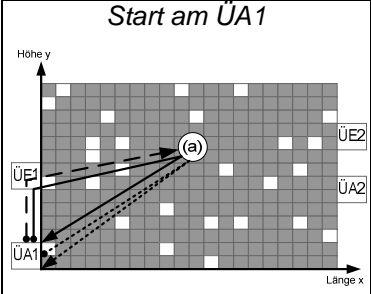
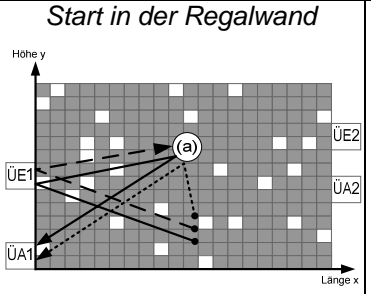
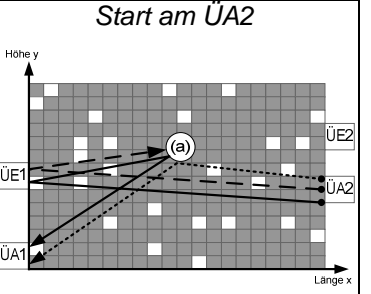
- Spielanteil (a) beschreibt im Wesentlichen die Vorgänge bei den Ein- und Auslagerungen. Dazu gehören die Bewegungen des RBG und die eigentlichen Ein- und Aus- sowie eventuelle Umlagerungen. Die Zusammensetzung ist dabei von der Lagerkonfiguration und Lagerstrategie sowie von der vom RBG gefahrenen Spielart (Einlagerspiel, Auslagerspiel oder kombiniertes Ein- und Auslagerspiel) abhängig. Der Spielanteil ist unabhängig vom vorangegangenen Arbeitsspiel des RBG.
- Spielanteil (b) beschreibt die Vorgänge bei der Aufnahme und Abgabe der Ladeeinheiten am Übergabepunkt. Die dafür notwendigen Bewegungen sind von der Spielart, der Lage der Übergabepunkte und der Intensität der darüber führenden Materialströme abhängig. Dieser Spielanteil umfasst die Ausfahrt aus der Regalgasse vom (Auslager-) Fach, die Wechselfahrten zwischen den Übergabepunkten, die eigentliche Aufnahme und Abgabe sowie die Einfahrt in die Regalgasse zum ersten (Einlager-) Fach.

Die verschiedenen Arbeitsspiele setzen sich aus den beiden Spielanteilen (a) und (b) zusammen. Im ersten Schritt wird der Spielanteil (a) berechnet.

Dieser beginnt beim ersten Ein- oder Auslagerfach im Regal und bildet das gesamte Arbeitsspiel bis zur letzten Ein- oder Auslagerung ab. Der Spielanteil ist unabhängig vom Startpunkt und kann nach dem Verfahren, welches im vorhergehenden Abschnitt beschrieben ist, berechnet werden. Im Fall eines einfachtiefen Lagers mit einem LAM und der Einlagerstrategie *zufällige Einlagerung* besteht das kombinierte Ein- und Auslagerspiel (in diesem Fall ein Doppelspiel) aus einer LAM-Zykluszeit für die Einlagerung, einer Querfahrt (beliebiges Fach im Regal zu einem anderen beliebigen Fach im Regal) und einer abschließenden Lastzykluszeit für die Auslagerung. Der Spielanteil (a) für ein reines Ein- oder Auslagerspiel besteht in diesem Beispiel lediglich aus den Lastaufnahmezcykluszeiten für die einzelne Ein-bzw. Auslagerung.

Zur Komplettierung eines Arbeitsspiels muss im zweiten Schritt der Spielanteil (b) berechnet werden. Dieser Spielanteil beinhaltet die Auf- und Abgabe am Übergabepunkt und die Ein- und Ausfahrt aus der Regalgasse. Zur Berechnung des Spielanteils (b) werden die Spielzeitkomponenten für die Aufnahme, die Einfahrt zum Einlagerpunkt und dann (nach den Arbeitsspielschritten welche der Spielanteil (a) abdeckt) die Ausfahrt und Abgabe summiert und mit der entsprechenden Auf-

trittswahrscheinlichkeit gewichtet. Abbildung 4-24 zeigt die Spielanteile (b) die durch die Materialströme über ÜP1 entstehen. Das Einlagerspiel, Auslagerspiel und kombinierte Ein- und Auslagerspiel können von drei unterschiedlichen Startpunkten aus starten.

	Start am ÜA1	Start in der Regalwand	Start am ÜA2
Einlagerspiel $\lambda_E^{\ddot{U}P1}$			
Auslagerspiel $\lambda_A^{\ddot{U}P1}$	Wechselfahrt ÜA1→ÜE1 Aufnahme LE Einfahrt von ÜE1 [Spielanteil (a)]	Ausfahrt zu ÜE1 Aufnahme LE Einfahrt von ÜE1 [Spielanteil (a)]	Wechselfahrt ÜA2→ÜE1 Aufnahme LE Einfahrt von UE1 [Spielanteil (a)]
kombiniertes E. u. A.spiel $\lambda_K^{\ddot{U}P1}$	Einfahrt von ÜA1 [Spielanteil (a)] Ausfahrt zu ÜA1 Abgabe LE	Wechselfahrt ÜA1→ÜE1 Aufnahmen LE Einfahrt von UE1 [Spielanteil (a)] Ausfahrt zu ÜA1 Abgabe LE	Querfahrt [Spielanteil (a)] Ausfahrt zu ÜA1 Abgabe LE
	Wechselfahrt ÜA1→ÜE1 Aufnahmen LE Einfahrt von UE1 [Spielanteil (a)] Ausfahrt zu ÜA1 Abgabe LE	Wechselfahrt ÜA2→ÜE1 Aufnahmen LE Einfahrt von UE1 [Spielanteil (a)] Ausfahrt zu ÜA1 Abgabe LE	Ausfahrt zu ÜE1 Aufnahmen LE Einfahrt von ÜE1 [Spielanteil (a)] Ausfahrt zu ÜA1 Abgabe LE

**Abbildung 4-24:** Spielanteile (b) für das Einlagerspiel, das Auslagerspiel und das kombinierte Spiel bei unterschiedlichen Startpunkten; (a)=Übergang zum Spielanteil (a)

Beim Einlagerspiel muss zuerst eine Ladeeinheit vom ÜE1 abgeholt werden. Entsprechend dem Startpunkt wird dazu eine Wechselfahrt vom ÜA1 ( $t_{W \ddot{U}A1 \rightarrow \ddot{U}E1}$ ) oder ÜA2 ( $t_{W \ddot{U}A2 \rightarrow \ddot{U}E1}$ ) notwendig. Entspricht ÜA1 dem ÜE1, so entfällt die Wechselfahrt. Ist der Startpunkt im Regal, wird eine Ausfahrt  $E(t_{\ddot{u},p})$  bzw.  $E(t_{\ddot{u},p})_{x=x_{\ddot{U}P}, y=y_{\ddot{U}P}}$  durchgeführt.

Nach der Aufnahme der Ladeeinheit  $t_{L \ddot{U}P \text{ Aufn}}$  (oder bei Mehrfachlastaufnahmemittel



mehrerer Ladeeinheiten) erfolgt die Einfahrt in die Regalgasse mit  $E(t_{ü,p})$ . Damit ist der Spielanteil abgeschlossen. Zur Komplettierung des Arbeitsspiels muss noch der Spielzeitanteil (a) ausgeführt werden, welcher die Einlagerungen und Querfahrten beinhaltet.

Das Auslagerspiel beinhaltet von jedem Startpunkt aus die Fahrt zum ersten Auslagerkanal. Von ÜA1 und ÜA2 aus wird dazu eine Einfahrt  $E(t_{ü,p})$  ausgeführt, im Regal ist dazu eine Querfahrt  $E(t_{p,p})$  notwendig. Dann wird der Spielanteil (a) ausgeführt und im Anschluss daran erfolgt die Ausfahrt  $E(t_{ü,p})$  und die Abgabe der Ladeeinheiten  $t_{L\ddot{U}P\ Abg}$ .

Beim kombinierten Ein- und Auslagerspiel erfolgt in einem ersten Schritt die Fahrt zum ÜE1 (durch die Wechselfahrten  $t_{W\ \ddot{U}A1\rightarrow\ddot{U}E1}$  oder  $t_{W\ \ddot{U}A2\rightarrow\ddot{U}E1}$  oder die Ausfahrt  $E(t_{ü,p})$ ). Dort erfolgt die Aufnahme  $t_{L\ddot{U}P\ Aufn}$  der Ladeeinheiten. Wurde beim vorangehenden Arbeitsspiel eine Auslagerung durchgeführt und ÜE1 und ÜA1 liegen sich direkt gegenüber, kann die parallele Abgabe und Aufnahme erfolgen. In diesem Fall ist nur noch die Zeitdifferenz einer eventuell längeren Lastzykluszeit  $t_{L\ddot{U}P\ Aufn+Abg}$  gegenüber  $t_{L\ddot{U}P\ Abg}$  zu addieren. Nach der Aufnahme der Ladeeinheit erfolgt die Einfahrt  $E(t_{ü,p})$  und der Spielanteil (a). Es folgt die Ausfahrt  $E(t_{ü,p})$  und die Abgabe der Ladeeinheit  $t_{L\ddot{U}P\ Abg}$ .

Die Spielanteile (b) die durch die Materialströme über ÜP2 entstehen, werden analog dazu berechnet.

Mittels der Addition der entsprechenden Spielanteile (a) und (b) können die 18 verschiedenen Arbeitsspiele zusammengesetzt und berechnet werden. Um jedoch die mittlere Spielzeit der drei Spielarten zu berechnen, wird zunächst die mittlere Dauer des Spielanteil (b) für die unterschiedlichen Spielarten benötigt. Die Gewichtung erfolgt auf Basis der Intensität der über die Übergabepunkte führenden Materialströme. Unter der Annahme der Gleichverteilung der Ein- und Auslageraufträge in der Belastungsspitze, werden aus der Intensität der Materialströme die Wahrscheinlichkeiten hergeleitet, die beschreiben wie häufig ein Arbeitsspiel an einem bestimmten Punkt endet bzw. startet:

$$P_{SP}^{\ddot{U}A1} = \frac{\lambda_A^{\ddot{U}P1} + \frac{\lambda_{EA}^{\ddot{U}P1}}{2}}{\lambda_E^{\ddot{U}P1} + \lambda_A^{\ddot{U}P1} + \frac{\lambda_{EA}^{\ddot{U}P1}}{2} + \lambda_E^{\ddot{U}P2} + \lambda_A^{\ddot{U}P2} + \frac{\lambda_{EA}^{\ddot{U}P2}}{2}} \quad (4-87)$$

$$P_{SP}^{\ddot{U}A2} = \frac{\lambda_A^{\ddot{U}P2} + \frac{\lambda_{EA}^{\ddot{U}P2}}{2}}{\lambda_E^{\ddot{U}P1} + \lambda_A^{\ddot{U}P1} + \frac{\lambda_{EA}^{\ddot{U}P1}}{2} + \lambda_E^{\ddot{U}P2} + \lambda_A^{\ddot{U}P2} + \frac{\lambda_{EA}^{\ddot{U}P2}}{2}} \quad (4-88)$$

$$P_{SP}^R = \frac{\lambda_E^{\ddot{U}P1} + \lambda_E^{\ddot{U}P2}}{\lambda_E^{\ddot{U}P1} + \lambda_A^{\ddot{U}P1} + \frac{\lambda_{EA}^{\ddot{U}P1}}{2} + \lambda_E^{\ddot{U}P2} + \lambda_A^{\ddot{U}P2} + \frac{\lambda_{EA}^{\ddot{U}P2}}{2}} \quad (4-89)$$

mit:

- $P_{SP}^{\ddot{U}A1}$  Wahrscheinlichkeit des Startpunkts  $\ddot{U}A1$
- $P_{SP}^{\ddot{U}A2}$  Wahrscheinlichkeit der Startpunkts  $\ddot{U}A2$
- $P_{SP}^R$  Wahrscheinlichkeit der Startpunkts im Regal
- $\lambda_E^{\ddot{U}Px}$  Anzahl Einlagereinheiten pro Zeiteinheit, die einzeln am Übergabepunkt x anfallen
- $\lambda_A^{\ddot{U}Px}$  Anzahl Auslagereinheiten pro Zeiteinheit, die einzeln am Übergabepunkt x anfallen
- $\lambda_{EA}^{\ddot{U}Px}$  Anzahl Ein- und Auslagereinheiten pro Zeiteinheit, die parallel am Übergabepunkt x anfallen

In einem zweiten Schritt werden die unterschiedlichen Spielanteile (b) mit den Startpunktwahrscheinlichkeiten gewichtet:

$$E(t_{E \text{ Spielanteil (b)}}) = t_{E \text{ Spielanteil (b)}}^{S:\ddot{U}A1 \rightarrow MS:\lambda_E^{\ddot{U}P1}} \cdot P_{SP}^{\ddot{U}A1} + t_{E \text{ Spielanteil (b)}}^{S:R \rightarrow MS:\lambda_E^{\ddot{U}P1}} \cdot P_{SP}^R + t_{E \text{ Spielanteil (b)}}^{S:\ddot{U}A2 \rightarrow MS:\lambda_E^{\ddot{U}P1}} \cdot P_{SP}^{\ddot{U}A2} + t_{E \text{ Spielanteil (b)}}^{S:\ddot{U}A1 \rightarrow MS:\lambda_E^{\ddot{U}P2}} \cdot P_{SP}^{\ddot{U}A1} + t_{E \text{ Spielanteil (b)}}^{S:R \rightarrow MS:\lambda_E^{\ddot{U}P2}} \cdot P_{SP}^R + t_{E \text{ Spielanteil (b)}}^{S:\ddot{U}A2 \rightarrow MS:\lambda_E^{\ddot{U}P2}} \cdot P_{SP}^{\ddot{U}A2} \quad (4-90)$$

$$E(t_{A \text{ Spielanteil (b)}}) = t_{A \text{ Spielanteil (b)}}^{S:\ddot{U}A1 \rightarrow MS:\lambda_A^{\ddot{U}P1}} \cdot P_{SP}^{\ddot{U}A1} + t_{A \text{ Spielanteil (b)}}^{S:R \rightarrow MS:\lambda_A^{\ddot{U}P1}} \cdot P_{SP}^R + t_{A \text{ Spielanteil (b)}}^{S:\ddot{U}A2 \rightarrow MS:\lambda_A^{\ddot{U}P1}} \cdot P_{SP}^{\ddot{U}A2} + t_{A \text{ Spielanteil (b)}}^{S:\ddot{U}A1 \rightarrow MS:\lambda_A^{\ddot{U}P2}} \cdot P_{SP}^{\ddot{U}A1} + t_{A \text{ Spielanteil (b)}}^{S:R \rightarrow MS:\lambda_A^{\ddot{U}P2}} \cdot P_{SP}^R + t_{A \text{ Spielanteil (b)}}^{S:\ddot{U}A2 \rightarrow MS:\lambda_A^{\ddot{U}P2}} \cdot P_{SP}^{\ddot{U}A2} \quad (4-91)$$

$$E(t_{EA \text{ Spielanteil (b)}}) = t_{EA \text{ Spielanteil (b)}}^{S:\ddot{U}A1 \rightarrow MS:\lambda_{EA}^{\ddot{U}P1}} \cdot P_{SP}^{\ddot{U}A1} + t_{EA \text{ Spielanteil (b)}}^{S:R \rightarrow MS:\lambda_{EA}^{\ddot{U}P1}} \cdot P_{SP}^R + t_{EA \text{ Spielanteil (b)}}^{S:\ddot{U}A2 \rightarrow MS:\lambda_{EA}^{\ddot{U}P1}} \cdot P_{SP}^{\ddot{U}A2} + t_{EA \text{ Spielanteil (b)}}^{S:\ddot{U}A1 \rightarrow MS:\lambda_{EA}^{\ddot{U}P2}} \cdot P_{SP}^{\ddot{U}A1} + t_{EA \text{ Spielanteil (b)}}^{S:R \rightarrow MS:\lambda_{EA}^{\ddot{U}P2}} \cdot P_{SP}^R + t_{EA \text{ Spielanteil (b)}}^{S:\ddot{U}A2 \rightarrow MS:\lambda_{EA}^{\ddot{U}P2}} \cdot P_{SP}^{\ddot{U}A2} \quad (4-92)$$

mit:

- $P_{SP}^X$  Startpunktwahrscheinlichkeit des Übergabepunkt X
- $t_{Y \text{ Spielanteil (b)}}^{S:Z \rightarrow MS:Y}$  Spielanteil (b) des Materialstroms Y mit dem Startpunkt Z
- $E(t_{E \text{ Spielanteil (b)}})$  Mittlerer Spielanteil (b) beim reinen Einlagerspiel
- $E(t_{A \text{ Spielanteil (b)}})$  Mittlerer Spielanteil (b) beim reinen Auslagerspiel
- $E(t_{EA \text{ Spielanteil (b)}})$  Mittlerer Spielanteil (b) beim kombinierten Ein- und Auslagerspiel

Um die mittlere Spieldauer für das Einlagerspiel, das Auslagerspiel und das kombinierte Ein- und Auslagerspiel zu berechnen, werden in einem letzten Schritt die Spielanteile (a) und die mittleren Spielanteile (b) addiert:

$$E(t_{E \text{ Spiel}}) = E(t_{E \text{ Spielanteil(a)}}) + E(t_{E \text{ Spielanteil(b)}}) \quad (4-93)$$

$$E(t_{A \text{ Spiel}}) = E(t_{A \text{ Spielanteil(a)}}) + E(t_{A \text{ Spielanteil(b)}}) \quad (4-94)$$

$$E(t_{EA \text{ Spiel}}) = E(t_{EA \text{ Spielanteil(a)}}) + E(t_{EA \text{ Spielanteil(b)}}) \quad (4-95)$$

mit:

- $E(t_{E \text{ Spiel}})$  Mittleres Einlagerspiel
- $E(t_{A \text{ Spiel}})$  Mittlerer Auslagerspiel
- $E(t_{EA \text{ Spiel}})$  Mittleres kombiniertes Ein- und Auslagerspiel

## 4.6 Berechnung der Umschlagsleistung eines Lagers

### 4.6.1 Umschlagsleistung eines Lagers bei unabhängigen Lagergassen

Unter der Annahme von unabhängigen Lagergassen kann die Umschlagsleistung des gesamten Lagers durch die Skalierung der Leistung einer einzelnen Gasse ermittelt werden. Die Maximalleistung in Ladeeinheiten pro Stunde wird für reine Auslagerspiele, reine Einlagerspiele oder kombinierte Ein- und Auslagerspiele berechnet:

$$\lambda_{E \text{ Max}} = \frac{3600}{E(t_{E \text{ Spiel}})} \cdot n_{LE} \cdot n_z; \quad \lambda_{A \text{ Max}} = \frac{3600}{E(t_{A \text{ Spiel}})} \cdot n_{LE} \cdot n_z; \quad (4-96)$$

$$\lambda_{EA \text{ Max}} = \frac{3600}{E(t_{EA \text{ Spiel}})} \cdot 2n_{LE} \cdot n_z$$

mit:

- $\lambda_{E \text{ Max}}$  Maximalleistung Einlagerungen pro Stunde
- $\lambda_{A \text{ Max}}$  Maximalleistung Auslagerungen pro Stunde
- $\lambda_{EA \text{ Max}}$  Maximalleistung kombinierter Ein- und Auslagerungen pro Stunde
- $n_{LE}$  Anzahl der Ladeeinheiten die auf den LAM eines RBG gleichzeitig transportiert werden (=Anzahl LAM · Breite der LAM)
- $n_z$  Anzahl der Lagergassen

Bei abhängigen Arbeitsspielen ist es nicht sinnvoll die Maximalleistung eines einzelnen Spieltyps zu berechnen. Kommen noch andere Spieltypen in dem betrachteten Zeitraum zum Einsatz, bewirkt eine Veränderung der Lagerbelastung auch eine veränderte Startwahrscheinlichkeit der Arbeitsspiele von den unterschiedlichen Startpunkten. Damit ändert sich auch die Länge der mittleren Arbeitsspiele. Für die Auslegung von Lagersystemen und den Vergleich unterschiedlicher Lagerkonfigurationen ist es deshalb zielführend, die Auslastung des Systems bei der vorherrschenden Lagerbelastung zu berechnen. Dazu wird die benötigte Gesamtzeit  $T_{benötigt}$  zur Abarbeitung aller vom System geforderten Arbeitsspiele berechnet:

$$T_{benötigt} = \frac{\frac{\lambda_E \cdot E(t_{EA \text{ Spiel}})}{n_{LE}} \cdot \frac{\lambda_A \cdot E(t_{A \text{ Spiel}})}{n_{LE}} \cdot \frac{\lambda_{EA}}{2 \cdot n_{LE}} \cdot E(t_{EA \text{ Spiel}})}{n_z} \quad (4-97)$$

mit:

$T_{benötigt}$  Benötigte Gesamtzeit zum Abarbeiten aller Lageraufträge

Das Verhältnis von  $T_{benötigt}$  zur Länge des betrachteten Zeitraums ergibt den Auslastungsgrad  $\rho$ . Dieser muss bei der Planung kleiner gleich 1 sein, damit das Lager die geforderte Leistung erbringen kann.

$$\rho = \frac{T_{benötigt}}{T_{verfügbar}} \quad (4-98)$$

Die Differenz  $1 - \rho$  kann als Leistungsreserve betrachtet werden.

