FAKULTÄT FÜR !INFORMATIK

Generierung von Ein- und Umlagervorschlägen in Lagern mit einer Last-In First-Out Strategie und kundenspezifischen Auslagerpräferenzen

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

im Rahmen des Studiums

Software Engineering & Internet Computing

ausgeführt von

Ulrike Maria Ritzinger
Matrikelnummer 0125779

an der
Fakultät für Informatik der Technischen Universität Wien

Betreuung:
Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günther Raidl
Mitwirkung: Univ.Ass. Mag. Dipl.-Ing. Matthias Prandtstetter

Wien, 28. 11. 2008

(Unterschrift Verfasserin) (Unterschrift Betreuer)

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen Personen bedanken, die mich in der Zeit des Erarbeitens dieser Diplomarbeit unterstützt haben. Mein herzlicher Dank gilt meinem Betreuer Günther Raidl des Instituts für Algorithmen und Datenstrukturen an der Technischen Universität Wien für die Betreuung meiner Diplomarbeit.

Ganz besonders herzlich möchte ich mich hiermit bei Matthias Prandtstetter bedanken, der mich die gesamte Zeit der Diplomarbeit betreut hat und sehr viel Zeit in das Korrekturlesen meiner Arbeit investiert hat. Ich könnte mir keinen besseren Betreuer für eine Diplomarbeit vorstellen.

Weiters möchte ich mich auch bei den Firmen Dataphone und Hamburger-Spremberg bedanken, durch die das Thema dieser Diplomarbeit entstanden ist und dieses Projekt durch eine gute Zusammenarbeit erfolgreich umgesetzt werden konnte. Speziell möchte ich mich hier noch einmal bei der Firma Dataphone bedanken, die es mir ermöglichte einen Einblick in das Papierlager in Spremberg zu erlangen.

Zuletzt möchte ich mich noch bei all meinen Freunden für die wundervolle Zeit bedanken und vor allem bei meinen Eltern und meinem Bruder, die mich all die Jahre so tatkräftig unterstützt haben.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden unterschiedliche Ansätze zum Generieren von Ein- und Umlagervorschlägen in einem Lager mit einer Last-In First-Out Strategie vorgestellt. Das Ziel besteht darin, den Zeitaufwand der Auslagerungen, in Betracht auf eine gegebene Lagerstrategie, möglichst gering zu halten. Eine einfache und zeitsparende Auslagerung charakterisiert sich dadurch, dass die Verladung der Ware ohne aufwändige Umräumungen vollzogen werden kann. Dies kann erreicht werden, indem die Ware bei der Einlagerung so im Lager platziert wird, dass auf die entsprechenden auszulagernden Waren ein direkter Zugriff gegeben ist. Dafür ist ein System entwickelt worden, das, aufgrund von Informationen über die Waren und den Lagerzustand, eine im Hinblick auf die Auslagerung optimale Einlagerung liefert. Zusätzlich wird die Möglichkeit geboten, durch Umlagerungen des Lagerinhalts, vorhandene Problematiken bezüglich der Auslagerung aufzuheben, sodass wiederum die Auslagerzeiten minimiert werden.

Um dies umzusetzen wurde eine Funktion modelliert, die unter Berücksichtigung der Problematiken hinsichtlich der Auslagerungen, eine Bewertung des Lagerzustands vornimmt, welche bei den Ein- und Umlagerungen minimiert wird. Die Einlagerung selbst wird mittels Greedy Verfahren realisiert, während Umlagervorschläge unter anderem mit Verfahren basierend auf Lokaler Suche (engl. *local search*) und Variabler Nachbarschaftsabstieg (engl. *variable neighborhood descent*) berechnet werden.

Die entwickelten Methoden konnten anhand von Echtweltdaten getestet werden, da der im Zuge der Arbeit entstandene Prototyp inzwischen in einem Lager eines Papierherstellers im Einsatz ist. Es wird gezeigt, dass die Einführung der Einlagerungsstrategie zu einem erheblich besseren Lagerzustand führt, und dadurch die Auslagerung der Ware effizienter und somit kostengünstiger durchführbar ist.

Abstract

In this thesis we present different approaches to generate stocking and relocation recommendations to use in a Last-In First-Out storage. Our goal is to minimize the time required for stock removal using a given stocking strategy. A simple, time efficient stock removal is characterized by the possibility to retrieve goods for shipment without having to perform time consuming restocking operations and can be achieved by stocking the goods in a way that always allows direct access to the wares might be shipped shortly. To achieve this, we developed a system that takes into account information about the current storage situation, incoming goods and future shipments and generates a stocking suggestion that results in a storage structure optimal for stock removal. In addition, we offer the possibility to generate recommendations for restructuring the given storage that, when applied, resolve existing conflicts regarding stock removal which also minimizes shipping time.

The main idea of the implementation is to model a function that evaluates the storage structure taking into account conflicts regarding stock removal. Using our approach, this function is minimized at every stocking and restocking operation. To determine which storage bin should be used for stocking incoming goods, our approach makes use of greedy methods while restocking suggestions are constructed using local search and variable neighborhood descent algorithms.

The methods presented in this thesis are applied in one of the warehouses of a paper manufacturing company. We show that introducing the strategies presented in this work has led to a hugely improved storage structure in said warehouse that allows much quicker shipping times and at the same time a higher average filling level of the storage.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung **iii**

Zusammenfassung **iv**

Abstract **v**

1 Einleitung **1**

2 Problembeschreibung und Anforderungen **6**

2.1 Aufbau des Lagers 6

2.2 Herkömmlicher Ablauf in Spremberg 10

2.3 Anforderungen und Ziele 11

2.4 Daten für die Optimierung 14

2.5 Kundenstrategien 17

2.6 Verwandte Arbeiten 19

3 Modellierung des Problems **20**

3.1 Definitionen 20

3.2 Bewertungen für den Lagerzustand 25

3.2.1 Bewertung eines Lagerplatzes 25

3.2.2 Lager 40

3.3 Zielfunktion 46

4 Einlagerungsstrategie **49**

4.1 Inkrementelle Berechnung des neuen Lagerzustands 50
4.2 Anpassung der Gewichtungsfaktoren 54

5 Umlagerungsstrategie 61

5.1 Einfache Umlagerung 62
5.2 Beste Verbesserung 62
5.3 Umräumen beliebig vieler Rollen 65
5.3.1 Lokale Suche 65
5.3.2 Berechnung der Umräumungen 66
5.3.3 Variable Neighborhood Descent (VND) 70
5.3.4 Randomized VND (RVND) 73