### 4.6.2 Umschlagsleistung eines Lagers bei abhängigen Lagergassen

Durch die Verkettung in der Lagervorzone entsteht eine Abhängigkeit zwischen den Gassen. Wird beispielsweise eine sequenzierte Auslagerung über das gesamte Lager angestrebt, entstehen Wartezeiten durch blockierte RBG. Lee [Lee-97a] und Hur [Hur-04] entwickeln dafür dynamische Warteschlangenmodelle, die bei der Berechnung einfacher Lagerarten angewendet werden können. Die analytische Berechnung ist aber komplex und rechenintensiv. Die hier vorgestellte statische Leistungsberechnung

nung basiert auf einer eigens entwickelten Ablaufsimulation [Fml-10b]. Damit werden Kennzahlen ermittelt, mit denen der simulativ ermittelte Leistungsverlust bei unterschiedlicher Gassenanzahl approximiert werden kann. Diese Leistungsverlustkennzahlen  $I$  repräsentieren den Zeitanteil, in welchem eine Lagergasse bei maximaler Auslastung ohne Beeinträchtigung arbeiten kann. In der restlichen Zeit ist die Gasse durch sequenzstrategiebedingte Stauungen auf der Fördertechnik blockiert. Neben dem Fall ohne Sequenzierung werden die Leistungsverlustkennzahlen für die auftragsbezogene und positionsbezogene Sequenzierungsstrategie ermittelt. Das Simulationsmodell setzt eine Artikelgleichverteilung über die Lagergassen und strenges FIFO bei der Gassenauswahl der Ein- und Auflageraufträge voraus. Wird keine Sequenzstrategie benutzt, zeigt die Simulation nahezu keinen Leistungsverlust (Leistungsverlustkennzahl  $I_{keine\ Sequenz} = 99,2\%$ ). Der geringe Verlust entsteht durch temporäre Stauungen auf den Förderstrecken der Lagervorzone. Bei der auftragsbezogenen Sequenzierungsstrategie ( $I_{auftragsbezogen} = 97,5\%$ ) ist der Verlust wesentlich größer, wirkt sich aber auch erst bei mehr als vier Gassen deutlich aus. Wird die sehr strikte positionsbezogene Strategie gefahren, entsteht der größte Leistungsverlust ( $I_{positionsbezogen} = 96,3\%$ ). Diese ermittelten Kennzahlen sind exemplarisch und dienen als Anhaltswert. Der Einfluss der Anzahl der Pufferplätze, der Auftrags- und Positionsgröße der Lageraufträge sowie das Verhältnis der mittleren Arbeitsspieldauer zur Fördergeschwindigkeit der Förderelemente der Lagervorzone haben großen Einfluss und können für die Kennwerte eines spezifischen Lagersystems Abweichungen von den hier vorgestellten Werten bedingen.

Mit einer größeren Gassenzahl steigt der Aufwand für die Sequenzierung und damit die Blockierzeiten und der Leistungsverlust des Lagersystems. Die Kennzahl  $I_{ges}$  steht für den Leistungsverlust, der im gesamten Lagersystem zu erwarten ist. Sie entspricht der Leistungsverlustkennzahl potenziert mit der Anzahl an Lagergassen:

$$I_{ges} = (I_x)^{n_x} \quad (4-99)$$

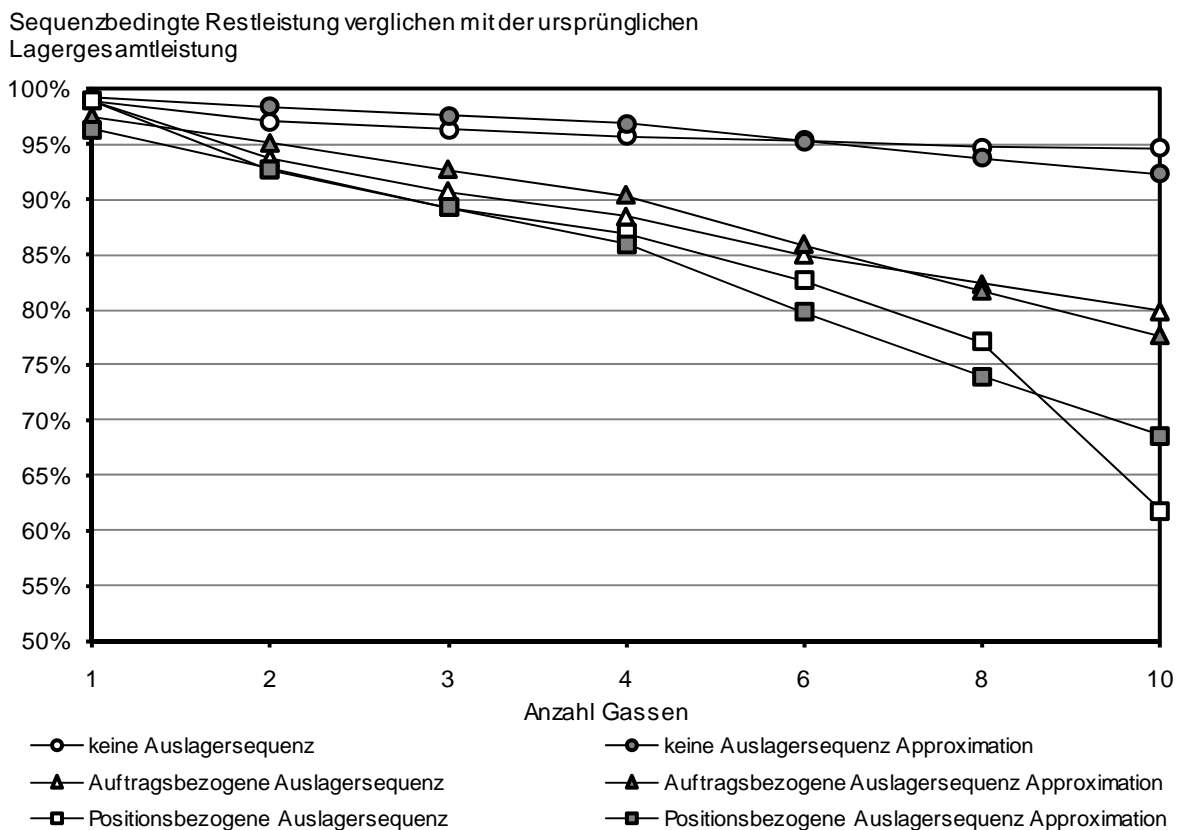
mit:

- $I_{ges}$       Leistungsverlustkennzahl des gesamten Lagers
- $I_x$         Leistungsverlustkennzahl in Abhängigkeit der Sequenzstrategie
- $n_x$         Anzahl der Lagergassen

Aus Formel (4-100) ergibt sich ein mit der Anzahl der Lagergassen steigender Leistungsverlust durch die Sequenzierung. In Abbildung 4-25 ist die Entwicklung des

## Berechnung der Umschlagsleistung

Leistungsverlusts des gesamten Lagers bei veränderter Gassenanzahl dargestellt. Die analytisch approximierten Werte werden mit den simulativ ermittelten Werten verglichen. Die vorgestellte Berechnungsmethodik ist bis zu einer Gassenanzahl von ca. zehn Gassen aussagekräftig. Bei einer höheren Gassenanzahl werden die Unwägbarkeiten zu groß und eine zuverlässige Aussage sollte mittels einer angepassten Ablaufsimulation getroffen werden.



**Abbildung 4-25:** Vergleich des simulativ ermittelten Leistungsverlusts mit den analytisch approximierten Werten

Die Leistungskennzahl  $I_{ges}$  fließt als Verlustleistung in die Berechnung der Auslastung mit ein. Sie verlängert die benötigte Gesamtzeit zum Abarbeiten aller Lageraufträge:

$$T_{benötigt}^{inkl. Verlust} = T_{benötigt} \cdot \frac{1}{I_{ges}} \quad (4-100)$$

mit:

$T_{\text{benötig}}^{\text{inkl. Verlust}}$ 

Benötigte Gesamtzeit zum Abarbeiten aller Lageraufträge inklusive des Leistungsverlusts durch Sequenzierungsstrategien in der Lagervorzone

Die Verlängerte Abarbeitungszeit beeinflusst die Auslastung des Lagersystems. Der neu ermittelte Zeitwert für zum Abarbeiten aller Lageraufträge wird dazu in Formel (4-98) eingesetzt.

## 4.7 Ergebnis

Zur Berechnung der Umschlagsleistung werden bestehende Modelle zusammengefügt, vereinheitlicht und erweitert. Das Ergebnis ist ein verschachteltes Gesamtmodell zur Leistungsberechnung unterschiedlicher automatischer Lagersysteme. Die Basis bildet die Berechnung von Spielzeitkomponenten, welche elementare Bausteine eines Arbeitsspiels sind. Diese Komponenten können mittels stochastischer und deterministischer Modelle berechnet werden und anschließend zu Arbeitsspielen zusammengesetzt werden. Die Leistung des Gesamtlagers ergibt sich aus jener mehrerer Gassen. Mit der Berechnungsmethodik werden einfach- und doppeltiefe Lager mit ein bis drei LAM, die einfach- oder doppelbreit ausgeführt sind, abgedeckt. Es können mehrere Übergabepunkte sowie eine Verschiebung derer mit einbezogen werden. Das Modell berücksichtigt unterschiedliche Ein-, Um- und Auslagerstrategien. Eine Fahrwegoptimierung kann, ebenso wie diverse Ruhepositionsstrategien und eine Sequenzierung der ausgelagerten Ladeeinheiten, eingerechnet werden.





## 5 Berechnung der Kosten

Die Thematik der wirtschaftlichen Auslegung automatischer Lagersysteme war in der Vergangenheit, im Vergleich zur Durchsatzberechnung, weit weniger Gegenstand wissenschaftlicher Betrachtungen. Ansätze dazu stellen Gudehus [Gud-73a, Gud-73b] und Fröhlich [Frö-80] vor. Bei der entwickelten Planungsvorgehensweise ist eine gute Kostenschätzung die Voraussetzung für aussagekräftige Ergebnisse. Können die Kosten nicht hinreichend genau geschätzt werden, erfolgt eine ungenaue Dimensionierung. Fließen Parameter falsch ein, kann die Optimierung in eine ungünstige Richtung verlaufen und den Vergleich von Planungsalternativen verzerren.

Nach der VDI-Richtlinie 2693 Blatt 1 [VDI2693-1] können verschiedene Verfahren bei der Investitionsrechnung zur Anwendung kommen. Diese unterteilen sich in statische und dynamische Methoden. Dynamische Methoden haben den Vorteil, durch die Beachtung von Zinseszinsen die Kosten über einen längeren Zeitraum genauer bestimmen zu können. Statische Berechnungsmethoden sind hingegen einfacher und erfordern mitunter weniger Annahmen. Sie sind für kurzfristige Betrachtungen oder Überschlagsberechnungen geeignet.

Die neu entwickelte Planungsvorgehensweise erfordert einen quantitativen Vergleich unterschiedlicher Planungsvarianten. Diese erbringen nach ihrer Dimensionierung, trotz ihrer unterschiedlichen Ausführung, einen vergleichbaren Nutzen bezüglich der nutzbaren Stellplatzanzahl und der möglichen Umschlagsleistung. Entscheidend sind demnach nur die Kostenunterschiede zwischen den Varianten. Um die Entscheidungsgrundlage einfach zu halten, basiert die Planungsvorgehensweise auf einer statischen Kostenvergleichsrechnung, welche die fixen Kosten sowie die variablen Kosten des Lagersystems abdeckt. Die Methode ermöglicht einen robusten Vergleich unterschiedlicher Varianten, ohne dazu zusätzliche Eingabedaten vom Planer zu benötigen. Für weitergehende Kostenbetrachtungen sind genaue Kenntnisse des alten oder alternativen Lagerprozesses und der Auswirkungen des neuen Lagersystems auf die Unternehmensprozesse notwendig. Die Betrachtung dieser sehr projektspezifischen Faktoren ist für die automatische Auslegung nicht mehr geeignet.

Bei der Kenntnis dieser Informationen ist es dem Planer möglich, nachträglich den durch das neue Lagersystem erzielbaren Gewinn (bzw. Einsparungen zur Ist-Situation) zu berechnen. Darauf aufbauend kann über die statische oder dynamische

Amortisationsrechnung der Zeitraum errechnet werden, innerhalb welchem die Investition sich selbst finanziert und somit die Wirtschaftlichkeit des gesamten Vorhabens sicher gestellt wird.

### **5.1 Prinzip der Kostenschätzung**

Es existieren zwei bekannte Betrachtungsweisen, welche das Prinzip der Kostenberechnung beschreiben [Fri-10]. Das Top-Down Verfahren (auch Deduktions-Prinzip) ist eine analytische Methode, bei welcher die Kostenschätzung über spezifische Investitionskosten, Degressionskoeffizienten und aus abgewickelten Projekten abgeleiteten Kostenschlüsseln erfolgt. Die Betrachtung wird vom Groben ins Feine vollzogen. Von der Gesamtinvestition wird auf die Kosten der einzelnen Lagerkomponenten geschlossen. Die Methode eignet sich sehr gut, um einen Überblick über die Kostenstruktur zu erlangen, vernachlässigt jedoch Details und ist für einen Variantenvergleich zu ungenau.

Eine differenziertere Kostenschätzung ist über das Bottom-Up-Verfahren (Induktions-Prinzip) möglich. Das Verfahren ist eine synthetische Methode, welche die Schätzung der Gesamtinvestition über die Summe aller Einzelteile und die Summe aller Module ermöglicht. Die Basis des Verfahrens ist eine Datensammlung zu den Lagerkomponenten, welche zusammen mit Projektpartnern aus der Industrie erarbeitet und strukturiert wird. Sie enthält neben den technischen Angaben zur Geometrie der Komponenten alle relevanten Größen für die Leistungsberechnung sowie die zugehörigen Kostensätze. Der Nachteil dieses Verfahrens ist der höhere Aufwand der Datensammlung und einer kontinuierlichen Aktualisierung. Bei einer ausreichend großen Datenbasis kann mit dieser Methode eine genaue, sehr transparente und nachvollziehbare Kostenschätzung durchgeführt werden. Die Methode kann durchgängig für das gesamte Lagersystem angewendet werden.

Entsprechend der Abgrenzung in Kapitel 3 Berechnung der Lagergeometrie, wird auch für die Kostenschätzung die Systemgrenze zwischen dem Regalbereich und der Lagervorzone gezogen. Gegenstand der Betrachtung sind demnach das Lagersystem an sich, das umgebende Gebäude, die Fördertechnik, welche die Lagergassen an die Lagervorzone anschließt, und die IT-Technik, welche zum Betrieb des Lagersystems notwendig ist. Die Lagerkomponenten werden in die Kategorien Gebäude, Lagertechnik und Informationstechnik untergliedert.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Lagerkomponenten mit ihren Kostentreibern beschrieben. Es werden keine Kostensätze veröffentlicht, weil diese teilweise sensible Daten der an dem Projekt beteiligten Firmen darstellen.

## **5.2 Grundstück**

Der Grundstückspreis wird nicht über vorgegebene Datensätze berechnet. Enorme Unterschiede des Preisniveaus in den unterschiedlichen Bundesländern machen eine sinnvolle Abschätzung unmöglich. Der Grundstückspreis fließt deshalb als Planungsvorgabe in die Kostenberechnung mit ein.

## **5.3 Gebäude**

Das Lagergebäude umschließt das Lagersystem und schützt es vor Umwelteinflüssen. Der Investitionsaufwand für das Lagergebäude setzt sich aus Preisen für das Grundstück, die Bodenplatte, die Wände und das Dach zusammen.

### **5.3.1 Bodenplatte**

Die Bodenplatte trägt das gesamte Lagergebäude mit Inhalt. Die Platte muss fest genug sein, um die hohen Lasten, die auf sie einwirken, tragen zu können. Die Ausführung und der finanzielle Aufwand werden im Wesentlichen von der geforderten Traglast bestimmt. Für unterschiedliche Traglasten werden dazu Kostensätze pro Quadratmeter Boden aufgenommen. Der Investitionsaufwand liegt hierfür zwischen 120 und 300 Euro.

### **5.3.2 Wände**

Das Lagergebäude kann in zwei verschiedenen Bauformen ausgeführt werden. Beim HRL bis zu 18 m Höhe und beim Kleinteilelager wird die Hallenbauweise angewendet. Dabei wird das Lagergebäude in konventioneller Bauweise ausgeführt und das Regalsystem unabhängig davon im Innenvolumen der Halle aufgestellt. Bei Lagern, die höher als 18 m sind, ist ein Silobau kostengünstiger. Die Wandverkleidung und das Dach sind dabei direkt am Regalsystem angebracht, welches die gesamte Last aufnehmen muss.

Kostentreiber für die Außenwände sind die jeweils verbauten Flächen und die thermische Auslegung des Lagers, welche die nötige Isolierung und Dämmung bestimmt. Größere Bauhöhen erfordern mitunter stabilere und damit teurere Wände. Die Schätzung über einen Richtpreis pro Quadratmeter Außenfläche hat sich in der Praxis bewährt.

Im Falle der Hallenbauweise sind die Kosten für einen Quadratmeter Seitenwand etwa drei bis vier Mal so hoch wie bei der Silobauweise. Bei der Silobauweise übernehmen die Seitenwände keine tragende Funktion. Somit reicht es aus, einfache Blechpaneele am Regalsystem zu montieren. Der Quadratmeterpreis reicht von 75 Euro bei der Silobauweise bis zu 300 Euro bei der Hallenbauweise. Je nach Klimabereich innerhalb des Lagers sind unterschiedliche Preiskategorien zu unterscheiden.

### **5.3.3 Dach**

Zusammen mit den Seitenwänden schützt das Dach das Innere des Lagers vor Umwelteinflüssen. Die Kostensätze für das Dach sind vom Temperaturbereich und der Bauweise des Lagers abhängig.

Der Quadratmeterpreis für das Dach beträgt bei der Silobauweise ca. 70 Euro und bei der Hallenbauweise an die 110 Euro.

## **5.4 Lagertechnik**

Die Kosten der Lagertechnik setzen sich aus den Kosten für Regale, Regalbediengeräte, Brandschutz, Übergabepunkte und sonstige Fördertechnik zusammen.

### **5.4.1 Regalsystem**

Für die Kostenschätzung des Regals wird ein Verfahren aus der Industrie übernommen. Dort werden die Regalkosten häufig über einen Kostensatz pro Stellplatz geschätzt. Dieser ist von der Stellplatzlast, der Größe der Ladeeinheiten und der realisierten Regalhöhe abhängig. Kostenvorteile ergeben sich bei doppeltiefen Regalen. Die Kostensätze sind Erfahrungswerte abgeschlossener Projekte. Die Kosten für das gesamte Regal ergeben sich aus der Anzahl der Stellplätze multipliziert mit den Kosten pro Stellplatz.

Wenn das Lager mittels Sprinklern gegen Brände geschützt wird, gestaltet sich die Regalkonstruktion aufwändiger und teurer. Dieser Mehraufwand wird nicht in das Regalsystem eingerechnet, sondern wird in der Kostenschätzung für den Brandschutz berücksichtigt.

#### **5.4.2 RBG**

Zur Kostenschätzung der Regalbediengeräte werden diese basierend auf einer Marktanalyse [NN-09] klassifiziert. Die Klassen unterscheiden sich in maximaler Bediendhöhe, Traglast und Ladeeinheitengröße.

Im Palettenlager können Traglastklassen von 300-600 kg, 600-1.250 kg und 1.250-3.000 kg gebildet werden. Die Höheneinteilung erfolgt in 10 Meter-Schritten von 20-40 m. RBG für Kleinteile und Tablare können Ladeeinheiten bis zu 50 kg bzw. 300 kg aufnehmen und werden typischerweise bis zu 12 m oder 22 m ausgeführt.

Die RBG können mit unterschiedlichen LAM kombiniert werden, um die unterschiedlichen Lagerkonfigurationen zu bedienen. Nicht jede Kombination ist dabei sinnvoll und kommt in der Praxis zum Einsatz. Bei RBG für Paletten kommen i.d.R. nur bis zu zwei einfachbreite LAM zum Einsatz. Bei RBG für Kleinteilelager nimmt die Umschlagsleistung einen höheren Stellenwert ein und es werden bis zu drei doppelbreite LAM auf das RBG montiert.

Zusammen mit einem namhaften Hersteller können die Marktpreise für typische RBG der erarbeiteten Klassen und die zugehörigen technischen Eigenschaften wie Beschleunigungen, Geschwindigkeiten, LAM-Zykluszeiten etc. ermittelt werden (Tabelle 5-1). Die Preisspanne bei RBG für Paletten reicht von 150.000 Euro bis rund 300.000 Euro, bei Kleinteilen liegt die Preisspanne zwischen 110.000 Euro und 250.000 Euro.

**Tabelle 5-1:** Übersicht der aufgenommenen Daten zu den Regalbediengeräten

		Einsatzgebiet													
		Kleinteile- / Tablarlager				Palettenlager									
		bis 50		bis 300		bis 600			bis 1.250			bis 3.000			
RBG Ausprägung	Traglast pro Lade- einheit [kg]														
	Maximale Bauhöhe [m]	12	22	12	22	20	30	40	20	30	40	20	30	40	
	1 LAM, etL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	2 LAM, etL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	3 LAM, etL	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	1 LAM, dtL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	2 LAM, dtL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	3 LAM, dtL	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	1 LAM, dtL, dbG	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	2 LAM, dtL, dbG	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Insgesamt werden Daten zu 34 unterschiedlichen RBG aufgenommen. Für jedes RBG liegen an die 40 Informationen zu den technischen Eigenschaften und den Kosten vor.

### 5.4.3 Übergabepunkte und Anbindung an die Vorzone

Der Investitionsaufwand für die Übergabepunkte ist hauptsächlich von der Art des verwendeten LAM abhängig. Bei einem doppelbreiten LAM kommt häufig ein doppelbreiter Übergabepunkt zum Einsatz, weil damit zwei Ladeeinheiten gleichzeitig übergeben werden können. Bei der Verwendung von mehreren LAM kommen in Normalfall entsprechend viele Übergabepunkte zur Anwendung, um alle LAM gleichzeitig bedienen zu können. Die Preisspanne der Übergabepunkte liegt zwischen 4.000 bis 5.000 Euro pro einfachtiefer Station.

Die Übergabepunkte sind über Fördertechnik an die Lagervorzone angebunden. Diese Fördertechnik übernimmt eine puffernde Funktion. Die Kosten dafür hängen im Wesentlichen von der Anzahl an Puffersegmenten und damit direkt mit der Anzahl an verbauten Antrieben zusammen.

### 5.4.4 Brandschutz

Ein automatisches Lagersystem ist für einen Großteil der Unternehmen, welche dieses einsetzen, ein unverzichtbares Element ihres Warenstroms. Ein längerfristiger

Ausfall, welcher beispielsweise durch einen Brand verursacht werden kann, ist oftmals existenzbedrohend. Der drohende längerfristige Lieferausfall bedeutet einen Verlust an Kunden und Marktanteilen. Sehr häufig werden deshalb aktive und passive Brandschutzsysteme installiert, die dieses Risiko vermindern sollen. Die Ausprägung und der damit verbundene Investitionsaufwand in den Brandschutz ist weitgehend unabhängig von den Ausprägungen vergleichbarer Planungsvarianten und damit nicht maßgebend für den Systemvergleich. An dieser Stelle werden zwei Systeme vorgestellt, um den Investitionsaufwand abschätzen zu können.

### **Passiver Brandschutz**

Der passive Brandschutz wird in Folge von Rauchentwicklung oder Hitze aktiviert. Das gebräuchlichste System beruht dabei auf Sprinklerköpfen, welche über in das Regalsystem integrierte Rohrleitungen mit einem Löschmittel versorgt werden. Im Falle eines Brandes erhitzt sich eine im Sprinklerkopf befindliche Glaskartusche und zerplatzt. Dadurch wird ein Ventil für das Löschmittel geöffnet. Durch eine externe Pumpanlage wird dieses Mittel dann in jenen Lagerbereich gepumpt, in welchem die Ventile geöffnet sind.

Die Ausführung der Sprinkleranlage ist von der Brandlast der Ladeeinheiten und der Anordnung der Sprinkler im Regal abhängig. Zur Vereinfachung wird die Annahme getroffen, dass jeder Stellplatz mit einem Sprinkler geschützt ist. Die Brandlast wird als mittelhoch eingeschätzt. Die Kosten für die Sprinkleranlage können damit über die Stellplatzanzahl und die Bauhöhe abgeschätzt werden. Sie reichen pro Stellplatz von ca. 10 Euro im AKL bis zu 15 Euro in Palettenlagern. Größere Bauhöhen erfordern dabei eine höhere Pumpenleistung, was sich auch in den Kosten niederschlägt.

### **Aktiver Brandschutz**

Ein aktiver Brandschutz wird bereits zur Brandvermeidung verwendet. Eine Möglichkeit dazu ist die Permanentinertisierung, bei welcher der Sauerstoffgehalt im Lager durch Zugabe von Inertgas soweit abgesenkt wird, dass kein Feuer ausbrechen kann. Im Normalfall wird dazu in einer Luftzerlegungsanlage Stickstoff abgeschieden und dem Lager zugefügt. Der Sauerstoffgehalt des Lagers sinkt dadurch von 21% auf 17-13% [Fml-10a]. Diese Art des Brandschutzes ist teurer als der passive Brandschutz und eignet sich beispielsweise für geruchssensible Lagergüter, welche bereits durch den Kontakt mit Rauch zerstört werden. Bei der Kostenberechnung für

Permanentinertisierungsanlagen müssen neben dem Investitionsaufwand die laufenden Kosten beachtet werden. Der ständige Luftaustausch mit der sauerstoffreicheren Außenwelt erfordert einen ständigen Nachschub an Inertgas, welches energieaufwendig gewonnen werden muss. Die Menge an eintretender Frischluft hängt von der Lagergebäudedichte, der Ausführungsart der Tore zur Außenwelt sowie der Anzahl der Toröffnungen für die Ein- und Auslagerladeeinheiten, ab.

### **5.5 IT-System**

Der Investitionsaufwandsschätzung für das IT-System liegen die Kosten der einzelnen Module eines Lagerverwaltungssystems zugrunde. Je nach Lagerkonfiguration und -strategien sowie der Größe des Lagers werden unterschiedliche Programmmodule benötigt. Die Komplexität und der Verwaltungsaufwand nehmen mit zunehmender Gassenanzahl zu. Wesentlichen Einfluss auf den Investitionsaufwand für die Lagerverwaltungssoftware hat die Anbindung an bestehende IT-Systeme, wie beispielsweise bereits im Unternehmen verwendete ERP-Software. Der Aufwand für das IT-System variiert zwischen 100.000-250.000 Euro.

### **5.6 Laufende Kosten**

Zum Betrieb eines automatischen Lagersystems sind Energie und eine regelmäßige Wartung der Lagerkomponenten erforderlich. Eine grobe Abschätzung der damit verbundenen Kosten kann über prozentuale Aufschlagwerte auf den Investitionsaufwand erfolgen. Dabei werden Kostensätze für die Kostengruppen Lagerhalle (Hallen-/Silobauweise), Regalsystem, Fördertechnik, RBG, und IT-Software sowie IT-Hardware unterschieden.

### **5.7 Kostenberechnung**

Bei der Kostenbewertung einer Planungsvariante können der Investitionsaufwand und die laufenden Kosten zum Betrieb des Lagersystems einfließen.

In der Praxis wird häufig der reine Investitionsaufwand zur Systemauswahl herangezogen. Dieser ergibt sich aus der Summe der Investitionsaufwände für die einzelnen



Lagerkomponenten. Sollen auch die laufenden Kosten mit in die Auswahl mit einbezogen werden, kann eine Bewertung auf Basis der Abschreibungen oder auf Basis der effektiven Nutzungskosten erfolgen. Abschreibungen sind dabei kalkulatorische Kosten, welche die Wertminderung durch Alterung und Verschleiß repräsentieren. In diesem Forschungsprojekt wird eine lineare Abschreibung angewendet. Bei dieser Abschreibungsform wird die Investitionssumme gleichmäßig auf den gesamten Abschreibungszeitraum verteilt. Steuerrechtlich könnte auch die degressive Abschreibung Verwendung finden. Bei der kalkulatorischen Kostenberechnung anhand der effektiven Kosten wird anstatt des Abschreibungszeitraums die effektive Nutzungsdauer als Gesamtzeit bis zum totalen Wertverlust der Lagerkomponenten herangezogen. Auch hier kann ein linearer Wertverlust angenommen werden. Nach der Nutzungsdauer muss die Wiederbeschaffung der Lagerkomponente erfolgen.

## **5.8 Ergebnis**

Mit der beschriebenen Methodik wird der Investitionsaufwand des Gesamtsystems ermittelt. Die Datenbasis der Methodik umfasst Datensätze zu Palettenhochregallagern als auch zu Automatischen Kleinteilelagern in unterschiedlichen Größen und Ausprägungsformen (z. B. Silo- und Hallenbauweise). Durch die Einbeziehung der laufenden Kosten werden die Kosten auf Basis des effektiven Abschreibungs- oder Nutzungszeitraums berechnet.



## 6 Implementierung eines Demonstrators zur integrierten Lagerssystemplanung

Die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Modelle werden mit der Programmiersprache C# in der Entwicklungsumgebung MS Visual Studio als getrennt voneinander wirkende Module implementiert. Abbildung 6-1 stellt das Funktionsprinzip des daraus entstandenen Planungswerkzeugs dar. Dem Planer steht eine Oberfläche zur Verfügung, über welche die Planungsvorgaben eingegeben und Planungsvarianten angelegt werden. Die Varianten werden mittels der Module bewertet. Diese greifen dazu auf die Datensätze unterschiedlicher Lagerkomponenten zurück, die in einer Datenbank gespeichert sind. Eine Optimierungsfunktion ermittelt für eine vorgegebene Lagerkonfiguration und -strategie die optimale Dimensionierung. Eine Sensitivitätsanalyse führt Parameterstudien zu den Planungsvorgaben durch. Die Berechnungsergebnisse des Planungswerkzeugs werden über die Oberfläche veranschaulicht.

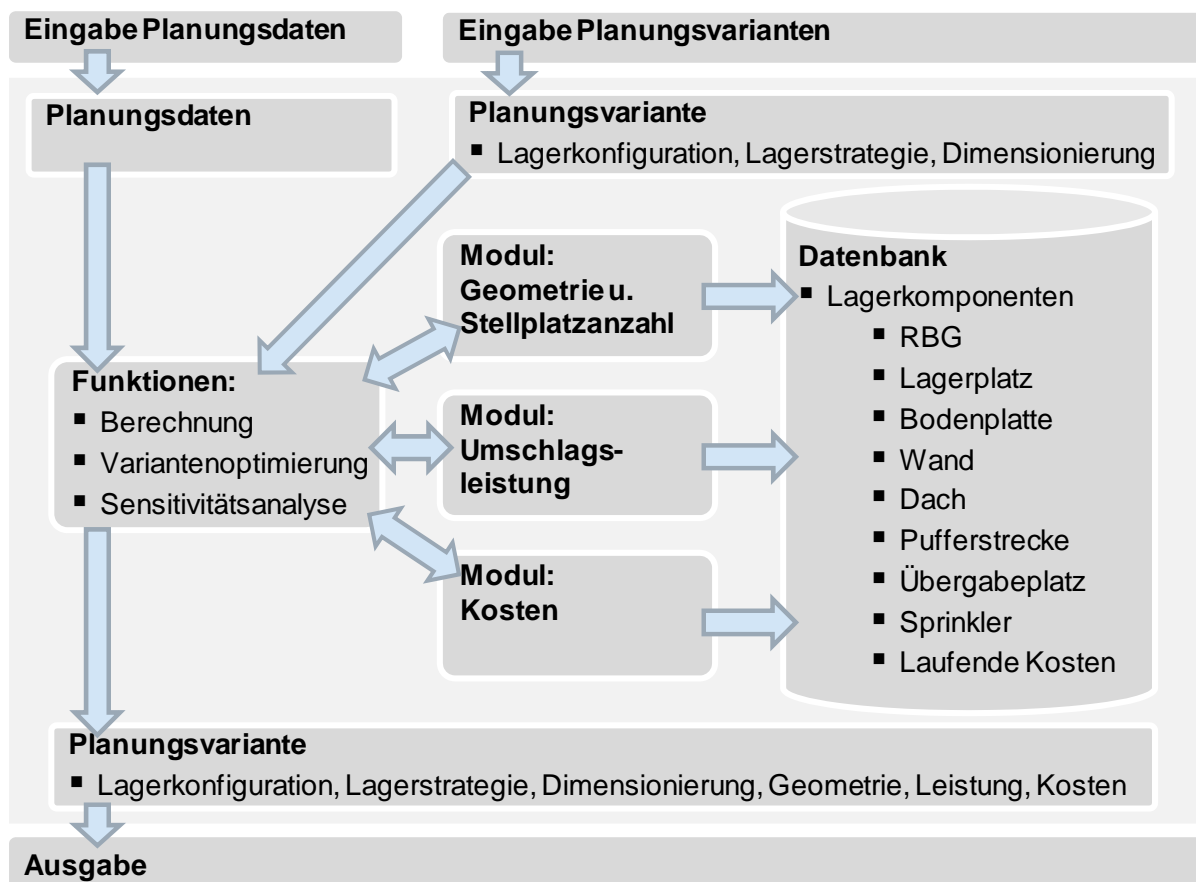
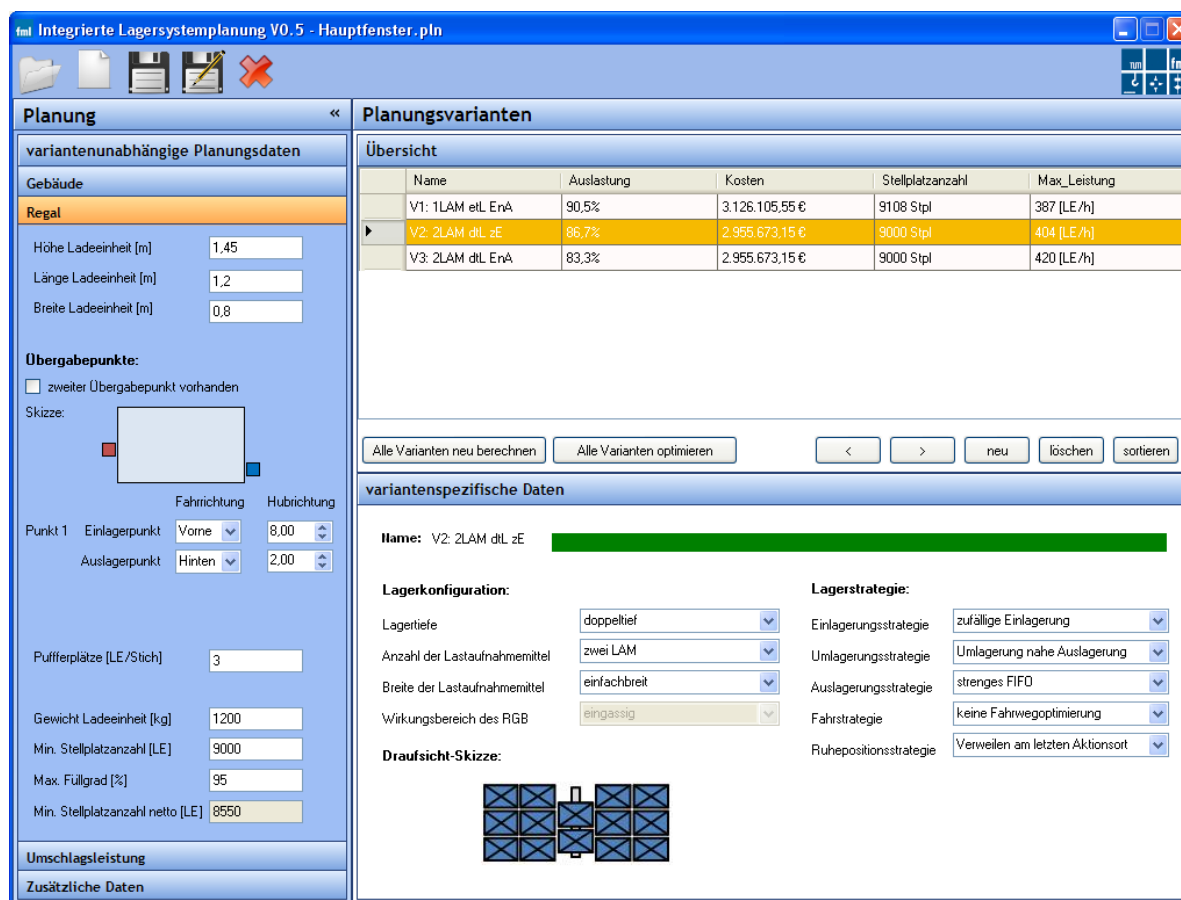


Abbildung 6-1: Funktionsprinzip des Planungswerkzeugs

## 6.1 Aufbau und Bedienung des Planungswerkzeugs

Das Hauptfenster der Benutzeroberfläche des Planungswerkzeugs gliedert sich in zwei Bereiche (vgl. Abbildung 6-2). Im linken Bereich werden die planungsrelevanten Daten, die für sämtliche Planungsvarianten gültig sind, dargestellt und eingegeben. Im rechten Bereich werden unterschiedliche Planungsvarianten angelegt und miteinander verglichen.