6 Ergebnisse 76

6.1 Einlagerungen 76
6.2 Umlagerungen 78
6.3 Performanz 81
6.4 Einsatz im Lager Hamburger-Spremberg 82

7 Zusammenfassung und Verbesserungsvorschläge 84

Abbildungsverzeichnis

1.1 Foto: Papierlager 3
1.2 Foto: Rollenbahn 4
1.3 Foto: Lesegerät 5

2.1 Lagerlayout 7

3.1 Bewertungsfunktion: Verladedatum 28
3.2 Verladedatum in der Vergangenheit 29
3.3 Verladedatum in der Zukunft 30
3.4 Bewertungsfunktion: Aufträge 31
3.5 Bewertungsfunktion Aufträge: Ausnahmefall 32
3.6 Reihenfolge der Aufträge in einem Streifen 33
3.7 Distanzen zu den Verladetoren 34
3.8 Bewertungsfunktion: Kunde 37
3.9 Bewertungsfunktion: optische Lagerordnung 38
3.10 Bewertungsfunktion: Leere Streifen 1 39
3.11 Bewertungsfunktion: Leere Streifen 2 40
3.12 Bewertungsfunktion: Verteilung der Aufträge 42
3.13 Vergleich: Verteilung der Aufträge 43
3.14 Bewertungsfunktion: Vollständigkeit der Aufträge 44
3.15 Einlagerung mit Kundenstrategie 2 44
3.16 Bewertungsfunktion: Füllgrad 1 45

3.17 Bewertungsfunktion: Füllgrad 2 47

4.1 Inkrementelle Berechnung des Lagerzustands 1 52
4.2 Inkrementelle Berechnung des Lagerzustands 2 53
4.3 Gewichtungen: Kleinware 56
4.4 Gewichtungen: Kundenstrategie 2 57
4.5 Gewichtungen: Füllgrad 59

5.1 Einfache Umlagerung 63
5.2 Beste Verbesserung 64
5.3 Nachbarschaftsstrukturen 67

6.1 Vergleich der Lagerzustände 77
6.2 Einlagerungen bis zu einem Füllgrad von 100% 78
6.3 Umlagerungen anhand des manuell eingelagerten Lagers . . . 79
6.4 Vergleich der Algorithmen 80

Tabellenverzeichnis

3.1 Zielfunktion 48

4.1 Gewichtungen: Kleinware 56
4.2 Gewichtungen: Kundenstrategie 2 58
4.3 Gewichtungen: Füllgrad 60
4.4 Gewichtungen 60

6.1 Performanz 81

Kapitel 1

Einleitung

Für viele Firmen ist das Thema der Lagerhaltung in letzter Zeit immer bedeutender geworden. Es beschäftigen sich immer mehr Betriebe mit diesem Thema, und die Anzahl der Firmen, die sich rein auf Lagerlogistik spezialisiert haben steigt. Das wachsende Interesse an einer guten Lagerhaltung kommt daher, dass die Lagerbestände immer größer werden. Aus diesem Grund muss mehr Platz für die Lagerung geschaffen werden, und daraus ergibt sich, dass mehr Aufwand für die Lagerung entsteht und die Lagerhaltung schwieriger wird. Außerdem ist aus wirtschaftlichen Gründen natürlich jede Firma daran interessiert, die Kosten für die Lagerhaltung möglichst gering zu halten. Ein gutes Beispiel für das Wachsen von Lagern ist durch die neu aufkommende Form des Einkaufens über das Internet entstanden. Durch das steigende Interesse von Kunden daran, Waren und Produkte über das Internet zu bestellen, haben sich viele Plattformen dahingehend ausgerichtet. Ein bekannter Fall aus der Praxis ist hier die Firma Amazon [1]. Dadurch, dass die Nachfrage immer größer wird, muss die Produktpalette erweitert werden. Dies wiederum bedeutet, dass mehr Ware verstaut und gelagert werden muss - der Lagerbestand steigt. Viele Firmen versuchen nun die Lagerhaltung von vornherein auszuschließen, und die produzierte Ware direkt, dass heißt ohne Zwischenlagerung, zur Weiterverarbeitung zu führen, oder die Ware sofort zum Kunden zu liefern. Dies wird zum Beispiel von Firmen praktiziert, die die Ware produzieren und anschließend direkt an die Plattformen, die die Ware vertreiben, liefern. Dadurch wachsen die Lagerbestände bei den Zwischenhändlern, und das Interesse an einer gute Lagerhaltung steigt hier. Zusätzlich zu dieser neuen Situation der Lagerung sind auch bestehende Lager vermehrt an einer Verbesserung der Lagerhaltung interessiert, um den Aufwand und die Kosten für die Lagerung möglichst gering zu halten.

Der Begriff Lagerhaltung [12] bedeutet, dass sich im Verlauf der Produktion und im Vertriebsprozess Bestände bilden, die aufbewahrt werden müssen. Für die Lagerhaltung ist ein Lager erforderlich, dies ist ein bestimmter und vordefinierter Ort oder Raum, in dem die Ware verstaut werden kann. Um eine Lagerhaltung durchzuführen muss man sich eine Lagertechnik zurechtlegen, welche den Vorgang der Lagerung und die innerbetrieblichen Wege umfasst. Lagerung bedeutet die zeitlich begrenzte Aufnahme von Waren in einen definierten Raum. Der Vorgang der Lagerung ist, dass Ware in einen dafür vorgesehenen Raum eingelagert wird, und nach Ablauf einer bestimmten Zeit aus diesem wieder entnommen wird. Für die Lagerung von Ware gibt es verschiedene Lagereinrichtungen und Systeme, wie zum Beispiel regallose Lagerung, Hochregallager, Durchlaufregale und vieles mehr [16]. Zur Bewältigung der Transportwege in einem Lager werden die verschiedensten Transportsysteme angeboten. Es gibt die Unterscheidung zwischen baulich fixen und stetigen Beförderungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel Rollenbahnen, Förderbänder oder Laufbahnen, und beweglichen und unstetigen Transportmöglichkeiten wie Gapelstapler, fahrerlose Transportfahrzeuge oder Steuerkräne. Zusätzlich gehören zur Lagertechnik, je nach Bereich, noch Messvorrichtungen und Wiegeeinrchtungen, informationstechnische Anlagen oder beispielsweise auch Scanner und Barcodeeinrichtungen, und das Entwickeln und Erarbeiten einer entsprechenden Lagerstrategie.