**Abbildung 6-2:** Screenshot des implementierten Planungswerkzeugs mit Hauptfenster zur Definition der Planungsvorgaben und Planungsvarianten

Die Planungsvorgaben sind die Grunddaten, auf welche sich die Planungsvarianten beziehen. Sie beinhalten die Gebäudedaten, mit der maximal zur Verfügung stehenden Länge, Höhe und Breite, die Abmessungen der zu lagernden Ladeeinheiten, die minimale Stellplatzanzahl, die Lage der Übergabepunkte und die Materialströme über die Übergabepunkte. Zusätzlich können Eingaben getroffen werden, ob und welche Art der Sequenzierung im Lager vorgenommen werden muss und ob eine

Brandschutzanlage sowie ein Lagerverwaltungssystem integriert werden soll. Eine gültige Planungsvariante muss diesen Planungsvorgaben entsprechen. Die Varianten unterscheiden sich in Lagerkonfiguration, -strategie oder in ihrer geometrischen Dimensionierung. Sie werden tabellarisch aufgelistet und können über die Parameter Auslastung, Investitionskosten, Stellplatzanzahl und maximale Umschlagsleistung miteinander verglichen werden.

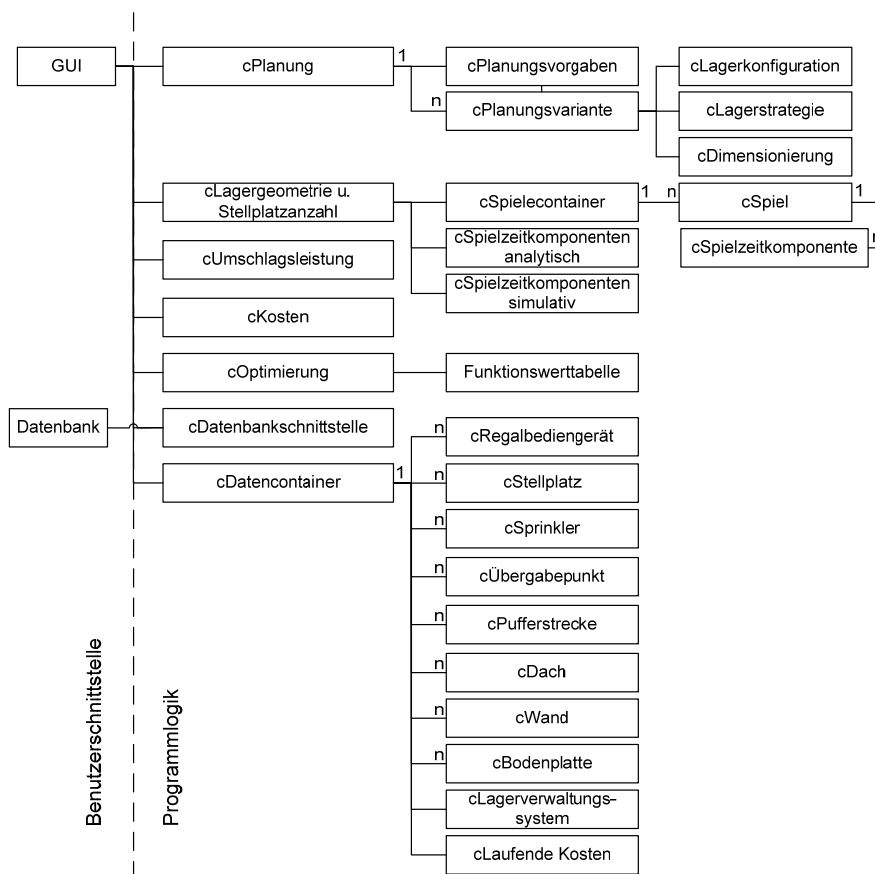
Jede Planungsvariante kann für sich genauer dimensioniert und betrachtet werden. Neben den geometrischen Abmessungen (Regallänge und -höhe, Anzahl der Gassen, etc.) kann aus einer Liste ein für die Planungsvariante geeignetes RBG oder die automatische Verwendung des kostengünstigsten RBG ausgewählt werden.

Im Hintergrund werden parallel zu den Benutzereingaben die Lagergeometrie und die realisierbare Stellplatzanzahl sowie Umschlagsleistung und Investitionsaufwand berechnet. In einem weiteren Fenster werden Zwischenschritte und detaillierte Informationen zu den Berechnungen ausgegeben. Optional können ein Vergleich der analytisch berechneten Spielzeitkomponenten mit einer Monte Carlo Simulation und eine Optimierung der Lagerdimensionierung durchgeführt werden. Mittels Sensitivitätsanalysen können die Auswirkungen von Änderungen der Planungsvorgaben auf ein optimal ausgelegtes Lager untersucht und visualisiert werden. Die gesamte Planung mit allen ausgearbeiteten Planungsvarianten und Berechnungsergebnissen kann gespeichert und geladen werden.

Das implementierte Planungswerkzeug besitzt Demonstrationscharakter und ist nicht für den direkten Einsatz in der Wirtschaft ausgelegt. Weder die Datenbasis noch die Benutzeroberfläche genügen professionellen Ansprüchen.

### **6.1.1 Programmstruktur**

Da die Programmiersprache C# objektorientiert ist, setzt sich die Programmstruktur aus hierarchisch angeordneten Klassen zusammen (Abbildung 6-3).



**Abbildung 6-3:** Vereinfachte Klassenstruktur des Rechenwerkzeugs

Ausgangspunkt ist die Benutzeroberfläche (GUI<sup>12</sup>) sowie eine Datenbank. Die GUI beinhaltet alle funktionsgebenden und datenspeichernden Objekte. Daten bezüglich einer Planung werden in den Objekten der Klassen cPlanungsvorgaben und cPlanungsvarianten abgespeichert. Objekte der letzteren Klasse sind in einer beliebig erweiterbaren Liste abgespeichert. Jede Planungsvariante kann auf die Planungsvorgaben zugreifen. Die Daten einer Planungsvariante sind in Unterklassen zur Lagerkonfiguration, Lagerstrategie und der Dimensionierung gekapselt. Alle Daten zu den Lagerkomponenten und den laufenden Kosten entstammen einer Datenbank, die mittels mehrerer Tabellen in einer Exceldatei realisiert ist. Die darin enthaltenen Datensätze werden beim Programmstart eingelesen, als Objekte abgespeichert und in Listen eines Datencontainers organisiert. Damit liegen die Objekte im Arbeitsspeicher, was einen sehr viel schnelleren Zugriff erlaubt als wenn bei jedem Lesevorgang die Exceltabellen angesprochen werden müssten. Außerdem werden die Lagerobjek-

<sup>12</sup> GUI (Graphical User Interface) englische Abkürzung für Grafische Benutzeroberfläche

te beim Programmstart vorsortiert, um den späteren Direktzugriff auf die Lagerkomponenten zu beschleunigen.

Die GIU beinhaltet des Weiteren die drei Module zur Berechnung der Planungsvarianten. Alle drei Module können eine übergebene Planungsvariante berechnen. Dazu müssen sie auf die Daten des Datencontainers zugreifen. Das Modul zur Umschlagsleistungsberechnung besteht aus mehreren Klassen. Zum einen beinhaltet es zwei Klassen die Funktionen zur Spielzeitkomponentenberechnung auf analytischem und auf simulativen Weg bereitstellen. Die Arbeitsspiele sind in einem Spielcontainer abgespeichert. Dieser beinhaltet eine Liste mit der Beschreibung sämtlicher Arbeitsspiele. Die Bestandteile werden dabei mittels der Klasse cSpielzeitkomponenten beschrieben.

## **6.2 Berechnung einer Planungsvariante**

Die Berechnung einer Planungsvariante erfolgt in drei Schritten. Zuerst werden jene Lagerkomponenten bestimmt, aus welchem das Lager aufgebaut ist. Dadurch kann die exakte Geometrie und die Stellplatzanzahl ermittelt werden. Darauf aufbauend wird die Umschlagsleistung berechnet. Den letzten Schritt stellt die Berechnung der Kosten dar.

### **6.2.1 Berechnung der Lagergeometrie und Stellplatzanzahl**

Eine Planungsvariante setzt sich aus verschiedenen Lagerkomponenten zusammen. Um die für die jeweilige Planungsvariante am besten geeigneten und dabei kostengünstigsten Komponenten zu identifizieren, erfolgt eine Suche in der bestehenden Datenbank. Damit eine Lagerkomponente geeignet ist, muss sie den technischen Anforderungen der Planungsvariante entsprechen. Ein geeigneter Stellplatz muss beispielsweise von der Traglast und den Abmessungen zu den Ladeeinheiten passen. Bei dieser Methode wird das Lager aus bekannten Komponenten aufgebaut. Die Genauigkeit wird deshalb im Wesentlichen vom Umfang, der Qualität und der Differenziertheit des Datenbestandes bestimmt. Zu der bestehenden Datensammlung können beliebig viele weitere Datensätze hinzugefügt werden. Bei den RBG können weitere Datensätze z. B. verschiedene Geschwindigkeiten abdecken. Das Pla-

nungswerkzeug ist so ausgelegt, dass neue Datensätze nicht bestehenden Klassenvorgaben entsprechen müssen.

Wegen der Wechselwirkungen, die bei der Auswahl der Lagerkomponenten und der Berechnung der Lagergeometrie entstehen, müssen diese parallel identifiziert bzw. berechnet werden. Zuerst wird das RBG festgelegt, da es über sein unteres Anfahrtsmaß die Höhe der Regalwand mitbestimmt. Dann kann ein geeigneter Stellplatz ausgewählt werden. Dieser muss für die Bauhöhe der Regalwand ausgelegt sein und die geforderte Tragfähigkeit aufweisen. Der Stellplatztyp bestimmt die Anzahl der Ladeeinheiten pro Feld, die Abstände zwischen den Ladeeinheiten, die Höhe des Aushubs sowie des Querträgers und die Breite des Stehers. Mit diesen Daten wird die exakte Länge, Höhe und Tiefe der Regalwand berechnet. Dann werden die Datensätze zu den Übergabepunkten und der Pufferstrecke ermittelt. Entscheidend sind wiederum die Abmessungen der Ladeeinheit sowie die die Konfiguration des LAM. Mittels der identifizierten Daten werden die Abmessungen einer Lagen-gasse berechnet. Aus der Bauhöhe der Regalwand wird die Ausführungsweise des Lagers (Silobau oder Hallenbau) bestimmt. Damit ist es möglich, die Datensätze für die Wände, Dach und Bodenplatte zu ermitteln und in die Geometrie des Lagergebäudes mit einzurechnen. Das Ergebnis ist ein ausgeplantes Layout, dessen Abmessungen und verwendete Lagerkomponenten bekannt sind. Am Ende erfolgt die Kontrolle, ob die Lagergeometrien gültig sind: zum einen müssen die Abmessungen des Lagergebäudes den Planungsvorgaben entsprechen, zum anderen setzt beispielsweise eine mögliche Verschiebung der Übergabepunkte eine entsprechend hohe oder lange Regalwand voraus.

Programmintern werden die Geometriedaten in den Klassen der Planungsvarianten abgespeichert. Die Lagerkomponenten werden dabei lediglich über Zeiger auf die Objekte im Datencontainer referenziert. Dadurch ist die Datenkonsistenz gewährleistet und sichergestellt, dass beim Speichern von Planungsvarianten keine sicherheitskritischen Daten (wie z. B. Kostensätze) mitgeschrieben werden.

### **6.2.2 Berechnung der Umschlagsleistung**

Die Berechnung der Umschlagsleistung kann erst dann erfolgen, wenn die Regalwandabmessungen und die Lagerkomponenten der Planungsvariante bestimmt sind. Auch müssen die Arbeitsspiele (Spielanteil ( $a$ )) für die von der Variante vorgegebene



Kombination aus Lagerkonfiguration und -strategie definiert sein. Im Normalfall werden die Spielanteile für das reine Ein- und Auslagerspiel sowie für das kombinierte Spiel benötigt. Alle Arbeitsspiele sind in der Klasse cSpielecontainer hinterlegt. In den dafür zuständigen Klassen vom Typ cSpiel ist die Zusammensetzung der Spielanteile abgespeichert. Dies geschieht mittels einer Liste, welche sämtliche Spielzeitkomponenten des Spiels enthält. Für jede Spielzeitkomponente sind der Typ, der Koeffizient und die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens im Arbeitsspiel vorgegeben. Zur Berechnung des Spielanteils (b) finden entsprechend der Ruhepositionsstrategie unterschiedliche Gleichungssysteme Anwendung. Diese berücksichtigen die unterschiedlichen Startpunkte im Regal und die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der sich daraus ergebenden Arbeitsspiele. Die Spielzeitkomponenten selbst sind Funktionen, die mittels der Klassen cSpielzeitkomponenten analytisch oder cSpielzeitkomponenten simulativ berechnet werden.

Das Ergebnis der Berechnungen sind die mittleren Zeitaufwände für das reine Ein- oder Auslagerspiel sowie für das kombinierte Ein- und Auslagerspiel. Des Weiteren wird die Leistung einer Lagergasse auf das Gesamtlager skaliert und eventuell mit der Leistungsverlustkennzahl multipliziert. Daraus ergibt sich die Auslastung der Planungsvariante.

### **6.2.3 Berechnung der Kosten**

Die Kostenberechnung erfolgt auf Basis der Kostensätze der Lagerkomponenten, aus denen die Planungsvariante aufgebaut ist. Der Gesamtinvestitionsaufwand für die technischen Anlagen setzt sich aus den Aufwänden für die Regalbediengeräte, das Regal mit eventueller Sprinkleranlage, die Übergabepunkte und die Pufferplätze zusammen. Der Investitionsaufwand für das Gebäude beinhaltet das Grundstück, die Bodenplatte, die Wände und das Dach. Der Investitionsaufwand für das IT-System wird entsprechend der Größe und Ausprägung der Planungsvariante berechnet. Der Gesamtinvestitionsaufwand ergibt sich aus der Summe dieser Beträge.

Die Berechnung der laufenden Kosten baut auf den Investitionsaufwand der einzelnen Kostengruppen auf.

## 6.3 Optimierung

Die implementierte Optimierung versucht jene Parameterkombination eines Lagersystems zu finden, bei welcher der Funktionswert der Zielfunktion ein Minimum darstellt. Für die Optimierung der Planungsvarianten können unterschiedliche Optimierungsalgorithmen eingesetzt werden. Das vorliegende Optimierungsproblem bezieht sich auf eine nichtlineare unstetige Funktion [Alt-02]. Die Veränderlichen, hier als der Vektor  $x$  dargestellt (bestehend aus Länge, Höhe, Breite und RBG), bestimmen die Dimensionierung einer Planungsvariante. Die Parameter sind diskret, das bedeutet sie können nur endlich viele Werte annehmen. Aus der Anzahl der Parameter ergibt sich die Dimension  $n$  des Problems. In diesem Fall liegt ein mehrdimensionales Optimierungsproblem vor. Der Vektor  $x$  ist dabei Element der diskreten Menge  $S$ , welche eine Teilmenge des  $n$ -dimensionalen Vektorraums  $H$  ist [Sch-09]:

$$\min_{x \in S} f_{\text{Kosten}}(x) \quad f_{\text{Kosten}}: S^n \rightarrow \mathbb{R} \quad S \subset H^n \quad (6-1)$$

unter Einhaltung der Restriktionen:

$$NB1: f_{\text{Leistung}}(x) \geq \text{geforderte Leistung}$$

$$NB2: f_{\text{Stellplatzanzahl}}(x) \geq \text{geforderte Stellplatzanzahl}$$

$$NB3: f_{\text{Laenge}}(x) \leq \text{maximale Laenge}$$

$$NB4: \dots$$

Die Zielfunktion der Optimierung ist der Betrag des Investitionsaufwands, sie kann aber auch wahlweise der Betrag des Verhältnisses der Kosten zur Umschlagsleistung oder zur Stellplatzanzahl sein. Die Nebenbedingungen sind die Umschlagsleistung, die Stellplatzanzahl, die Abmessungen der Lagerhalle etc. Für eine gültige Planungsvariante müssen sämtliche Nebenbedingungen, die sich aus den Planungsvorgaben ergeben, erfüllt sein. Neben dem globalen Minimum können auch lokale Minima attraktive Lösungen für die Lagerauslegung darstellen.

### 6.3.1 Theorie der nichtlinearen Optimierung diskreter Funktionen

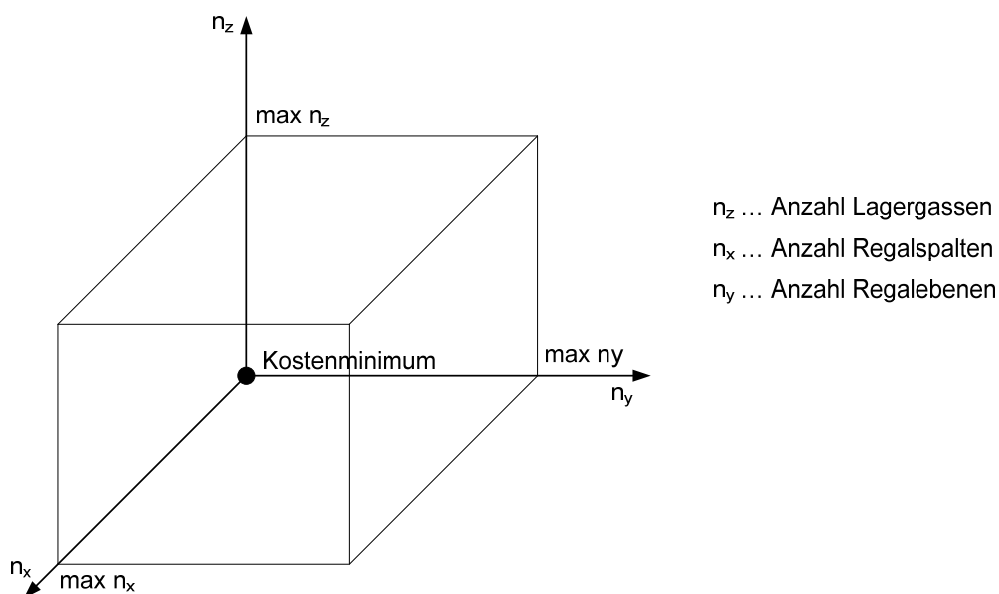
Nichtlineare Optimierungsprobleme mit diskreten Parametern sind im Allgemeinen schwerer lösbar als stetige oder lineare Probleme. Aus der Zielfunktion können nur wenige Informationen abgeleitet werden. Wenn eine Lösung bekannt ist, kann wegen der Unstetigkeit nicht oder nur sehr beschränkt auf die Lösungen in der unmittelba-

ren Umgebung geschlossen werden. Algorithmen zur Optimierung von diskreten Zielfunktionen sind meist auf ein spezielles Problem zugeschnitten, weil die diskreten Schritte zwischen den zulässigen Lösungen von Problem zu Problem unterschiedliche Auswirkungen haben.

Ein großer Teil der mathematischen Theorie zur Optimierung diskreter Zielfunktionen setzt voraus, dass die Zielfunktion linear ist [Fml-11]. Für nichtlineare Probleme kann nur mittels einer vollfaktoriellen Untersuchung aller Parameterkonfigurationen das globale Optimum zuverlässig gefunden werden. Seit der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts werden heuristische Verfahren entwickelt, welche auch ohne sämtliche Kombinationen abzusuchen gute Lösungen für ein Optimierungsproblem liefern und das Optimum annähern. Diese Verfahren werden dann eingesetzt, wenn die exakten Methoden zu aufwändig sind. Wichtige Vertreter sind das Simulated Annealing-Verfahren, Tabu Search und der genetische Algorithmus. Das globale Optimum kann durch die Heuristiken nicht zuverlässig gefunden oder als solches erkannt werden.