Unter Lagerstrategien versteht man das Festlegen von Prozessabläufen für die Einlagerung und Entnahme der Ware, die sich auf eine bestimmte Ordnung und Reihenfolge beziehen, und auf die Art der Einlagerung in das bestehende Lagersystem. Es gibt hier grundlegende Strategien [18], die in erster Linie die Zugriffsreihenfolge der Ware beschreiben. Beim FIFO Prinzip (First In - First Out) wird die Ware die als erstes eingelagert wurde auch als erstes ausgelagert. Dadurch wird verhindert, dass eine eingelagerte Ware nicht mehr ausgelagert wird. Ein weiteres Prinzip ist das LIFO Prinzip (Last In - First Out), hier wird die zuletzt eingelagerte Ware wieder als erstes entnommen. Der Nachteil dieses Prinzips ist, dass es keine direkten Zugriffsmöglichkeiten mehr auf die zu Beginn eingelagerte Ware gibt. Zu diesen beiden gängigsten Strategien gibt es noch weitere, für spezielle Branchen und Systeme entwickelte Strategien, wie zum Beispiel das FEFO Prinzip (First Expire - First Out) in der Lebensmittelbranche. Zusätzlich zur Auswahl einer Strategie für die Zugriffsreihenfolge der Ware, ist es unumgänglich, die Lagerstrategie auf die gesamte, bestehende Situation auszulegen und zu erweitern. Was bedeutet, dass nach der Auswahl einer Lagereinrichtung, eines passenden Transportsystem und der Entscheidung der Zugriffsreihenfolge, eine Lagerstrategie entwickelt werden muss, die zusätzlich die Abläufe und Vorgehensweise und die Anzahl der Vorrichtungen und Mitarbeiter miteinbezieht.

Abbildung 1.1: Foto des Papierlagers in Spremberg/Deutschland

In dieser Arbeit geht es darum, eine passende Einlagerrungsstrategie für ein gegebenes Lager zu entwickeln. Es handelt sich um das Lager der Papierfabrik Hamburger-Spremberg in Deutschland [4]. In dieser Fabrik werden Papierrollen für die Erzeugung von Wellpappe hergestellt. Die eingesetzte Papiermaschine produziert im optimalen Zustand circa 300.000t Rohpapier im Jahr, dies sind braune und weiße Deckenpapiere die zu 100% aus Altpapier hergestellt werden. Das Gelände der Fabrik umfasst zwei Hallen und einen Platz für den Abtransport der Ware, wobei in einer Halle die Papiermaschine steht und die Produktion der Rollen erfolgt, und in der anderen Halle die produzierte Ware gelagert wird (Abbildung 1.1). Diese beiden Hallen sind durch eine überdachte Rollenbahn miteinander verbunden. In der Produktionshalle werden alle Prozesse von der Stoffaufbereitung bis hin zum Zuschneiden der Rollen auf die bestellten Breiten und das Etikettieren der Rollen durchgeführt. Danach erfolgt der Transport der Ware über die Rollenbahn in das Lager. Dort werden die Rollen durch eine Hebevorrichtung auf Förderbänder gestellt, und sind ab diesem Zeitpunkt fertig für die Einlagerung (siehe Abbildung 1.2). Pro Tag werden circa 400 Rollen produziert, die anschließend eingelagert werden müssen. Der gesamte Teil der Produktion ist bezüglich Aufwand und Verschnitt optimiert worden. Dadurch ergibt sich zum Beispiel, dass am Beginn des Monats alle braunen Papierrollen, die bestellt wurden, produziert werden. Es werden die Walzen der Papiermaschine getauscht, und nur das braune Papier hergestellt. Danach werden die Walzen gesäubert und das restliche Monat wird weißes Papier erzeugt. Diese Aufteilung erfolgt dadurch, dass ein ständiges Wechseln und Reinigen der Walzen zu aufwändig und zu teuer käme. Weiters wurde die Produktion dahingehend umgestellt, dass nicht mehr anhand der einzelnen Aufträge der Kunden produziert wurde, sondern alle Aufträge betrachtet wurden, und die Rollen so produziert werden, dass ein minimaler Verschnitt erzeugt wird.

Abbildung 1.2: Foto der Rollenbahn im Papierlager Hamburger-Spremberg

Aufgrund der Optimierung in der Produktion konnte die Anzahl der produzierten Rollen erhöht werden. Dadurch kam es zu einer Erhöhung des Füllstandes des Lagers. Der steigende Füllstand des Lagers verursachte immer mehr Probleme bei der Lagerung der Rollen. Bei dem Lager in Spremberg handelt es sich um ein regalloses Lager mit einer Zugriffsstrategie nach dem LIFO Prinzip. Die Rollen werden von einem Gabelstapler vom Förderband genommen und in einen Lagerplatz gestellt, wobei die Lagerplätze nur durch Markierungen am Boden festgelegt sind. Die Entscheidung, in welchen Lagerplatz die Rolle eingelagert wird, obliegt dem Staplerfahrer der gerade Dienst hat. Diese Methode brachte mit der Erhöhung des Lagerbestands immer mehr Probleme mit sich. Es war nicht möglich sich einen Überblick über die eingelagerte Ware zu schaffen, da jeder Staplerfahrer nach seinem System die Rollen im Lager abstellte. Weiters kam es häufiger zu Konflikten beim Verladen der Ware, weil Rollen von einer Lieferung im gesamten Lager verstreut waren und erst zusammengesucht werden mussten, oder weil Rollen die ausgelagert werden mussten, durch andere Rollen verstellt worden sind. Aufgrund dieses unorganisierten Einlagerns der Rollen ist der Zeitaufwand der Verladungen der Aufträge gestiegen, was wiederum Probleme beim Abtransport der Rollen bedeutete und dazu führte, dass Rollen von einem Auftrag nicht rechtzeitig verladen werden konnten. Somit konnten oft Bestellungen nicht termingemäß an den Kunden geliefert werden.

Deshalb hat sich die Firma Hamburger-Spremberg dazu entschlossen auch den Teil der Lagerung zu optimieren. Dadurch ist dieses Projekt in Zusammenarbeit mit der Firma Dataphone [2] entstanden. Um eine gute und organisierte Einlagerung zu erlangen wurde ein System für die Verwaltung und Handhabung der Daten entwickelt und realisiert. Das Lager Hamburger-Spremberg ist mit einem Informationssystem mit Scannern ausgestattet worden. Die vorhandenen Daten der Lagerplätze und Rollen, sowie der Aufträge und Kunden wurden in einer Datenbank abgespeichert. Alle Gapelstapler

Abbildung 1.3: Foto eines Lesegeräts in einem Stapler.

wurden mit einem Lesegerät ausgestattet (siehe Abbildung 1.3), und alle Lagerplätze und Rollen mit einem Barcode versehen. Dadurch können Informationen zu den Rollen und Aufträgen abgerufen werden, und jede Bewegung im Lager wird in der Datenbank abgespeichert. Dieser Teil wurde von der Firma Dataphone umgesetzt. Der nächste Schritt um zu einer guten Lagerung zu kommen, ist zusätzlich zu der Installation des Systems eine eigens für dieses Lager passende Lagerstrategie zu entwickeln. Durch die Einführung eine guten Einlagerungsstrategie sollen die Probleme und Konflikte bei der Auslagerung der Rollen minimiert werden. Durch das Abspeichern der Informationen kann bei der Einlagerung einer Rolle das gesamte Lager betrachtet werden, und aufgrund dessen eine Entscheidung für eine gute Einlagerung getroffen werden. Die Vorschläge für die Einlagerung werden dem Staplerfahrer über das installierte Scannersystem mitgeteilt. Das Thema dieser Arbeit ist die Entwicklung und Modellierung einer guten Einlagerungsstrategie für das Lager der Firma Hamburger-Spremberg.

Kapitel 2

Problembeschreibung und Anforderungen

Da sich diese Arbeit im Zuge eines Projekts in Zusammenarbeit mit der Firma Dataphone für die Firma Hamburger-Spremberg ergeben hat, ist das zugrunde liegende Problem stark an die Gegebenheiten und Anforderungen der Firma Hamburger-Spremberg in Deutschland, angepasst. Daher wird zu Beginn ein Überblick über die Gegebenheiten in diesem Lager geschaffen, und anschließend der Arbeitsablauf, wie er am Anfang stattgefunden hat, und die damit einhergehenden Probleme erläutert. Danach werden Anforderungen und Ziele formuliert, die als Motivation für diese Arbeit dienen und schlussendlich wird noch eine Beschreibung jener Teile vorgenommen, die als unveränderlich gelten, und für die Einlagerung relevant sind.

2.1 Aufbau des Lagers

Die Lagerhalle für die Papierrollen befindet sich in unmittelbarer Nähe der Produktionsstätte und hat ein Gesamtfassungsvermögen von ca. 4000 Rollen. Es kann keine genaue Anzahl der Rollen für das Gesamtfassungsvermögen bestimmt werden, da sie je nach Größe und Gewicht der Rollen variiert. Eine schematische Darstellung des Lagerlayouts ist in Abbildung 2.1 gegeben. Das Lager besteht insgesamt aus 183 Lagerplätzen, wobei nur 175 von diese für die Einlagerung von Rollen zur Verfügung stehen. Die restlichen Lagerplätze werden als Abstellplätze für Zwischenlagerungen benötigt. Die Lagerplätze werden auch als *Streifen* bezeichnet. Das kommt daher, dass es sich nicht um baulich getrennte Lagerplätze handelt, sondern die Lagerplätze lediglich durch Streifen am Boden markiert sind. Zusätzlich zu den

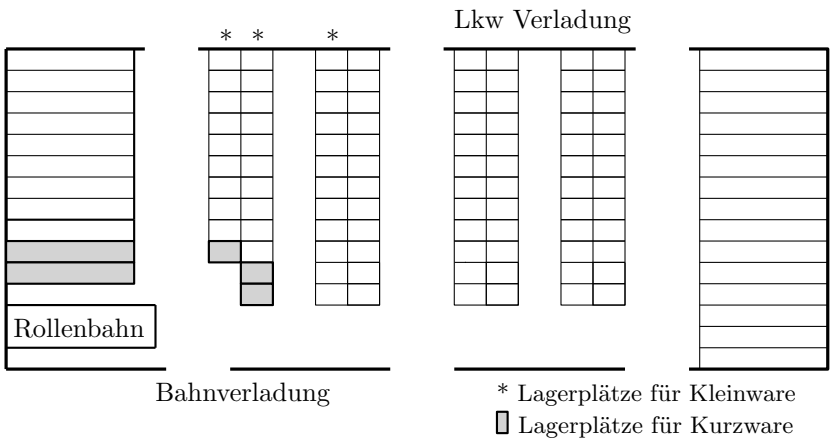


Abbildung 2.1: Lagerlayout

Lagerplätzen gibt es noch eine Rollenbahn im Lager und zwei verschiedene Arten von Verladetore.

Rollenbahn Über diese Rollenbahn gelangen die Rollen von der Produktion ins Lager. Sie besteht aus einer Hebevorrichtung und zwei Förderbänder. Die Rollen werden zuerst mittels der Hebevorrichtung vom Band genommen, und anschließend auf eines der Förderbänder gestellt. Es gibt hier kein System, auf welches Förderband die Rolle gestellt wird. Am Ende des Förderbands werden die Rollen von einem Staplerfahrer abgeholt und eingelagert, oder direkt auf einen Lkw oder einen Bahnwagon verladen.

Verladetore Es gibt zwei Möglichkeiten, die Rollen für den Transport zum Kunden zu verladen. Sie können je nach Kundenwunsch entweder auf Lkws oder auf Bahnwagons verladen werden. An der einen Seite des Lagers sind Verladetore angebracht, die zu den vorbeiführenden Bahngleisen führen, und auf der gegenüberliegenden Seite befinden sich die Verladetore, an denen Lkws zur Beladung warten.

Gänge und Sackgassen Grundsätzlich werden die Lagerplätze nur von Gängen aus angefahren. Eine Ausnahmesituation stellt ein leeres Lager dar. Hier ist es möglich über die Lagerplätze zu fahren, da diese baulich nicht getrennt sind. Bei den Gängen an den Seiten und in der Mitte handelt es sich um Durchgänge. Das bedeutet, dass aus diesen Gängen ein direktes Erreichen beider Verladetore möglich ist. Weiters gibt es im Lager noch zwei Gänge die Sackgassen sind. Die Ein- und Auslagerung in Streifen, die sich in diesen Sackgassen befinden, benötigt mehr Zeit, da in diesen Gängen

gewendet werden muss. Außerdem dauert eine Verladung der Rollen auf Lkws aus diesen Streifen länger, da man nicht direkt zu den entsprechenden Verladetoren gelangt.

Streifen Bei einem Streifen handelt es sich um einen Lagerplatz, der nach dem Last-In First-Out Prinzip aufgebaut ist. Dadurch hat man immer nur auf die zuletzt eingelagerte Rolle in einem Streifen direkten Zugriff. Bei der Einlagerung werden die Rollen der Reihe nach in einen Streifen abgestellt. Die erste Rolle, die in einem Streifen eingelagert wird, stellt man möglichst weit hinten ab. Die nachfolgenden Rollen werden, sofern dies möglich ist, auf diese Rolle gestapelt. Ein neuer Stapel wird erst begonnen, wenn nach oben hin kein Platz mehr ist, oder wenn es nicht möglich ist, die Rolle auf die bereits eingelagerte Rolle zu stellen. Das kann zum Beispiel vorkommen, wenn die eingelagerte Rolle einen viel kleineren Durchmesser besitzt, als die einzulagernde Rolle. In diesen Fällen muss ein neuer Stapel im Streifen begonnen werden. Daraus ergibt sich, dass es keine genauen Bestimmungen der Positionen der Rollen innerhalb eines Lagerplatzes geben kann. Die Zugriffsreihenfolge und der direkte Zugriff auf die zuletzt eingelagerte Rolle in einem Streifen ist jedoch aufgrund des LIFO Prinzips immer gewährleistet.