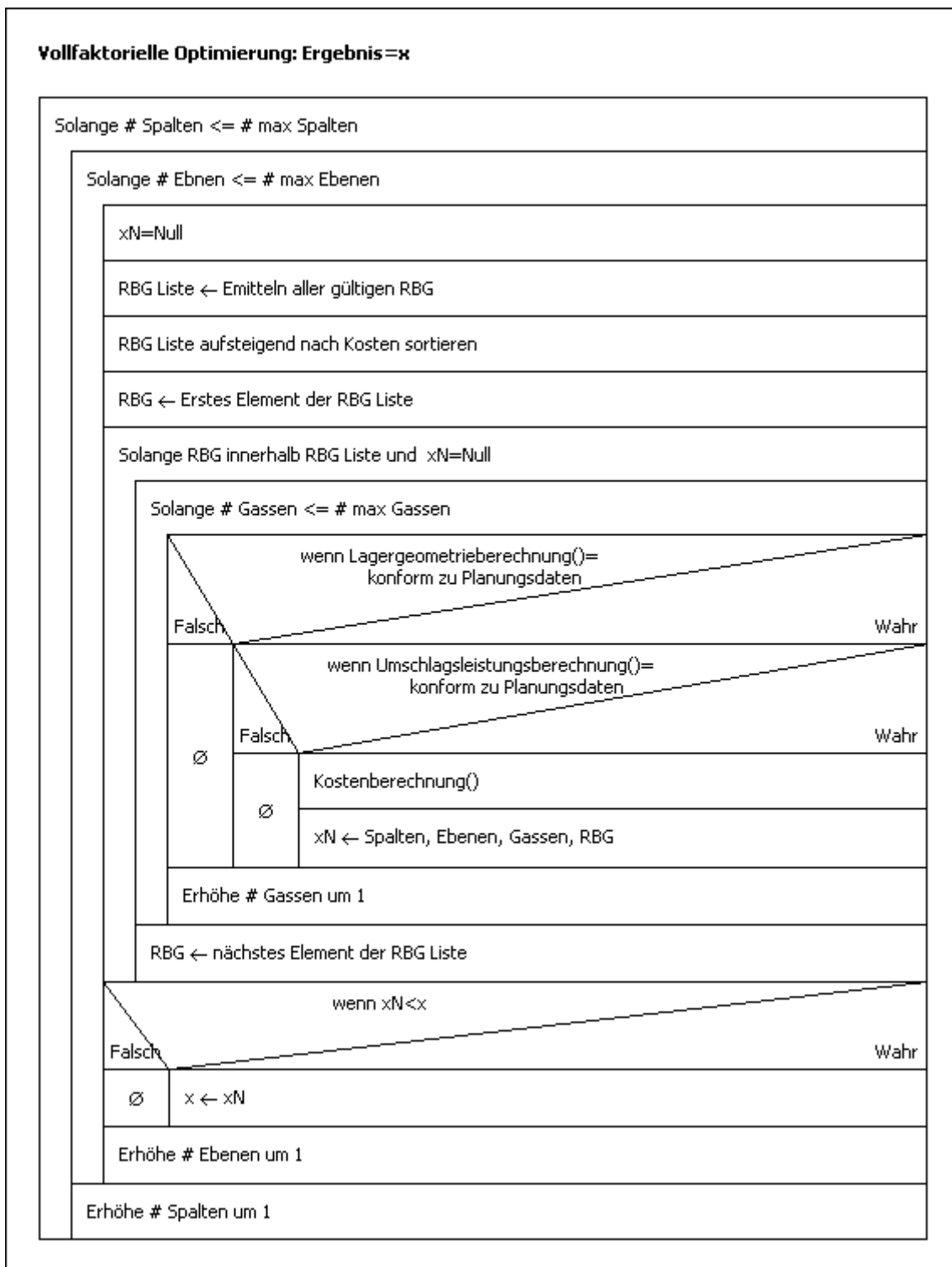
### **6.3.2 Vollfaktorielle Optimierung**

Die vollfaktorielle Optimierung (oft auch als vollständige Enumeration oder erschöpfende Suche bezeichnet) ist ein Algorithmus zur Bestimmung des globalen Optimums bei diskreten Optimierungsaufgaben. Sie realisiert ein Vorgehen, welches bei stetigen Zielfunktionen nicht durchführbar ist, nämlich alle zulässigen Parameterkombinationen nacheinander zu untersuchen und zu vergleichen. Dieses Vorgehen ist der einzige allgemein einsetzbare Algorithmus bei diskreten Optimierungen. Der Aufwand zur Lösung steigt dabei mit zunehmender Anzahl von Veränderlichen beziehungsweise zulässigen, zu überprüfenden, diskreten Schritten stark an. Der Fall der Optimierung einer Planungsvariante ist durch die geringe Anzahl an Parametern (vier) noch übersichtlich. Abbildung 6-4 skizziert den Suchraum, der von den drei Parametern, welche die räumliche Ausdehnung des Lagersystems beschreiben, aufgespannt wird.



**Abbildung 6-4:** Suchraum der vollfaktoriellen Optimierung

Um die Anzahl der Funktionsauswertungen der Berechnungsmodule zu reduzieren, fließt der vierte Parameter, das eingesetzte RBG, nicht vollfaktoriell ein. Bei der Optimierung werden RBG nur betrachtet, wenn sie den technischen Voraussetzungen für die Planungsvariante entsprechen und gleichzeitig günstiger und/oder schneller als das momentan Optimale sind. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, muss die Lösung suboptimal sein und die Parameterkombination wird verworfen. Weitere Rechenzeit wird durch eine schrittweise Berechnung der Nebenbedingungen eingespart. Bei Nichterfüllung einer Nebenbedingung wird die Parameterkonfiguration sofort verworfen und nicht weiter betrachtet. Der Ablauf der Optimierung ist in dem Nassi-Shneiderman-Diagramm in Abbildung 6-5 dargestellt. In zwei Schleifen werden sämtliche Kombinationen der beiden Parameter *Anzahl Ebenen* und *Anzahl Spalten* durchgespielt. Für jede Kombination werden sämtliche geeignete RBG aus dem Datenbestand ermittelt. Die Kriterien dafür sind die maximale Arbeitshöhe und Schienenlänge. Die gefilterten RBG werden anschließend aufsteigend nach dem Investitionsaufwand sortiert. Dann wird für jedes RBG, beim günstigsten angefangen, überprüft, ob es eine gültige Planungsvariante gibt. Dazu wird über eine weitere Schleife der Parameter *Anzahl Gassen* variiert und für die sich daraus ergebene Planungsvariante die Lagergeometrie, die Umschlagsleistung und der Investitionsaufwand berechnet. Erfüllt einer dieser Parameter nicht die Planungsvorgaben, wird die Parameterkombination verworfen.

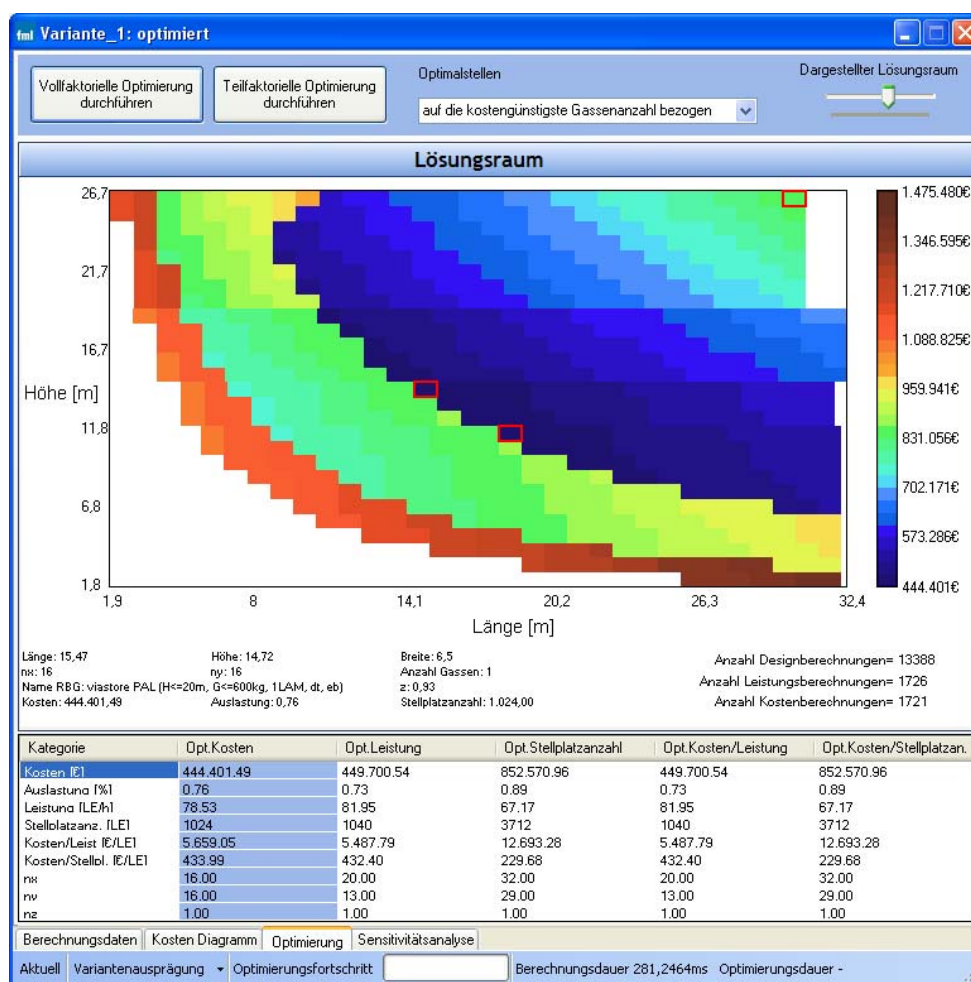


**Abbildung 6-5:** Nassi-Shneiderman-Diagramm der vollfaktoriellen Optimierung

Wird hingegen eine gültige Variante gefunden, muss die Gassenanzahl nicht weiter erhöht werden und keine weiteren RBG getestet werden. Die daraus gebildeten Parameterkombinationen verursachen mit Sicherheit einen höheren Investitionsauf-

wand. Eine gefundene Lösung wird mit dem aktuellen Optimum der Suche verglichen und nimmt eventuell dessen Position ein.

Die vollfaktorielle Suche wird auf dem verwendeten Testrechner im Zehntelsekundenbereich durchgeführt. Alle berechneten Lösungen werden in der Klasse cFunktionswerttabelle abgespeichert. Als Ergebnis werden alle relevanten Informationen zu den gefundenen Optimalstellen ausgegeben. Zusätzlich wird der gesamte gefundene Lösungsraum grafisch in einem Diagramm ausgegeben (Abbildung 6-6).



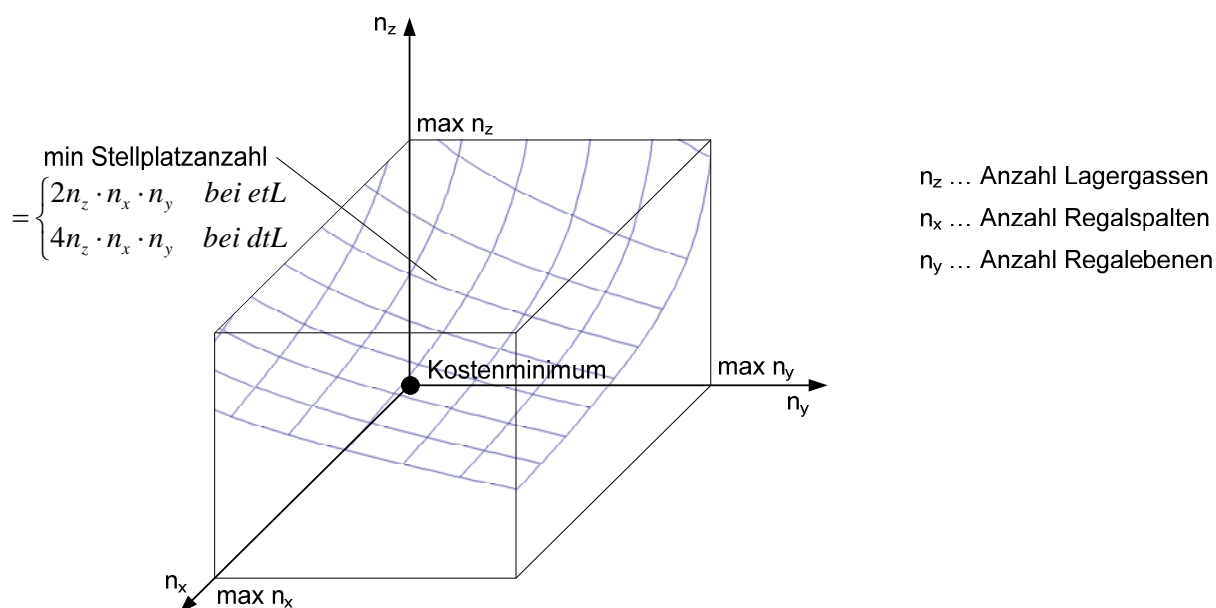
**Abbildung 6-6:** Screenshot der graphischen Visualisierung des Lösungsraums der vollfaktoriellen Optimierung

Dieses Diagramm zeigt für jede gültige Lösung die Regallänge und Regalhöhe und die dabei günstigste Gassenanzahl mit dem am besten geeigneten RBG. Die Lösungen sind dem Investitionsaufwand entsprechend eingefärbt. Ähnlich gute Lösungen können somit vom Planer einfacher gefunden und betrachtet werden. Wenn der Mousezeiger über eine Lösung gefahren wird, werden in einem Schriftfeld zusätzli-

che Daten zu der Lösung ausgegeben (z. B. die Anzahl der Lagergassen, Auslastung und Kosten).

### 6.3.3 Teilfaktorielle Optimierung

Wesentlich schneller als die vollfaktorielle ist eine teilfaktorielle Suche, bei welcher sich eine spezielle Funktionseigenschaft der Zielfunktion zunutze gemacht wird. Diese besitzt in den Bereichen, in welchen die geforderte Stellplatzanzahl genau erreicht oder nur wenig überschritten wird, lokale Optimalstellen. Werden diese Stellen gezielt durchsucht, wird das globale Optimum zuverlässig identifiziert und die Anzahl der notwendigen Funktionsauswertungen deutlich reduziert. Anstatt sämtliche mögliche Kombinationen zu durchsuchen, werden nur noch jene Parameterkonfigurationen getestet, welche im Suchraum auf jener Fläche liegen<sup>13</sup>, die der minimalen Stellplatzanzahl entspricht (Abbildung 6-7).



**Abbildung 6-7:** Suchfläche der teilfaktoriellen Optimierung

Im Vergleich zur vollfaktoriellen Optimierung wird der Rechenaufwand damit reduziert. Während die Parameter *Anzahl Gassen* und *Anzahl Spalten* wieder über zwei Schleifen variiert werden, fließt der dritte Parameter *Anzahl Ebenen* nicht mehr multiplikativ in die Anzahl der zu untersuchenden Parameterkombinationen ein. Der

<sup>13</sup> Wegen der notwendigen Ganzzahligkeit der Parameter kann die Anzahl der Stellplätze, die sich aus der Parameterkonfiguration ergibt, auch leicht über der minimalen Stellplatzanzahl liegen (und damit der in Abbildung 6-7 dargestellten Fläche).

Parameter errechnet sich aus den beiden anderen. Die Auswahl der RBG und die Berechnungen der Nebenbedingungen und der Zielfunktion erfolgen dann wieder analog zur vollfaktoriellen Optimierung. Das Struktogramm der teilfaktoriellen Suche ist in Abbildung 6-8 abgebildet.

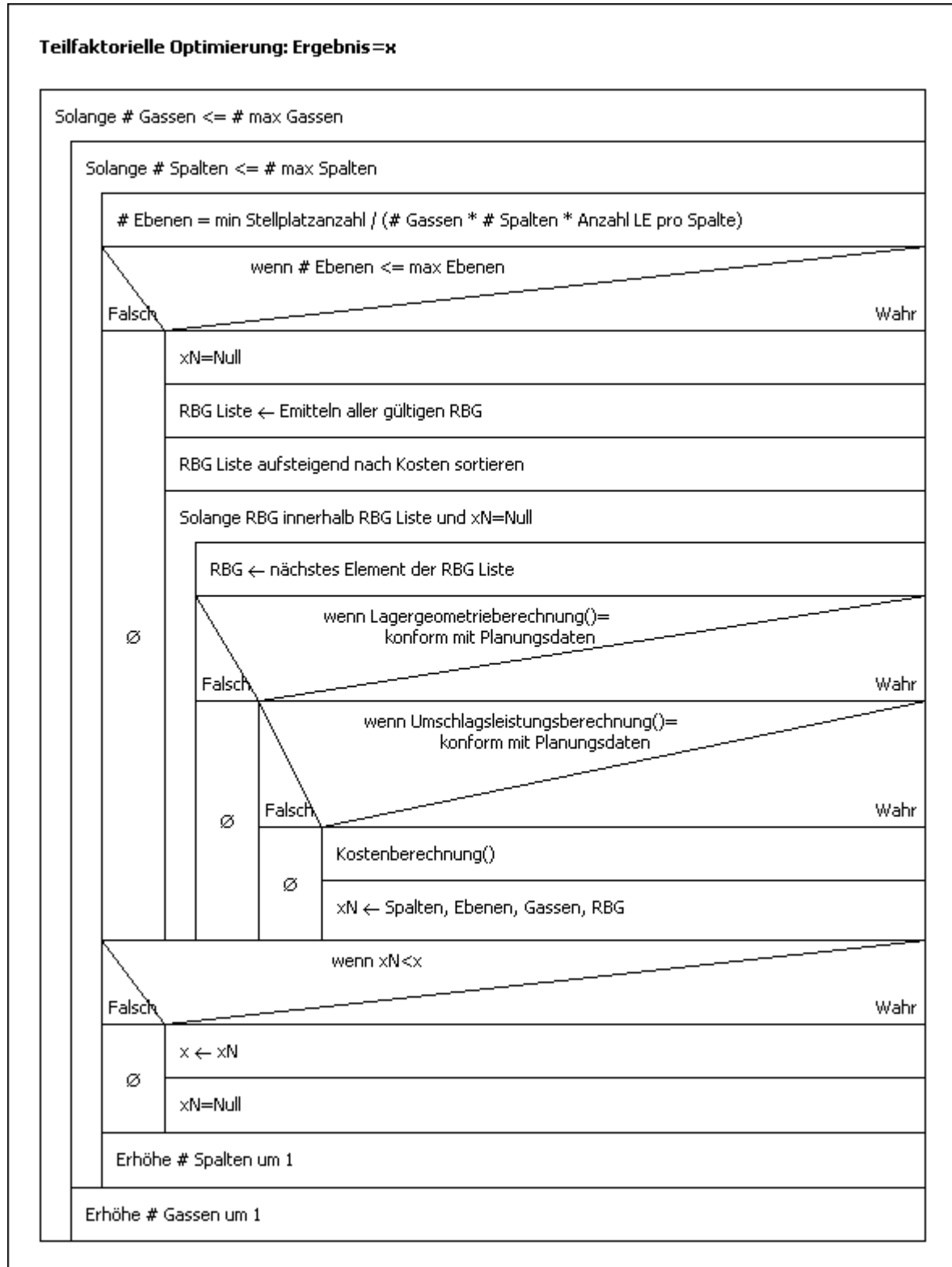
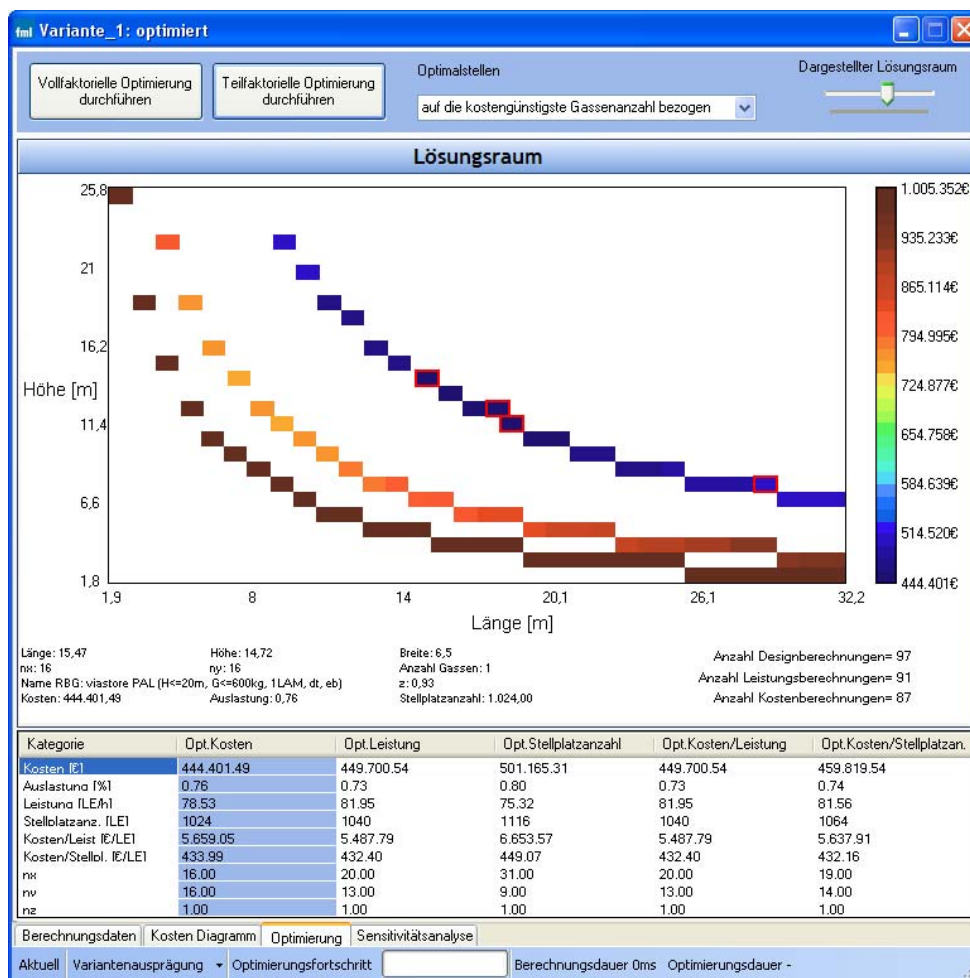