Kapazität Die Streifen für die Einlagerung unterscheiden sich in einigen Eigenschaften. Die erste Unterscheidung ist durch die Größe, und somit der Kapazität der Streifen gegeben. Jedem Streifen ist eine Kapazität zugeordnet, die eine obere Schranke für das Fassungsvermögen eines Streifens darstellt und in Tonnen angegeben wird. Das Lager hat, über alle Streifen gerechnet, ein Gesamtfassungsvermögen von 11.150t. Es gibt drei Größen von Lagerplätzen mit Kapazitäten von 150t, 100t oder 50t. Die festgelegten Kapazitäten der Lagerplätze sind als theoretische Maxima anzusehen. Das tatsächliche Fassungsvermögen eines Streifens hängt sehr stark von der Einlagerung der Rollen ab. Nachdem es keine bestimmte Vorgehensweise gibt, wie die Rollen in einem Streifen abgestellt werden müssen, kann es vorkommen, dass der vorhandene Platz in einem Streifen nicht optimal genutzt wird und es zu einem Verlust von Kapazität kommt. Es ist somit an dieser Stelle zu beachten, dass ein Streifen früher voll sein kann, als vom System erwartet und dadurch die Einlagerung einer Rolle nicht mehr möglich ist, obwohl theoretisch noch genügend Kapazität im Streifen verfügbar sein müsste.

Distanz zur Rollenbahn Weitere Eigenschaften der Lagerplätze ergeben sich durch ihre Platzierung im Lager. Je nachdem wo sich der Streifen befindet, besitzt er unterschiedliche Eigenschaften. Die erste Eigenschaft ergibt sich aufgrund der Distanzen der Lagerplätze zu der

Rollenbahn. Durch diese kann eine Gruppe von Lagerplätzen festgelegt werden, welche sich in der Nähe der Rollenbahn befinden. Diese Gruppe ist in Abbildung 2.1 hellgrau markiert. Eine Einlagerung der Rollen in diese Lagerplätze bringt den Vorteil mit sich, dass sie wenig Zeit beansprucht. Dadurch eignen sich diese Streifen für die Einlagerung von Rollen mit einer kurzen Lagerdauer. Dabei handelt es sich um Rollen, die innerhalb der nächsten Tage wieder ausgelagert werden. Man möchte den Aufwand für die Einlagerung solcher Rollen möglichst gering halten.

Distanz zum Verladetor Die nächste Unterscheidung ist durch die Distanz der Streifen zu den Verladetoren gegeben. Es gibt zwei Möglichkeiten eine Rolle zu verladen. Eine Rolle wird entweder auf einen Lkw oder in einen Bahnwagon verladen. Auf der einen Seite des Lagers befinden sich die Verladetore zum Platz für die Lkw Abholung, auf der anderen Seite sind die Verladetore zu den Gleisen für die Bahnverladung. Daraus ergibt sich, dass die Streifen, die sich in der Nähe der Verladetore für die Lkw Abholung befinden, für die Einlagerung von Rollen mit Lkw Verladung bevorzugt werden sollen. Das Gleiche gilt für Lagerplätze, die sich in der Nähe der Verladetore zu den Bahnwagons befinden, und Rollen, die mit der Bahn abtransportiert werden.

Die Distanz eines Streifens zum Verladetor wird aus dem Weg berechnet, den der Staplerfahrer vom Streifen zum jeweiligen Verladetor zurücklegen muss. Dies ist vor allem bei den Streifen in den Sackgassen zu beachten, da sich diese Lagerplätze zwar direkt neben den Verladetoren der Lkw Abholung befinden, jedoch der wirkliche Weg zum Verladetor für den Staplerfahrer die längste Strecke ist. Somit sind jene Streifen in den Sackgassen nicht gut für die Einlagerung von Rollen mit Lkw Abholung geeignet. Diese Gegebenheit ist in Abbildung 2.1 gut ersichtlich. Jedem Lagerplatz ist ein Wert zugeordnet, der aufgrund seiner Distanz zum Verladetor angibt, wie gut er für die Einlagerung von Rollen mit Lkw Abholung geeignet ist, und wie geeignet er für die Einlagerung von Rollen ist, die mit der Bahn abtransportiert werden. Wichtig ist hier, dass für jeden Streifen beide Eigenschaften angegeben werden, da eine Umkehrung des einen Wert nicht automatisch dem anderen Wert entspricht. Es gibt zum Beispiel Streifen im Lager, die für beide Verladearten gleich gut sind. Andererseits gibt es Streifen, die für beide Verladearten nicht so gut geeignet sind, wie zum Beispiel die hintersten Lagerplätze in den Sackgassen.

Kleinware Als Kleinware werden jene Rollen bezeichnet, welche in der Breite kleiner als 1250 mm sind. Solche Rollen sollen nur in dafür vorgesehene Streifen (siehe Abbildung 2.1) abgestellt werden. Das geordnete Abstellen

von Kleinware ergibt sich dadurch, dass der Staplerfahrer bei der Verladung von Kleinware eine Vorrichtung verwendet, um mehrere Rollen gleichzeitig abtransportieren zu können, womit die Zeit für die Verladung von Rollen verringert werden kann.

2.2 Herkömmlicher Ablauf in Spremberg

In der Produktionshalle der Firma Hamburger-Spremberg werden täglich circa 400 Rollen hergestellt, welche direkt, ohne Zwischenlagerung, über eine Rollenbahn in das Lager befördert werden. Der Ablauf der Produktion erfolgt so, dass alle eingehenden Bestellungen betrachtet werden, und aufgrund deren ein möglichst guter Produktionsplan entwickelt wird. Das Ziel hierbei ist, den Verschnitt und den Arbeitsaufwand zu minimieren. Dadurch ergibt sich aber, dass in der Regel nicht alle Rollen von einem Auftrag zugleich produziert werden, sondern sich dies über einen längeren Zeitraum erstrecken kann. Somit gelangen die Rollen nicht nach Aufträgen oder Kunden geordnet ins Lager.

Im Lager werden die Rollen mit einer Hebevorrichtung automatisch von der Bahn genommen und auf eines von zwei Förderbändern gestellt. Die Förderbänder im Lager dienen zum Transport der Rollen von der Rollenbahn bis zu der Stelle im Lager, an der die Staplerfahrer die Rollen zur Verladung oder Einlagerung abholen. Die Wahl, welches der beiden Förderbänder zum Transport der nächsten Rolle verwendet wird, erfolgt zufällig. Am Ende des Förderbands kommt die Rolle zum Stehen und verbleibt dort, bis sie von einem Staplerfahrer abgeholt wird. Der Arbeiter kann nur auf die vorderste Rolle am Förderband zugreifen, jedoch obliegt es seiner Entscheidung, von welchem Band er die nächste Rolle nimmt.

Wird gerade jener Auftrag, dem die nächste Rolle am Förderband zugeordnet ist, auf einen Lkw oder Bahnwagon verladen, so besteht die Möglichkeit, die entsprechende Rolle direkt vom Förderband aus zu verladen. Andernfalls muss die Rolle im Lager zwischengelagert werden, bis diese vom Kunden abgeholt wird. Die einzelnen, dafür zur Verfügung stehenden Lagerplätze sind durch Markierungen am Boden abgegrenzt. Weitere bauliche Trennungen gibt es nicht. Für die Ein- und Auslagerungen gibt es insgesamt drei Gabelstapler im Lager. Ein Fahrzeug wird ausschließlich für die Einlagerung der Rollen verwendet, und die anderen beiden werden für die Verladetätigkeiten der Rollen eingesetzt. Im Falle, dass keine Verladungen getätigt werden müssen, können diese beiden Gabelstapler Umlagerungen im Lager durchführen.

Die Einlagerung einer Rolle erfolgt so, dass der zuständige Staplerfahrer die vorderste Rolle von einem Förderband nimmt, und diese in einen Lager-

platz abstellt. Die Entscheidung in welchen Lagerplatz die Rolle eingelagert wird, obliegt dabei dem diensthabenden Staplerfahrer. Es ist dadurch kaum möglich, sich einen Überblick über die eingelagerte Ware zu schaffen, da jeder Mitarbeiter nach seinem eigenen System die Rollen im Lager abstellt. So erfolgt teilweise eine Einlagerung nach Kunden geordnet, teilweise nach Artikeln geordnet, oder aber auch nach einem ganz eigenen Vorgehen. Nachdem es nach der Optimierung des Verschnitts und des Arbeitsaufwands in der Produktion zu einer Erhöhung des Lagerzustands gekommen ist, brachte diese unorganisierte Methode immer mehr Probleme mit sich. Beispielsweise kam es bei der Verladung der Aufträge häufiger zu Konflikten, da die Rollen eines Auftrags im gesamten Lager verstreut eingelagert worden sind. Oder es kam dazu, dass jene Rollen, die ausgelagert werden mussten, durch andere Rollen verstellt worden sind. Dadurch musste man zuerst jene Rollen, die den auszulagernden Auftrag verstellten, umlagern, um zu den gewünschten Rollen zu gelangen und somit stieg der Zeitaufwand für die Verladungen enorm. Dies führte zu längeren Arbeitszeiten der Mitarbeiten, bis hin zum Verschieben von Lieferterminen. Aufgrund dieser auftretenden Probleme entschloss sich die Firma Hamburger-Spremberg zusätzlich zur Verschnitt- und Arbeitsaufwandsoptimierung auch die Lagerhaltung und den Einlagerungsprozess zu optimieren.

2.3 Anforderungen und Ziele

Aufgrund der immer häufiger auftretenden Probleme bei der Ein- und Auslagerungen der Rollen im Papierlager Hamburger-Spremberg galt es ein entsprechendes Lagersystem und eine Strategie für die Einlagerung zu entwickeln.

Die erste Anforderung war die Entwicklung eines Informationssystems für die Gegebenheiten im Papierlager. Diese Aufgabe wurden von der Firma Dataphone übernommen und bereits eingeführt. Es wurde hierfür ein Informationssystem mit Scannvorrichtungen entworfen. Durch die Einführung dieser Systeme ist es möglich, alle vorhandenen Informationen und Daten der Rollen und Aufträge, aber auch der einzelnen Lagerplätze, abzuspeichern. Zusätzlich können alle Bewegungen der Rollen protokolliert und abgespeichert werden. Für das Abspeichern der gesamten Daten der Rollen, der Lagerplätze und der Bewegungen im Lager wurde eine Datenbank installiert, die all diese Informationen verwaltet. Für die Ermittlung der Bewegungen im Lager (Einlagerungen, Verladungen und Umlagerungen) wurde ein umfassendes Scannersystem entworfen. Im ersten Schritt der Umsetzung wurden alle Lagerplätze im Lager mit einem Barcode versehen. Zusätzlich wird jede produzierte Rolle ebenfalls mit einem Barcode ausgestattet. Im nächsten Schritt wurde an jedem Gabelstapler eine mobiles Lesegerät mit Display

angebracht. Der Ablauf erfolgt nun so, dass der Barcode der zu transportierenden Rolle und der Code des Platzes von dem die Rolle genommen wird (entsprechender Lagerplatz oder Förderband) eingelesen wird. Nach dem Transport der Rolle wird noch der Barcode des Ziels (entsprechender Lagerplatz oder Verladung) eingelesen. Dadurch kann der gesamte Verlauf einer Rolle protokolliert werden.

Da dieser erste Teil der Umgestaltung der Lagerorganisation schon abgeschlossen wurde, ist es bereits möglich, sämtliche Informationen betreffend der Rollen und ihren Bewegungen im Lager, abzurufen. Der zweite Teil der Anforderungen ist die Entwicklung eines optimierten Einlagerungsprozesses. Hierfür wird eine für das Papierlager in Spremberg angepasste Einlagerungsstrategie modelliert. Aus dieser Einlagerungsstrategie soll in späterer Folge auch eine Strategie für das Umlagern von Rollen entworfen werden. Die genaueren Anforderungen an diese Strategien werden im Folgenden erläutert.

Einlagerungen Es wird eine Einlagerungsstrategie gesucht, die mehrere, sich gegenseitig beeinflussende Kriterien möglichst gut erfüllt. Die Einlagerungsstrategie soll, aufgrund des Lagerzustands zum Zeitpunkt der Einlagerung, ermitteln, in welchen der Lagerplätze die Rolle am besten abgestellt werden soll. Der Lagerplatz sollte so gewählt werden, dass der Zeitaufwand beim Verladen der Ware möglichst gering ist. Dies entspricht im Prinzip einer Optimierung dahingehend, dass die Anzahl der Umlagerungen beim Verladen eines Auftrags, minimiert wird. Es ist hier anzumerken, dass die Strategie für die Einlagerung nicht davon ausgehen darf, dass zu einem späteren Zeitpunkt eine Umlagerung der Rollen getätigt wird.

Bei jeder Einlagerung nimmt der zuständige Staplerfahrer die vorderste Rolle eines Förderbands und scannt diese. Der Arbeiter erhält sofort die Information, ob diese Rolle direkt zum Verladen ist, oder eingelagert werden muss. Bei der direkten Verladung wird dem Fahrer angezeigt, ob die Rolle in einen Lkw oder einen Bahnwagon verladen werden muss. Handelt es sich um eine Rolle, die zur Einlagerung vorgesehen ist, so soll dem Staplerfahrer ein Vorschlag für die Einlagerung gegeben werden. Es werden die drei besten, nach Qualität der Einlagerung gereihten, Vorschläge für die entsprechende Rolle berechnet, und dem Mitarbeiter am Display des Scanngeräts angezeigt. Die endgültige Entscheidung, in welche Lagerplätze die Rollen eingelagert werden, trifft der für die Einlagerung zuständige Staplerfahrer. Vorzugsweise wird eine Rolle in den erst gereihten Lagerplatz eingelagert werden, jedoch kommt es in der Praxis immer wieder zu nicht vorhergesehenen Situationen, deren Informationen zum Zeitpunkt der Berechnungen für die Einlagerung noch nicht in der Datenbank abgespeichert worden sind. So kann es vorkommen, dass ein, für die Einlagerung vorgeschlagener, Lagerplatz defekt, voll oder durch andere, schlecht eingelagerte Rollen, verstellt