Abbildung 6-8: Nassi-Shneiderman-Diagramm der teilfaktoriellen Optimierung



Das Ausgabediagramm des Lösungsraums für diese Optimierungsfunktion ist in Abbildung 6-9 dargestellt. Wegen der geringeren Anzahl an untersuchten Parameterkombinationen wird nicht mehr der gesamte Lösungsraum dargestellt, sondern nur mehr jene Kombinationen, welche die minimale Stellplatzanzahl realisieren.



**Abbildung 6-9:** Screenshot der graphischen Visualisierung des Lösungsraums der teilfaktoriellen Optimierung

**Anmerkung:**

Bei doppeltiefen Lagern besteht die Möglichkeit, dass dieses Verfahren nicht das globale Optimum findet. Wenn die günstigste Lösung nur sehr knapp nicht die geforderte Umschlagsleistung erreicht, kann durch zusätzliche Regalspalten die Stellplatzanzahl erhöht und der Lagerfüllgrad gesenkt werden. Das führt zu verkürzten Umlagerungszeiten. Um die geforderte Umschlagsleistung zu erbringen, ist es in diesem Fall günstiger, der Planungsvariante lediglich eine Regalspalte anstatt einer weiteren Lagergasse hinzuzufügen. Während bei der vollfaktoriellen Optimierung die

entsprechenden Parameterkombinationen untersucht werden, geschieht dies bei der teilfaktoriellen Optimierung nicht, da die Kombination nicht auf der Fläche der minimalen Stellplatzanzahl liegt. Dieser Effekt tritt jedoch nur sehr selten auf und kann vernachlässigt werden.

### **6.3.4 Optimierungsheuristiken**

Die in den zwei vorangehenden Abschnitten beschriebenen Optimierungsmethoden sind ausreichend schnell und zuverlässig, um im Planungswerkzeug eingesetzt werden zu können. Zusätzlich werden auch Versuche mit Optimierungsheuristiken gemacht, die aufgrund unbefriedigender Resultate nicht in das Werkzeug übernommen werden. Gegenüber der vollfaktoriellen Optimierung verringern sie die Anzahl der Funktionsauswertungen um teilweise mehr als die Hälfte. Dabei schaffen sie es meist aber nur mehr lokale Optima zu identifizieren und ermöglichen keine aussagekräftige Visualisierung des untersuchten Lösungsraums. In diesem Abschnitt wird das Prinzip der untersuchten Heuristiken erläutert, eine ausführliche Darstellung dieser Verfahren findet sich bei [Dré-06].

#### **Simulated Annealing**

Das Simulated Annealing-Verfahren ist ein verbreitetes heuristisches Optimierungsverfahren. Das Vorbild für die Funktionsweise des Algorithmus ist das Anlassen eines Werkstoffs. Durch die langsame Abkühlung haben Fehlstellen im Kristall genügend Zeit und kinetische Energie, um auszuheilen. Dadurch erreicht der Werkstoff insgesamt einen sehr niedrigen Energiezustand. Der Optimierungsalgorithmus versucht für die Zielfunktion diesen Vorgang des Anlassens zu imitieren. Ein Kontrollparameter, der die Temperatur darstellt, wird stetig gesenkt. Zu Beginn besitzt der Kontrollparameter den höchsten Wert und es wird eine erste Parameterkombination betrachtet. Ausgehend von dieser Lösung wird eine benachbarte Kombination zufällig bestimmt. Besitzt diese einen niedrigeren Zielfunktionswert, wird sie immer angenommen. Ist der Zielfunktionswert schlechter, wird sie nur mehr mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit angenommen. Diese sinkt mit einem niedrigen Wert des Kontrollparameters. Durch diesen Mechanismus verlässt das Verfahren ein lokales Minimum leichter als ein globales. Mit zunehmender Iterationsanzahl wird die Wahrscheinlichkeit größer, in dem gefundenen Optimum zu verharren. [Kir-83]

### **Tabu Search**

Das Verfahren des Tabu Search besitzt weniger Freiheitsgrade gegenüber dem Simulated Annealing-Verfahren. Von einem Startpunkt ausgehend werden bei jeder Iteration sämtliche benachbarten Parameterkonfigurationen berechnet. Die Lösung mit dem besten Zielfunktionswert dient als neuer Startpunkt. Um zu vermeiden, dass in einem folgenden Schritt genau an eine Stelle zurückgesprungen wird, welche bereits untersucht wurde, wird eine Tabuliste dokumentiert. Die Liste enthält alle Parameterkombinationen, die bereits angenommen wurden und deshalb nicht mehr zulässig sind. Befinden sich Nachbarn einer aktuellen Kombination auf der Tabuliste, werden diese nicht mehr als Kandidaten betrachtet. Als Abbruchkriterium wird entweder eine maximal zulässige Anzahl an Zielfunktionswertauswertungen oder Iterationen verwendet. [Fre-89, Fre-90]

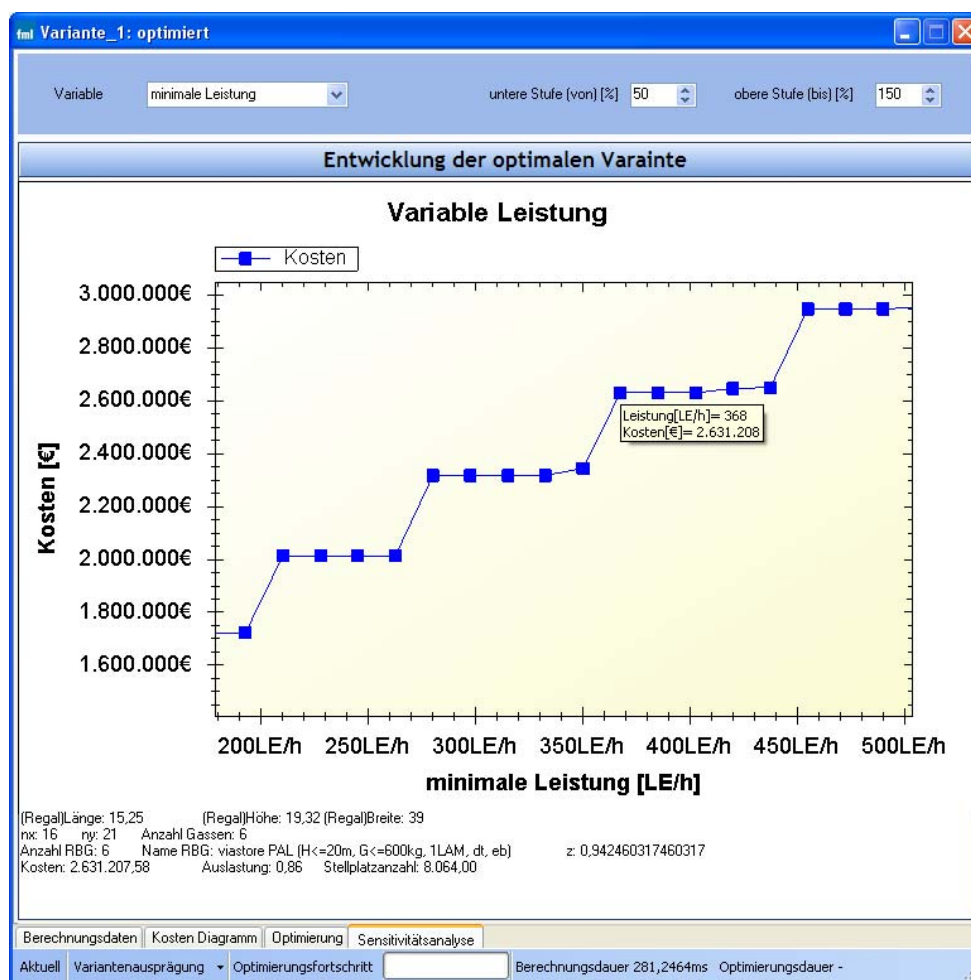
### **Genetischer Algorithmus**

Ein wichtiger Vertreter der Evolutionsalgorithmen ist die genetische Optimierung. Im Gegensatz zu den beiden bereits beschriebenen Heuristiken wird bei diesem Algorithmus nicht nur eine Lösung untersucht, sondern eine gesamte Population an Lösungen. Jeder Lösung dieser Population wird ein Fitnesswert zugeordnet, welcher die Güte des Funktionswerts wiedergibt. Verschiedene Parameterkombinationen sind die Ausgangswerte einer Population und werden in mehreren aufeinanderfolgenden Generationen so verändert, dass der durchschnittliche Fitnesswert zunimmt. Die Vorgehensweise, um diese Verbesserung zu erreichen, ahmt Mechanismen aus der Natur nach. Parameterkombinationen mit einem hohem Fitnesswert werden öfter übernommen als jene mit einem niedrigen. Die Kombinationen der nächsten Generation werden dadurch gebildet, dass Parameter zweier Lösungen zu einer neuen Parameterkombination vereinigt werden. Außerdem werden auch Parameter einer einzelnen Kombination abgeändert. Der genetische Algorithmus erfordert einen hohen Rechenaufwand, hat jedoch den Vorteil, dass nicht nur eine einzige Lösung gefunden wird, sondern eine ganze Population. [Gol-09]

## **6.4 Sensitivitätsanalyse**

Mittels einer Sensitivitätsanalyse werden Parameterstudien durchgeführt, welche die Auswirkungen von veränderten Planungsvorgaben auf ein optimal dimensioniertes

Lager untersuchen. Es ist möglich, die Auswirkungen unterschiedlicher Größenbeschränkungen, steigender oder fallender Leistungsanforderungen bzw. andere Stellplatzanforderungen zu untersuchen und zu visualisieren. Dadurch können die Robustheit der gefundenen Lösung bewertet und sinnvolle Alternativen bei leicht veränderten Rahmenbedingungen gefunden werden und in die weitere Planung einfließen. Abbildung 6-10 stellt den Investitionsaufwand für das optimal dimensionierte Lager bei unterschiedlicher Leistungsanforderung dar. Innerhalb eines bestimmten Leistungsbereichs verändert sich das optimale Lager kaum. Wird die Leistungsanforderung zu groß, muss eine andere Dimensionierung gewählt werden (z. B. mit einer zusätzlichen Lagergasse). Bei verminderter Leistungsanforderung kann es Lagervarianten geben, die deutlich günstiger als die ursprünglich betrachtete Variante sind.



**Abbildung 6-10:** Screenshot der Visualisierung der Sensitivitätsanalyse bei veränderter Leistungsanforderung

## 6.5 Validierung

Im Anschluss an die Implementierung des Planungswerkzeugs werden Versuche durchgeführt, um den Programmcode zu verifizieren und die Berechnungsmodelle zu validieren. Dies geschieht anhand von realen, abgeschlossenen Planungen, die nachvollzogen werden, und anhand laufender Planungen, die begleitet werden. Zusammen mit Projektpartnern werden hierfür mehrere für den Vergleich geeignete Planungen identifiziert. Ziel ist es, die Berechnungsgenauigkeit des Planungswerkzeugs aufzuzeigen sowie eventuelle Schwachstellen zu identifizieren. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen zur Überarbeitung des Planungswerkzeugs.

### 6.5.1 Berechnung der Stellplatzanzahl und Lagergeometrie

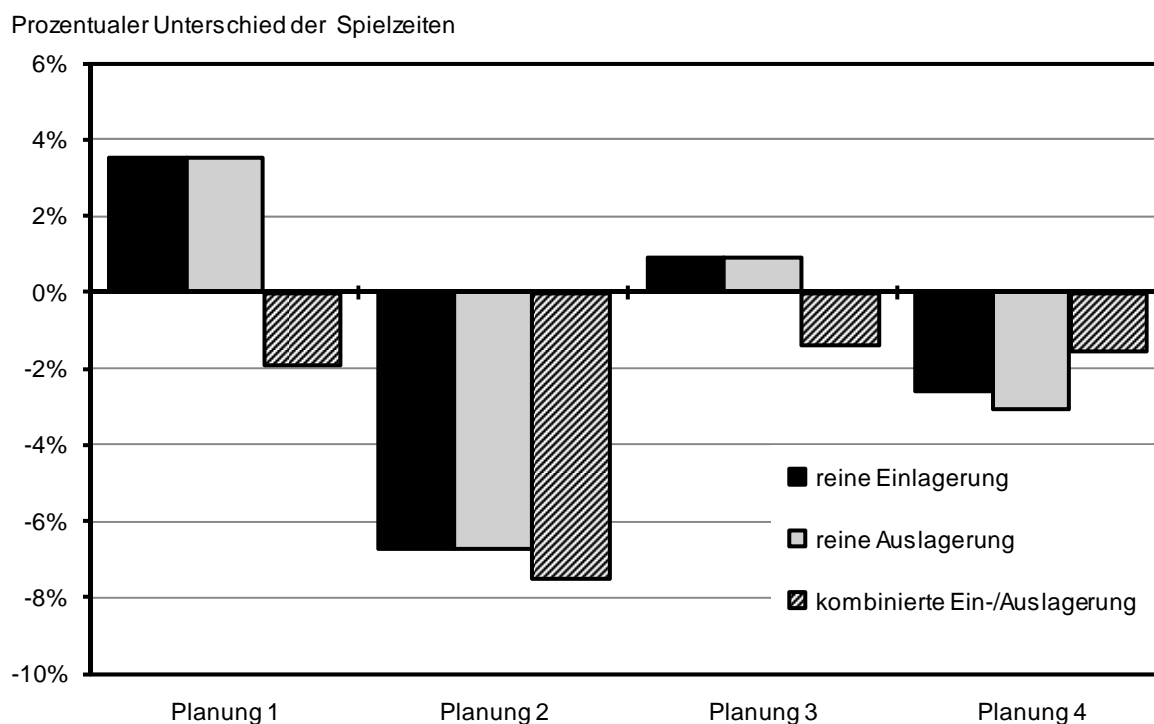
Das Modell zur Berechnung der Stellplatzanzahl und Lagergeometrie erlaubt die Betrachtung eines einzelnen Lagerbereichs mit einfach- oder doppeltiefen Regalen und einfach- oder doppelbreiter Lagergasse. Innerhalb der Grenzen dieses Modells weisen die nachgerechneten Lagergeometrien eine gute Übereinstimmung mit den realen Planungen auf. Kritische Lagerkomponenten sind dabei die RBG. Sie werden in sehr vielen verschiedenen Formen aufgeführt und unterscheiden sich teilweise stark. Der vorhandene Datenbestand deckt die verschiedenen Standardklassen ab, hat jedoch nicht den Anspruch sämtliche auf dem Markt befindliche Geräte wiederzugeben. Kommen in einer realen Planung andere RBG als die erfassten zum Einsatz, können planungsrelevante Unterschiede in der Auslegung der Varianten auftreten. Abweichungen der kinematischen Eigenschaften verzerren die Berechnung der Umschlagsleistung. Spezielle Ausführungsformen der LAM erfordern beispielsweise eine niedrigere Aushubhöhe. Das Planungswerkzeug schafft es deshalb nicht, bei einer im Verhältnis zur realen Planung gleichen Regalhöhe dieselbe Anzahl an Ebenen zu realisieren. Beim Einsatz des Planungswerkzeugs empfiehlt es sich, die Planung zuerst mit den Lagerkomponenten der Standarddatenbank durchzuführen und im weiteren Planungsverlauf die angebotenen RBG nachzutragen und die Auslegung zu wiederholen.

Verbesserungen des Modells sind durch die Implementierung von komplexeren Lagersystemen möglich. Dadurch könnten beispielsweise mehrere zusammenhängende, aber unterschiedlich ausgeführte Lagerbereiche gemeinsam betrachtet werden. Eine umfangreichere Datenbasis ermöglicht es, Lagervarianten genauer abzubilden.

Beispielsweise ist es sinnvoll, ergänzende Datensätze für Industriepaletten zu hinterlegen.

### 6.5.2 Berechnung der Umschlagsleistung

Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, erfolgt die Validierung der Umschlagsleistung auf Basis der realen RBG, die in das Planungswerkzeug nachgetragen werden. Drei Vergleichsplanungen sind dabei in einfachtiefer Lagerform mit der Einlagerstrategie *zufällige Einlagerung* ausgeführt. Eine vierte Planung umfasst ein doppeltiefes Lager mit der Strategie *zufällige Einlagerung* und *Umlagerung nahe Auslagerung*. Die Planungsvarianten sind jeweils nach der Richtlinie FEM 9.851 [FEM9.851] ausgelegt. Um der Auslegung nach der Richtlinie am ehesten zu entsprechen, wird die Berechnung für unabhängige Spiele durchgeführt. Die prozentualen Unterschiede der Spielzeiten sind in Abbildung 6-11 dargestellt.