ist. Beim Abstellen einer Rolle wird der entsprechende Lagerplatz gescannt und ein passender Eintrag in der Datenbank erstellt. Weiters soll das System das übliche Kundenverhalten, das vom Lagerleiter über den Verlauf beobachtet worden ist, integrieren. Ebenfalls sollte die Kapazität der Lagerplätze möglichst gut genutzt werden, damit es nicht zur Verringerung des Fassungsvermögens des Lagers kommt. Daraus ergibt sich die Anforderung, dass das Abstellen einer Rolle in einen leeren Streifen sorgfältig geplant werden sollte. Um die Verladung eines Auftrags einfacher zu gestalten, möchte man, dass die Rollen, die einem Auftrag zugehörig sind, nahe beieinander eingelagert werden. Am besten wäre, wenn sich alle Rollen von einem Auftrag in einem Streifen befinden. Weiters ist noch zu beachten, dass die Rollen im Hinblick auf das Verladedatum keine Konflikte verursachen. Das heißt, dass die Rollen die zeitlich nach anderen Rollen abtransportiert werden sollen, nicht vor diese gestellt werden, um eine Umlagerung beim Verladen zu vermeiden. Aufgrund der angeführten Bedingungen soll nun eine geeignete Einlagerungsstrategie entworfen werden.

Umlagerungen Neben jenem Gabelstapler, der für die Einlagerung verwendet wird, gibt es noch zwei zusätzliche Stapler im Lager, die primär für die Verladung der Rollen eingesetzt werden. Sollten gerade keine Verladungen getätigt werden, können diese beiden Fahrzeuge für das Umlagern von Rollen eingesetzt werden. Unter einer Umlagerung versteht man das Auslagern und sofortige Wiedereinlagern einer Rolle. Die Anforderungen an eine Umlagerung einer Rolle ist, dass dadurch Konflikte, die bei der Einlagerung entstanden sind (zum Beispiel durch den Anstieg der Füllstands), gelöst werden. Durch das Verringern der Konflikte im Lager kommt es zu einer Verbesserung des Lagerzustands.

Bei den Umlagerungen soll ermittelt werden, von welchem Lagerplatz eine Rolle herausgenommen und in welchem Lagerplatz sie neu eingelagert werden soll. Es sind mehrere Möglichkeiten für eine Umlagerung gefordert. Die erste Form der Umlagerung soll ermitteln, welche Rolle im Lager umgelagert werden muss, um möglichst viele Konflikte im Lager zu beseitigen. Klarerweise kommen für diese Art der Umlagerung nur jene Rollen in Frage, auf die direkt zugegriffen werden kann, ohne dass weitere Rollen umgelagert werden müssen. Dem Staplerfahrer wird am Display seines Lesegeräts angezeigt, von welchen Lagerplatz eine Rolle zu entfernen ist, und in welchen sie neu eingelagert werden soll, um diese Verbesserung zu erreichen.

Die nächste Art der Umlagerung ergibt sich, wenn eine Rolle in einem Streifen eine andere Rolle, die ausgelagert werden muss, blockiert. Man will erreichen, dass diese Rolle im Zuge der nötigen Umlagerung gut umgestellt wird, und nicht das Risiko eingehen, die Rolle beliebig abzustellen und dadurch einen weiteren Konflikt zu verursachen. Hierfür kann der Staplerfahrer dem

System den entsprechenden Lagerplatz, in dem sich die umzulagernde Rolle befindet, übergeben, und erhält drei Vorschläge für eine erneute Einlagerung der Rolle.

Mit der letzten Variante einer Umlagerung soll ermöglicht werden, dass der Lagerleiter oder der zuständige Staplerfahrer angeben kann, für wie viele Rollen Umlagerungen durchgeführt werden sollen. Die gewünschte Anzahl hängt von der vorhandenen Zeit des Staplerfahrers ab. Eine Umlagerung von einer Rolle wird durchschnittlich drei Minuten dauern. Aufgrund dessen kann sich der Lagerarbeiter ausrechnen, für wie viele Umlagerungen er Zeit haben wird. Damit soll vermieden werden, dass Umlagerungen berechnet werden die viele Konflikte auflösen, der Lagerarbeiter jedoch nicht genügend Zeit hat, diese durchzuführen. Die ermittelten Verschiebungen werden dem Staplerfahrer am Lesegerät angezeigt. Es handelt sich um eine Liste von Bewegungen die durchzuführen sind, um den besseren Lagerzustand zu erreichen.

2.4 Daten für die Optimierung

Für die Berechnung der Ein- und Umlagerungen liegen eine Menge von Daten vor, die berücksichtigt werden müssen. Dabei gilt es, zu beachten, dass diese Werte mit Ungenauigkeiten behaftet sind, und teils auf unvollständige Informationen zurückzuführen sind teils aber auch durch Probleme in der Produktion oder beim Abtransport verursacht werden.

Im Lagerverwaltungssystem werden alle eingehenden Bestellungen in einer Datenbank abgespeichert. Zu jeder Bestellung gibt es einen Kunden, der die Bestellung in Auftrag gegeben hat. Eine Bestellung kann aus einem oder mehreren Aufträgen bestehen. Ein Auftrag kann wiederum aus einer oder mehreren Lieferpositionen bestehen. Eine Lieferposition stellt eine Gruppe von Rollen dar. Das bedeutet, wenn ein Auftrag verschiedene Rollentypen oder Formate umfasst, oder aber auch zu unterschiedlichen Terminen abgeholt wird, werden die gleichen Rollen innerhalb eines Auftrags, zu einer Lieferposition zusammengefasst. Jede Lieferposition besteht nun aus einer oder mehreren Rollen, und für jede dieser bestellten Rollen sind folgende Daten vorhanden:

Identifizierung Jeder Rolle wird eine eindeutige Nummer zur Identifikation zugeteilt.

Kundennummer Jeder Auftrag wird von einem Kunden bestellt, und jedem Kunden wird eine eindeutige Kundennummer zugewiesen. Für größere Kunden können Kundengruppen angelegt werden. Eine Kun-

dengruppe besteht aus mehreren Kundennummern. Es wird zum Beispiel für eine große Firma eine Kundengruppe angelegt, der mehrere Kundennummern zugeteilt sind. Jeder Abteilung der Firma wird dann eine Kundennummer zugeteilt. Für die Optimierung stellt dies allerdings keine Bedeutung dar und die Kundengruppen werden wie eine "normale" Kundennummer behandelt.

Auftragsnummer Jeder Kunde kann einen oder mehrere Aufträge erteilen. Für jeden dieser Aufträge wird eine eindeutige Auftragsnummer generiert. Es wird für jede Rolle die dazugehörige Auftragsnummer abgespeichert.