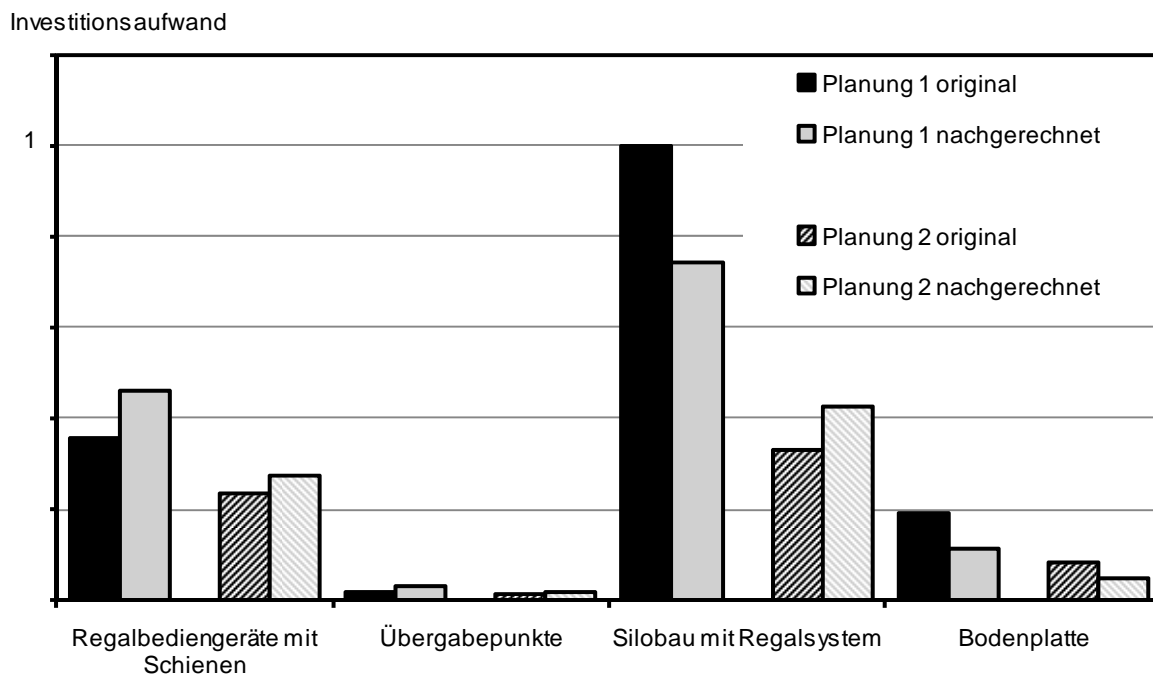
**Abbildung 6-11:** Prozentualer Unterschied der nachgerechneten zur original berechneten Umschlagsleistung

Die nachgerechneten Umschlagsleistungen befinden sich im Bereich von ca. -5% bis +5% zu den Ausgangsdaten. Der Vergleich auf der Ebene der Spielzeitkomponenten

ermöglicht die Identifikation der für die Abweichung verantwortlichen Faktoren. Die Unterschiede in den beiden Berechnungsmodellen wirken sich auf die Länge der Ein- und Querfahrzeit aus. Im doppeltiefen Lager setzt die FEM-Richtlinie eine Umlagerwahrscheinlichkeit von 50% voraus (wie bei einem Lagerfüllgrad von 100% zu erwarten) und überschätzt dadurch den Zeitaufwand für die Umlagerung leicht. Es zeigt sich auch, dass die Rechenwege der unterschiedlichen Planer voneinander abweichen und nicht immer exakt den Berechnungsrichtlinien entsprechen. Das Planungswerkzeug ermöglicht hier eine einheitliche und umfassende Leistungsbewertung, welche eine Vielzahl an Lagerkonfigurationen und Lagerstrategien berücksichtigt. Die Genauigkeit der Ergebnisse, die erzielt wird, ist vor allem bei Planungen im Grenzbereich wichtig.

### **6.5.3 Berechnung der Kosten**

Eine genaue Kostenberechnung ist schwierig. Die Kostensätze, die dem Werkzeug hinterlegt sind, leiten sich aus Erfahrungswerten aus der Vergangenheit ab. Sie repräsentieren den Wert einer Lagerkomponente. Bei realen Planungen beeinflussen die Marktgesetze die Preisgestaltung. Neben den effektiven Kosten spielt der Wettbewerb, die Auftragslage und die strategische Bedeutung eine große Rolle. Für den Kostenvergleich werden zwei geeignete Planungen herangezogen. Die Unterschiede, die zu den berechneten Kostenwerten auftreten, sind größer als beim Nachrechnen der Umschlagsleistung (vgl. Abbildung 6-12). Bei den beiden betrachteten Planungen sind relativ große Unterschiede bei der Schätzung des Investitionsaufwandes für die Bodenplatte und das Lagergebäude vorhanden. Diese Unterschiede können auf spezielle Gegebenheiten bei den beiden Planungen zurückgeführt werden.



**Abbildung 6-12:** Vergleich des nachgerechneten und des originalen Investitionsaufwands

Die Genauigkeit der Kostenschätzungen für den Gesamtinvestitionsaufwand der beiden Planungsvarianten liegt im Bereich zwischen -15% bis +15%. Eine statistische Absicherung der Genauigkeit ist aufgrund der geringen Menge an Vergleichsdaten nicht möglich. Die Experten der Projektpartner schätzen diesen Genauigkeitsbereich als realistisch ein. Er ist für eine Schätzung ausreichend und ermöglicht den Systemvergleich zwischen Planungsvarianten. Für die sinnvolle Optimierung ist vor allem eine differenzierte Abstufung der Kostensätze ausschlaggebend. Ein feineres Raster an Datensätzen erhöht die Genauigkeit. Bei einigen Lagerkomponenten, wie beispielsweise dem Stellplatz, können feinere Abstufungen über eine Interpolation der bestehenden Datensätze erzeugt werden. Die Interpolation kann in diesem Fall über die Merkmale Traglast oder die maximale Bauhöhe erfolgen.

## 6.6 Bewertung der Optimierungsfunktionen

Neben dem Abgleich von realen Planungsvarianten mit nachgerechneten Varianten werden die Funktionalitäten des Planungswerkzeugs zum Erarbeiten von alternativen Lösungen überprüft. Dazu werden die Optimierungsfunktion und die Sensitivitätsana-



lyse eingesetzt. Mit der Optimierung einer Ausgangsvariante können erste Einsparungen durch eine veränderte Dimensionierung identifiziert werden. Mit diesem Schritt ist es möglich zu erkennen, ob die Planung stellplatzkritisch oder leistungskritisch ist. Trifft der erste Fall zu, werden in einem zweiten Schritt Alternativen untersucht, die mittels der doppeltiefen Lagerung einen verbesserten Raumnutzungsgrad erzielen und dadurch oft kostengünstiger sind. Im zweiten Fall werden alternative Lagerstrategien und Lagerkonfigurationen, welche RBG mit mehreren LAM verwenden, untersucht. Im AKL Bereich kann es sein, dass die beiden Anforderungen ausgeglichen sind. Dadurch kann eine Lagerkonfiguration mit doppelbreitem LAM sinnvoll sein. Diese Variante hat einen etwas schlechteren Raumnutzungsgrad als die reine doppeltiefe Lagerung, ermöglicht aber deutlich mehr Leistung. Mittels der Optimierungsfunktion werden die Varianten ausgelegt und miteinander verglichen.

Bei den untersuchten Planungen werden durch das Neudimensionieren relativ geringe Kosteneinsparungen erzielt. Wesentlich größere Potenziale entstehen bei einigen Planungen durch alternative Lagerkonfigurationen und bei leistungskritischen Planungen mittels günstigerer Lagerstrategien. Die Sensitivitätsanalyse verdeutlicht den Bereich, in welchem die optimale Lösung konstant bleibt und ab welchen Planungsbedingungen Änderungen an den Varianten sinnvoll sind. In einigen Fällen kann schon eine marginale geringere Leistungsanforderung ein deutlich günstigeres Lagersystem ermöglichen. Eine pauschale Aussage über das Einsparpotenzial durch die Optimierungsfunktionen kann wegen der geringen Anzahl an untersuchten Planungen und der großen Unterschiede, die dabei aufgetreten sind, nicht getroffen werden.

## **6.7 Ergebnis**

Die vorgestellten Modelle zur Berechnung der Lagergeometrie, der Stellplatzanzahl, Umschlagsleistung und Kosten, werden in einem datenbankgestütztem Planungswerkzeug mit Demonstrationscharakter zusammengeführt. Dieses stellt eine Oberfläche zur Dateneingabe von Planungsvorgaben und Planungsvarianten bereit. Ausgangsbasis für die Berechnungen ist eine geringe Anzahl an Planungsdaten, die i.d.R. bei jeder Planung bekannt sind. Mittels einer Anbindung an eine Datenbank werden die Daten einzelner Lagerkomponenten ausgelesen und weiterverarbeitet. Die implementierten Modelle ermöglichen die Berechnung einer Planungsvariante für

## Implementierung eines Demonstrators zur integrierten Lagersystemplanung

die Lagerkonfiguration und -strategie sowie die Dimensionierung vorgegeben sind. Mittels einer mathematischen Optimierung kann die Planungsvariante optimal dimensioniert werden. Die Sensitivitätsanalyse erlaubt es, die Auswirkungen von Parameteränderungen der Planungsvorgaben auf die optimale Lösung zu betrachten. Die Ergebnisse der Berechnungen werden in Grafiken und Tabellen veranschaulicht. Die ersten Versuche, die mit dem Planungswerkzeug durchgeführt werden, verdeutlichen die einfache und sinnvolle Anwendung. Die Validierung der Berechnungsmodelle und Optimierungsfunktionen verläuft positiv.

## 7 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Abschließend werden die erarbeiteten Ergebnisse, die im Rahmen des Forschungsprojekts entstanden sind, zusammengefasst. Des Weiteren wird deren Nutzen im industriellen Kontext dargelegt sowie ein Ausblick auf weitere Forschungspotenziale gegeben.

### 7.1 Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt „*Integrierte Lagersystemplanung*“ befasst sich mit der Entwicklung einer Planungsmethode für automatische Lagersysteme mit schienengeführten Regalbediengeräten. Die Planung von Hochregallagern und Automatischen Kleinteilelagern unterteilt sich in die Definition der Planungsvorgaben und der Ausarbeitung von Planungsvarianten. Die Planungsvorgaben geben die Anforderungen an das Lagersystem wieder und fixieren alle planungsrelevanten Rahmenbedingungen. Zu jeder Planung gibt es im Normalfall mehrere Planungsvarianten, welche den Planungsvorgaben genügen müssen. Die Varianten unterscheiden sich in Lagerkonfiguration, -strategie und Dimensionierung. Die Lagerkonfiguration beschreibt den physischen Aufbau des Lagers und die Lagerstrategie den operativen Ablauf der Arbeitsspiele der Regalbediengeräte. Die Dimensionierung bestimmt die Ausführungsgröße der Planungsvariante.

Die Auslegung der Planungsvarianten erfolgt anhand einer Reihe von Einflussgrößen, die abhängig voneinander sind und sich gegenseitig beeinflussen. Das Hauptkriterium für die Bewertung einer Variante ist der Investitionsaufwand. Weitere Kriterien sind die beanspruchte Grundfläche und Bauhöhe, die realisierbare Stellplatzanzahl und die Umschlagsleistung. Bei der konventionellen Planungsvorgehensweise werden diese Kriterien sequenziell ermittelt und bewertet. Die Auslegung der Planungsvarianten erfolgt dann in iterativen Schritten, in welchen die Varianten angepasst werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts „*Integrierte Lagersystemplanung*“ wird eine neue Planungsvorgehensweise entwickelt, die den Planer in der Ausarbeitung und dem Vergleich von Planungsvarianten für automatische Lagersysteme un-

terstützt. Die Methode ermöglicht es, auch die Einflüsse unterschiedlicher Lagerkonfigurationen und Lagerstrategien auf die Umschlagsleistung zu berechnen und parallel dazu den Investitionsaufwand zur Realisierung der Planungsvariante zu schätzen. Die Berechnungsergebnisse sind die Ausgangsbasis für eine automatische Optimierung. Dabei stellt der Investitionsaufwand die Zielfunktion dar, die ein Minimum annehmen soll. Die maximalen Lagerabmessungen sowie die minimale Stellplatzanzahl und Umschlagsleistung sind die Restriktionen für die Auslegung. In dem Forschungsprojekt werden drei Modelle entwickelt die eine Planungsvariante bezüglich dieser Kenngrößen bewerten.

Die Basis zur Berechnung einer Planungsvariante ist eine Datenbank, welche die Geometrie-, Kosten- und Leistungsdaten der unterschiedlichen Lagerkomponenten eines automatischen Lagersystems beinhaltet. Im ersten Schritt werden jene Lagerkomponenten identifiziert, aus welchen die Planungsvariante aufgebaut werden kann. Mit dem in dem Forschungsprojekt erarbeiteten Datenbestand können die gängigen Typen automatischer Lagersysteme abgedeckt werden. Dazu gehören das Automatische Kleinteilelager, das Tablarlager und das Palettenlager. Die Systemgrenze wird bei der Anbindung der Lagergassen an die Fördertechnik der Lagervorzone gezogen. Über die Geometriedaten der einzelnen Lagerkomponenten werden die Lagerabmessungen und die realisierbare Stellplatzanzahl berechnet. Die Ergebnisse sind die Ausgangsbasis für weitere Berechnungen. Zur Berechnung der Umschlagsleistung werden beispielsweise die exakten Regalwandabmessungen benötigt. Um die Umschlagsleistung zu berechnen werden bestehende Modelle vereinheitlicht, zusammengeführt und um fehlende Aspekte erweitert. Das entwickelte Berechnungsmodell kann wichtige Lagerkonfigurationen abbilden und verschiedenste Lagerstrategien in die Berechnung integrieren. Das Modell basiert auf einer Zusammenstellung von Spielzeitkomponenten, welche die elementaren Zeitbausteine eines Arbeitsspiels darstellen. Die Komponenten werden mittels analytisch-stochastischer und -deterministischer Modelle berechnet. Anschließend werden sie zu Arbeitsspielen zusammengefügt. Der Ablauf dieser Spiele hängt wesentlich von der Lagerkonfiguration und der verwendeten Lagerstrategie ab. Das Berechnungsmodell deckt Lagerkonfigurationen wie das einfach- und doppeltiefe Lager mit ein bis drei Lastaufnahmemitteln, die einfach- oder doppelbreit ausgeführt sind, ab. Es können mehrere Übergabepunkte sowie eine Verschiebung dieser berücksichtigt werden. Die Strategien umfassen unterschiedliche Ein-, Um- und Auslagerstrategien. Eine Fahrwegop-

timierung kann, ebenso wie die Ruhepositionsstrategie und die Sequenzierung der ausgelagerten Ladeeinheiten, eingerechnet werden. Die Kostenberechnung erfolgt anhand von Kostensätzen, die den Lagerkomponenten hinterlegt sind. Die Berechnung umfasst den Investitionsaufwand für das Grundstück, das Gebäude, die technischen Anlagen und den IT-Aufwand. Mittels der Einbeziehung der laufenden Kosten werden die entstehenden Gesamtkosten auf Basis des effektiven Abschreibungs- oder Nutzungszeitraums berechnet.

Die entwickelten Berechnungsmodelle werden in ein rechnergestütztes Planungswerkzeug übertragen. Dieses stellt eine Oberfläche zur Eingabe der Planungsvorgaben und darauf aufbauender Planungsvarianten bereit. Die Planungsvarianten werden verglichen und können optimal dimensioniert werden. Neben der kostengünstigsten Planungsvariante kann auch das Optimum bezogen auf das Verhältnis der Kosten zur Umschlagsleistung und zur Stellplatzanzahl ermittelt werden. Der gesamte Lösungsraum wird in einem Diagramm grafisch veranschaulicht. Dieses stellt sämtliche Lösungen dar, welche den Planungsanforderungen entsprechen. Dadurch werden neben den Optimalstellen auch andere planungsrelevante Parameterkombinationen grafisch veranschaulicht. Unwirtschaftliche Planungsvarianten können damit schnell erkannt und sinnvolle Planungsvarianten näher betrachtet werden. Mittels einer Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen von veränderten Planungsanforderungen auf die optimale Dimensionierung betrachtet. Damit ist es möglich, Kostensprünge zu identifizieren, welche durch leicht veränderte Anforderungen entstehen, und somit die Robustheit einer gefundenen Lösung abzuschätzen. Die Ergebnisse der Berechnungen und Optimierungsfunktionen werden in Grafiken und Tabellen veranschaulicht. Erste Versuche, die mit dem Planungswerkzeug durchgeführt werden, verdeutlichen die einfache und sinnvolle Anwendung. Anhand von bestehenden Planungen und der Begleitung von laufenden Planungen erfolgt die Verifizierung und Validierung der Berechnungsmodelle. Die Genauigkeit des Planungswerkzeugs ist dabei ausreichend.

Durch die rechnergestützte Planung kann der Suchraum nach dem wirtschaftlich optimalen Lagersystem wesentlich erweitert werden. Der Planer profitiert durch die Möglichkeit des einfachen und schnellen Vergleichs unterschiedlichster technischer Lösungen für einen spezifischen Anwendungsfall und die sich daraus ergebende erhöhte Planungssicherheit.

## **7.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten**

Die Realisierung und der Betrieb automatischer Lagersysteme sind äußerst kostenintensiv. Eine Investitionsentscheidung muss daher zweifelsfrei abgesichert sein, da Fehlinvestitionen vor allem für KMU existenzbedrohende Folgen nach sich ziehen können. Auf Grund der hohen Praxisrelevanz dieser Problemstellung wird von Seiten der Wirtschaft ein reges Interesse und eine sehr gute Mitarbeit festgestellt.

Die Planungsvorgehensweise, welche eine Bestimmung der zu erwartenden Umschlagsleistung ohne den Einsatz aufwändiger Materialflusssimulationen ermöglicht, sowie eine integrierte Bewertung der Wirtschaftlichkeit mehrerer Alternativen, die zudem eine Wirtschaftlichkeitsabschätzung bietet, eröffnen große Vorteile sowohl für Planungsunternehmen als auch für Anwender. So kann die für die Planung aufzuwendende Zeit bei gleichzeitig erhöhter Planungssicherheit verkürzt und zudem ein deutlicher Wettbewerbsvorteil durch bessere und transparentere Planungsergebnisse geschaffen werden. Neue Rationalisierungspotenziale werden durch die gemeinsame Betrachtung von Lagerkonfigurationen und -strategien erschlossen und die wirtschaftlich sinnvollste Lösung gefunden.

Die unmittelbare industrielle Anwendung der Forschungsergebnisse ist durch die hohe Praxisrelevanz der Problemstellung und die Beteiligung namhafter Firmen sichergestellt. Durch eine weitgehende Praxisorientierung bei der Durchführung des Forschungsprojekts wird ein Transfer der Ergebnisse schon während der Projektlaufzeit gewährleistet. Die Akzeptanz der erarbeiteten Planungsmethodik von Seiten der Wirtschaft wird durch den projektbegleitenden Ausschuss sicher gestellt. Der entwickelte Demonstrator kann von interessierten kleinen und mittleren Unternehmen wie Planungsbüros und Anwendern genutzt werden. Gleichzeitig ist er Ausgangspunkt für weitere Entwicklungsarbeiten. Durch den Aufbau einer guten Datenbasis, die viele Industrieunternehmen bereits besitzen, kann das Funktionsmuster erweitert werden und zu konkreter Anwendung kommen. Aufbauende Forschungsprojekte können die Methodik erweitern und zusätzliche Lagersysteme wie Kanallager oder manuelle Lager mit einbinden.

### **7.3 Ausblick**

Die ersten Anwendungen des Rechenwerkzeugs, welche im Rahmen der Validierung durchgeführt werden, zeigen das Potenzial auf, welches in der Planungsvorgehensweise steckt. Die schnelle und genaue Berechnung und der erweiterte Suchraum macht die Planungsvorgehensweise für den Einsatz in der Industrie interessant. Neben der Übertragung der wissenschaftlichen Berechnungsmodelle in die Wirtschaft ist der Demonstrator Ausgangspunkt für weitere Entwicklungsarbeiten. Funktionelle Weiterentwicklungen sind durch einen nochmals erweiterten Suchraum zu realisieren. So ist vor allem die Lagerauslegung mit mehreren Lagerbereichen und die Einbindung von weiteren automatischen Lagersystemen, wie dem Kanallager oder eines Multishuttlesystems, sinnvoll.





## Literaturverzeichnis

- [Alt-02] Alt, W.: Nichtlineare Optimierung. Vieweg Studium Aufbaukurs Mathematik, Vieweg, Braunschweig, 2002
- [Boz-05] Bozer, Y. A.; Cho, M.: Throughput performance of automated storage/retrieval systems under stochastic demand. In: IIE Transactions, 37 (2005) 4, S. 367-378
- [Boz-84] Bozer, Y. A.; White, J. A.: Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems. In: IIE Transactions, 16 (1984) 4, S. 329-338
- [Cha-95] Chang, D.-T.; Wen, U.-P.; Lin, J. T.: The impact of acceleration/deceleration on travel-time models for automated storage/retrieval systems. In: IIE Transactions, 27 (1995) 1, S. 108-111
- [Cha-97] Chang, S.-H.; Egbelu, P. J.: Relative pre-positioning of storage/retrieval machines in automated storage/retrieval system to minimize expected system response time. In: IIE Transactions, 29 (1997) 4, S. 313-322
- [Dom-85] Domschke, W.: Logistik: Rundreisen und Touren. München, 1985
- [Dré-06] Dréo, J.: Metaheuristics for hard optimization. Springer, Berlin, 2006
- [Egb-91] Egbelu, P. J.: Framework for dynamic positioning of storage/retrieval machines in an automated storage/retrieval system. In: International Journal of Production Research, 29 (1991) 1, S. 17-37
- [FEM9.831] FEM 9.831:1995: Berechnungsgrundlagen für Regalbediengeräte, Verformungen und Freimaße im Hochregallager. Fédération Européenne de la Manutention
- [FEM9.851] FEM 9.851:2003: Leistungsnachweis für Regalbediengeräte. Fédération Européenne de la Manutention

- [Fml-10a] Mayer, J. R. N.: Kostenkalkulation von Lagervarianten. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München, München, 2010
- [Fml-10b] Radig, M. B.: Simulative Untersuchung der Umschlagleistung eines Hochregallagers mit Vorzone. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München, München, 2010
- [Fml-11] Tauber, F.: Implementierung von Algorithmen in C# zur Optimierung eines Lagermodells. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München, München, 2011
- [Fre-89] Fred Glover: Tabu Search - Part I. In: ORSA Journal on computing, 1 (1989) 3, S. 190-206
- [Fre-90] Fred Glover: Tabu Search - Part II. In: ORSA Journal on computing, 2 (1990) 1, S. 4-32
- [Fri-10] Friedl, B.: Kostenrechnung. Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre, Oldenbourg, München, 2010
- [Frö-80] Fröhlich, G.: Optimierung der Lagerhöhe eines Hochregallagers. In: Fördern und Heben, 30 (1980) 8, S. 670-671
- [Gal-09] Galler Lager- und Regaltechnik GmbH: Lager- und Regaltechnik. 2009
- [Gol-09] Goldberg, D. E.: Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley, Boston, 2009
- [Gra-93] Grafe, W.: Gestaltung und Betrieb von Lagersystemen mit hohen Umschlagleistungen. Dissertation, Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, TU Dortmund, Dortmund, 1993
- [Gro-04] Gronau, N.: Enterprise resource planning und supply chain management. Lehrbücher Wirtschaftsinformatik, Oldenbourg, München, 2004

- [Gud-05] Gudehus, T.: Logistik 2. Logistik, Springer, Berlin, 2005
- [Gud-72a] Gudehus, T.: Analyse des Schnellläufereffektes in Hochregallagern. In: Fördern und Heben, 22 (1972) 2, S. 65-67
- [Gud-72b] Gudehus, T.: Regalförderzeuge für mehrere Ladeeinheiten. In: Fördern und Heben, 22 (1972) 11, S. 607-609
- [Gud-72c] Gudehus, T.: Grundlagen der Spielzeitberechnung für automatische Hochregallager. In: Deutsche Hebe- und Fördertechnik (1972) 18, S. 63-68
- [Gud-73a] Gudehus, T.: Die optimale Höhe von Hochregallagern. In: Deutsche Hebe- und Fördertechnik (1973) 2, S. 68-72
- [Gud-73b] Gudehus, T.: Die Investition pro Palettenplatz. In: Deutsche Hebe- und Fördertechnik (1973) 8, S. 506-509
- [Gud-79a] Gudehus, T.: Transportsysteme für automatische Hochregallager. In: Fördern und Heben, 29 (1979) 9, S. 775-781
- [Gud-79b] Gudehus, T.: Transportsysteme für automatische Hochregallager. In: Fördern und Heben, 7 (1979) 29, S. 629-633
- [Gün-07] Günthner, W. A.; Heptner, K.: Technische Innovationen für die Logistik. Huss, München, 2007
- [Gün-08] Günthner, W. A.; Sanladerer, S.; Kraul, R.: Konfigurationsauswahl für automatische Lagersysteme. Abschlussbericht, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München, München, 2008
- [Gün-10] Günthner, W. A.; Lantschner, D.: Strategische Optimierung von Hochregallagersystemen. Abschlussbericht, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München, München, 2010
- [Hau-76] Hausman, W. H.; Schwarz, L. B.; Graves, S. C.: Optimal Storage assignment in automatic warehousing systems. In: Management Science, 22 (1976) 6, S. 629-638

- [Hur-04] Hur, S.; Lee, Y. H.; Lim, S. Y.; Lee, M. H.: A performance estimation model for AS/RS by M/G/1 queuing system. In: Computers and Industrial Engineering, 46 (2004) 2, S. 233-241
- [Hwa-90] Hwang, H.; Lee, S. B.: Travel-time models considering the operating characteristics of the storage and retrieval machine. In: International Journal of Production Research, 28 (1990) 10, S. 1779
- [Jai-90] Jaikumar, R.; Solomon, M. M.: Dynamic operational policies in an automated warehouse. In: IIE Transactions, 22 (1990) 4, S. 370-376
- [Joh-96] Johnson, M. E.; Brandeau, M. L.: Stochastic Modeling for Automated Material Handling System Design and Control. In: Transportation Science, 30 (1996) 4, S. 330-350
- [Kir-83] Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. D.; Vecchi, M. P.: Optimization by Simulated Annealing. In: Science, 220 (1983) 4598, S. 671-680
- [Kra-11] Kraul, R.: Ersatzmodelle für die Leistungsbewertung von Ersatzmodelle für die Leistungsbewertung von automatischen Lagersystemen. Dissertation, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München, München, 2011
- [Lee-97a] Lee, H. F.: Performance analysis for automated storage and retrieval systems. In: IIE Transactions, 29 (1997) 1, S. 15-28
- [Lee-97b] Lee, H. F.; Schaefer, S. K.: Sequencing methods for automated storage and retrieval systems with dedicated storage. In: Computers & Industrial Engineering, 32 (1997) 2, S. 351-362
- [Lip-03] Lippolt, C. R.: Spielzeiten in Hochregallagern mit doppeltiefer Lagerung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2003
- [Mel-97] Meller, R. D.; Mungwattana, A.: Multi-shuttle automated storage/retrieval systems. In: IIE Transactions, 29 (1997) 10, S. 925-938

- [Mer-73] Mertens, P. H.: Regalförderzeuge. Untersuchung über die Spielzeiten in Hochregallagern. In: *Fördern und Heben*, 23 (1973) 15, S. 816-820
- [NN-09] NN, N.: Hochregallager Anwenderstatistik. In: *Fördern und Heben*, 59 (2009) Lager Marktbild 2009, S. 31-35
- [Roo-09] Roodbergen, K. J.; Vis, I. F. A.: A survey of literature on automated storage and retrieval systems. In: *European Journal of Operational Research*, 194 (2009) 2, S. 343-362
- [Sar-91] Sarker, B. R.; Lal, A. M.; Han, M. H.: Performance evaluation of a double shuttle automated storage and retrieval system. In: *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 2 (1991) 3, S. 207-213
- [Sar-95] Sarker, B. R.; Babu, P. S.: Travel time models in automated storage/retrieval systems: A critical review. In: *International Journal of Production Economics*, 40 (1995) 2-3, S. 173-184
- [Sch-09] Schreier, H.: *Diskrete Optimierung*. Skript, Institut für Numerische Mathematik und Optimierung, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2009
- [Sch-68] Schaab, W.: *Technisch-wirtschaftliche Studie über die optimalen Abmessungen automatischer Hochregallager unter besonderer Berücksichtigung der Regalförderzeuge*. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, TU Berlin, Berlin, 1968
- [Sch-78] Schwarz, L. B.; Graves, S. C.; Hausman, W. H.: Scheduling Policies for Automatic Warehousing Systems: Simulation Results. In: *AIIE Transactions*, 10 (1978) 3, S. 260-270
- [Sch-99a] Scheid, W. M.: *Automatisierte Lagersysteme, Teil 3: Varianten für alle Fälle*. In: *Logistik heute*, 21 (1999) 12, S. 56-59

- [Sch-99b] Scheid, W. M.: Automatisierte Lagersysteme, Teil 1: Es begann mit dem Hochregal. In: Logistik heute, 21 (1999) 10, S. 34-37
- [Sch-99c] Scheid, W. M.: Automatisierte Lagersysteme, Teil 2: Die bessere Raumnutzung. In: Logistik heute, 21 (1999) 11, S. 38-41
- [See-06] Seemüller, S.: Durchsatzberechnung automatischer Kleinteilelager im Umfeld des elektronischen Handels. Dissertation, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München, München, 2006
- [VDI2690-1] VDI 2690-1:1994-11: Material- und Datenfluß im Bereich von automatisierten Hochregallagern - Grundlagen. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik
- [VDI2693-1] VDI 2693-1:1996-01: Investitionsrechnung bei Materialflußplanungen mit Hilfe statischer und dynamischer Rechenverfahren. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik
- [VDI3561] VDI 3561:1973-07: Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik
- [VDI3561-2] VDI 3561-2:2009-02: Spielzeitermittlung von regalgangunabhängigen Regalbediengeräten. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik
- [VDI4480-1] VDI 4480-1:1998-02: Durchsatz von automatischen Lagern mit gasengebundenen Regalbediensystemen. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik
- [WIT-03] WITRON Logistik + Informatik GmbH: A.T.U. (Auto-Teile-Unger) – Distributionszentrum in Weiden/Opf. 2003
- [Zel-03] Zell, A.: Simulation neuronaler Netze. Oldenbourg, München, 2003
- [Zsc-63] Zschau, U.: Technisch-wirtschaftliche Studie über die Anwendbarkeit von Stapelkränen im Lagerbetrieb. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1963

# Abkürzungsverzeichnis

fml	Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
AKL	Automatisches Kleinteilelager
HRL	(Paletten-) Hochregallager
RBG	Regalbediengerät
LAM	Lastaufnahmemittel
ÜP	Übergabepunkt
ÜE	Aufnahmepunkt
ÜA	Abgabepunkt
ÜEA	Übergabepunkt bestehend aus parallel angeordnetem Aufnahme- und Abgabepunkt
etL	einfachtiefes Lager
dtL	doppeltiefes Lager
dbG	(doppeltiefes Lager mit) doppelbreitem Lagergang





# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Gliederung des Forschungsberichts	5
Abbildung 2-1: Auto-Teile-Unger – Distributionszentrum in Weiden mit einem automatischen Palettenhochregallager und Kleinteilelager sowie einem manuell bedienten Hochregal (v.l.n.r.) (Bildquelle [WIT-03])	8
Abbildung 2-2: Schematischer Aufbau eines automatischen Lagersystems, in Anlehnung an [VDI2690-1]	9
Abbildung 2-3: Funktionsprinzip des klassischen Hochregallages in Anlehnung an [Sch-99a, Sch-99b, Sch-99c]	10
Abbildung 2-4: Prinzipskizze der Lagerkonfiguration: einfachtiefes Lager mit einem einfachbreiten Lastaufnahmemittel (Draufsicht)	12
Abbildung 2-5: Lagerkonfigurationen mit ein bis drei Lastaufnahmemitteln (Draufsicht)	13
Abbildung 2-6: Lagerkonfigurationen mit ein bis drei Lastaufnahmemitteln und doppeltiefer Lagerung (Draufsicht)	13
Abbildung 2-7: Lagerkonfigurationen mit und ein bzw. zwei Lastaufnahmemitteln und doppeltiefer Lagerung mit doppelbreiter Gasse (Draufsicht)	14
Abbildung 2-8: Lagerkonfigurationen mit einem Lastaufnahmemittel, einfachtiefer bzw. doppeltiefer Lagerung, einfachtiefer Gasse und kurvengängigem Regalbediengerät (Draufsicht)	14
Abbildung 2-9: Übergabe der Ladeeinheiten an die Fördertechnik der Lagervorzone bei freier Reihenfolgenstrategie	18
Abbildung 2-10: Übergabe der Ladeeinheiten an die Fördertechnik der Lagervorzone bei auftragsbezogener Sequenzierung	19
Abbildung 2-11: Übergabe der Ladeeinheiten an die Fördertechnik der Lagervorzone bei positionsbezogener Sequenzierung	19
Abbildung 2-12: Beispiel der drei verschiedenen Spielarten im einfachtiefen Lager mit zwei Lastaufnahmemitteln	21
Abbildung 2-13: Zustandsänderungen eines Lagerkanals im doppeltiefen Lager bei einem Einlagervorgang	24
Abbildung 2-14: Sechsfachspiel mit drei kombinierten Ein- und Auslagerungen	25
Abbildung 2-15: Einflussgrößen auf die Lagersystemplanung	31
	157

Abbildung 2-16: Teilmodelle zur Bewertung eines automatischen Lagersystems	33
Abbildung 3-1: Ablauf und Einflussparameter auf die Lagergeometrieberechnung (Bildquelle [Gal-09])	36
Abbildung 3-2: Skizze eines Lagerfelds mit drei Ladeeinheiten	38
Abbildung 4-1: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm einer RBG-Komponente	45
Abbildung 4-2: Regalwand mit Synchronfahrgerade und Isochrone	47
Abbildung 4-3: mathematisches Gesamtmodell mit Teilmodellen und Einflussgrößen zur Berechnung der Umschlagsleistung eines automatischen Lagersystems	50
Abbildung 4-4: Skizze einer normierten Regalwand im fahrzeitkritischen Lager entsprechend dem Fahrzeitmodell nach Bozer und White	53
Abbildung 4-5: Ein- und Ausfahrten zwischen dem Übergabepunkt und einem Fach im Regal	54
Abbildung 4-6: Regalwand mit verschobenem Übergabepunkt	57
Abbildung 4-7: Querfahrten zwischen den Lagerfächern im Regal	58
Abbildung 4-8: Skizze der skalierten Regalwand	61
Abbildung 4-9: Umgebungsmodell zur numerischen Approximation der mittleren Fahrzeiten vom nächstgelegenen leeren Lagerfach zum Auslagerfach	64
Abbildung 4-10: Skizze der Anzahl der Lagerfächer zweier gegenüberliegender Regalwände mit den Fachabständen 0-3 zu einem Auslagerfach	66
Abbildung 4-11: Belegungswahrscheinlichkeiten im doppeltiefen Lager bei variablem Lagerfüllgrad	69
Abbildung 4-12: Zustandsänderungen der Lagerkanäle bei einer Doppeleinlagerung und zwei Auslagerungen	74
Abbildung 4-13: Belegungswahrscheinlichkeiten im doppeltiefen Lager mit doppelbreiter Gasse bei variablem Lagerfüllgrad	75
Abbildung 4-14: Skizze Anzahl der Lagerfächer einer Regalwand mit den Fachabständen 0-3 zu einem Auslagerfach	77
Abbildung 4-15: Ein- und Auslagervorgänge im einfachtiefen Lager	83
Abbildung 4-16: Spielablauf im einfachtiefen Lager mit einem LAM nach [FEM9.851]	85
Abbildung 4-17: Skizze Einfachtiefes Lager mit einem LAM und der Strategie zufällige Einlagerung	85
Abbildung 4-18: Skizze für das einfachtiefe Lager mit drei LAM, der Strategie Einlagerung nahe Auslagerung und unterschiedlichen Reihenfolgestrategien	87

---

Abbildung 4-19: Ein- und Auslagervorgänge im doppeltiefen Lager	88
Abbildung 4-20: Skizze für das doppeltiefe Lager mit einem LAM, der Strategie Umlagerung nahe Auslagerung und unterschiedlichen Einlagerstrategien	91
Abbildung 4-21: Ein- und Auslagervorgänge im doppeltiefes Lager mit doppelbreiter Gasse	93
Abbildung 4-22: Skizze für das doppeltiefe Lager mit doppelbreiter Gasse und einem LAM mit der Einlagerstrategie Doppeleinlagerung nahe Auslagerung und der Umlagerstrategie Umlagerung nahe Auslagerung	96
Abbildung 4-23: Skizze der Materialströme und Startpunkte für eine Regalwand mit vier Übergabepunkten	98
Abbildung 4-24: Spielanteile (b) für das Einlagerspiel, das Auslagerspiel und das kombinierte Spiel bei unterschiedlichen Startpunkten; (a)=Übergang zum Spielanteil (a)	100
Abbildung 4-25: Vergleich des simulativ ermittelten Leistungsverlusts mit den analytisch approximierten Werten	106
Abbildung 6-1: Funktionsprinzip des Planungswerkzeugs	119
Abbildung 6-2: Screenshot des implementierten Planungswerkzeugs mit Hauptfenster zur Definition der Planungsvorgaben und Planungsvarianten	120
Abbildung 6-3: Vereinfachte Klassenstruktur des Rechenwerkzeugs	122
Abbildung 6-4: Suchraum der vollfaktoriellen Optimierung	128
Abbildung 6-5: Nassi-Shneiderman-Diagramm der vollfaktoriellen Optimierung	129
Abbildung 6-6: Screenshot der graphischen Visualisierung des Lösungsraums der vollfaktoriellen Optimierung	130
Abbildung 6-7: Suchfläche der teilfaktoriellen Optimierung	131
Abbildung 6-8: Nassi-Shneiderman-Diagramm der teilfaktoriellen Optimierung	132
Abbildung 6-9: Screenshot der graphischen Visualisierung des Lösungsraums der teilfaktoriellen Optimierung	133
Abbildung 6-10: Screenshot der Visualisierung der Sensitivitätsanalyse bei veränderter Leistungsanforderung	136
Abbildung 6-11: Prozentualer Unterschied der nachgerechneten zur original berechneten Umschlagsleistung	138
Abbildung 6-12: Vergleich des nachgerechneten und des originalen Investitionsaufwands	140



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht wichtiger Lagerkonfigurationsparameter und Ausprägungsmöglichkeiten	11
Tabelle 2-2: Übersicht wichtiger gassenübergreifender Lagerstrategien und Ausprägungsmöglichkeiten	15
Tabelle 2-3: Übersicht wichtiger gassenbezogener Lagerstrategien und Ausprägungsmöglichkeiten	16
Tabelle 3-1: Vorgehensweise zur Bestimmung der Lagergeometrie	37
Tabelle 4-1: Abgebildete Lagerkonfigurationen	82
Tabelle 4-2: Abgebildete Lagerstrategien	82
Tabelle 5-1: Übersicht der aufgenommenen Daten zu den Regalbediengeräten	114