Lieferposition Ein Auftrag kann in eine oder mehrere Lieferpositionen aufgeteilt sein. Eine Lieferposition ist eine Gruppierung von Rollen innerhalb eines Auftrags. Die Gruppierung erfolgt nach dem Rollentyp, dem Format oder dem Datum der Verladung.

Voraussichtliches Verladedatum Für jede Rolle ist ein voraussichtliches Verladedatum bekannt, und wird als Liefertermin abgespeichert. Nach der Produktion muss die Rolle bis zu dem Zeitpunkt ihrer Verladung im Lager verwahrt werden. Da es in der Praxis leicht zu Verschiebungen des Abholtermins kommen kann, wird dieses Datum nur als voraussichtliches Verladedatum gehandhabt.

Verladeart Es wird für jede Rolle angegeben, ob sie mit dem Lkw abgeholt oder in Bahnwagons verladen und abtransportiert wird.

Kurz eingelagerte Ware Es gibt Rollen, für die nur eine kurze Lagerdauer vorgesehen ist. Das bedeutet, dass geplant ist, sie innerhalb der nächsten Tage abzutransportieren. Die Lagerdauer kann aus der Differenz des Verladedatums der Rolle und dem aktuellen Datum errechnet werden.

Format Die Abmessungen einer Rolle bestehen aus ihrem Durchmesser und ihrer Länge. Letzteres wird auch als Breite bezeichnet und als Indikator für das Format herangezogen. Das kommt daher, dass die einzelnen Rollen in der Produktion aus einem liegenden Rohling, der Breite nach zugeschnitten werden. Rollen mit einer Breite kleiner gleich 1250 mm werden als Kleinware bezeichnet.

Artikel Mit dem Artikel einer Rolle wird der Typ des verwendeten Papiers bezeichnet. In der Papierfabrik Hamburger-Spremberg werden die unterschiedlichsten Kombinationen von Sorte (weißes oder braunes Papier) und Grammatur (zum Beispiel 80g pro m^2) erzeugt. Jeder einzelnen Kombination wird eine eindeutige Artikelnummer zugewiesen.

Gewicht Zu jeder Rolle wird das entsprechende Gewicht abgespeichert. Dies wird zur Berechnung der Füllstände der Streifen verwendet.

Verladestatus Für jede Rolle wird vermerkt, ob sie bereits verladen wurde. Sobald eine Rolle verladen wurde, muss sie für den weiteren Optimierungsprozess nicht mehr berücksichtigt werden.

Lagerplatz Sobald eine Rolle eingelagert wurde, wird der entsprechende Lagerplatz abgespeichert. Solange die Rolle nur in der Bestellung vorhanden ist, gibt es hierfür noch keinen Eintrag.

Kundenstrategien Jeder Rolle ist eine Kundenstrategie zugeteilt. Diese gibt an, welche Auslagerungspräferenz der entsprechende Kunde der Rolle, und somit des Auftrags, hat. Diese fünf Kundentypen sind nach langzeitiger Beobachtung der Bestellungen und Abholpräferenzen der Kunden vom Lagerleiter eingeführt worden. Die einzelnen Strategien werden in Kapitel 2.5 genauer erklärt.

Aus den vorhandenen Daten werden noch weitere Werte abgeleitet, die für die Optimierung verwendet werden:

Füllgrad Für jeden Lagerplatz kann der aktuelle Füllgrad, durch Summieren der Rollengewichte im Streifen, bestimmt werden. Werden alle Füllgrade der Lagerplätze summiert, so erhält man den gesamten Füllstand des Lagers. Mit Hilfe der Kapazität und des Füllgrads eines Streifens kann der noch vorhandene freie Platz, der für die Einlagerung weiterer Rollen zur Verfügung steht, ermittelt werden.

Der Füllgrad wird in dieser Arbeit deshalb nicht als Prozentzahl angegeben, da das tatsächliche Fassungsvermögen eines Streifens, von der Einlagerung der Rollen abhängt, und somit stark variiert. Eine Angabe in Prozent würde dadurch immer einen, je nach Einlagerung, anderen Wert bedeuten.

Vollständigkeit eines Auftrags Es wird ermittelt, ob ein Auftrag schon vollständig eingelagert worden ist. Darunter versteht man, dass sich keine Rolle des Auftrags mehr in Produktion befindet und somit noch eingelagert werden muss. Dies kann aufgrund der Auftragsgröße und der Anzahl der Rollen, denen bereits ein Lagerplatz zugewiesen worden ist oder die bereits verladen wurden, ermittelt werden.

Platz im Streifen Es wird ermittelt, wie viele Rollen von einem Auftrag noch eingelagert werden müssen, und wie viel Platz diese Rollen benötigen werden. Der Wert errechnet sich durch das Summieren der Gewichte jener Rollen eines Auftrags, die sich noch nicht im Lager

befinden. Mit der Ermittlung dieses Werts und dem Wissen, wie viel freier Platz in einem Lagerplatz vorhanden ist, kann bestimmt werden, ob die sich noch in Produktion befindlichen Rollen, in einen Streifen eingelagert werden können.

2.5 Kundenstrategien

Durch jahrelange Erfahrung und Beobachtung der Bestellungen von den einzelnen Kunden konnten bestimmte Verhaltensmuster der Kunden ermittelt werden, die eine Aussage darüber liefern, wie die Kunden die bestellte Ware geliefert bekommen möchten. Aufgrund dieser Beobachtungen und Informationen wurden vom derzeitigen Lagerleiter fünf verschiedene Kundentypen definiert. Zu jedem dieser Kundentypen gibt es für die Einlagerung verschiedene Überlegungen, welche als Kundenstrategien bezeichnet werden. Beim Aufnehmen einer Bestellung wird eine entsprechende Kundenstrategie zugewiesen. Die Überlegungen dieser Strategie werden bei der Einlagerung des Auftrags berücksichtigt:

Kundenstrategie 1 Die erste Kundenstrategie besagt, dass für einen Kunden, Rollen mit dem gleichen Artikel und dem gleichen Format zusammengestellt werden sollen. Somit gilt, dass wenn Kunden über mehrere verschiedene Aufträge den gleichen Artikel mit dem gleichen Format bestellen, können die Rollen dieser Aufträge, trotz unterschiedlicher Auftragsnummern, zusammen eingelagert werden. Die anderen Daten der Rollen, wie zum Beispiel das Verladedatum, sind in diesem Fall für die Einlagerung nicht relevant, da sie auch im Hinblick auf die Auslagerung nicht von Bedeutung sind. Das kommt daher, dass die Aufträge von einem Kunden stammen, und bei der Lieferung des Auftrags nur darauf geachtet werden muss, dass die entsprechenden Rollen geliefert werden, unabhängig von der Auftragsnummer. Diese Strategie ist für alle Kunden gültig.

Kundenstrategie 2 Findet diese Strategie Anwendung, werden nur jene Rollen eines Auftrags zusammengestellt, die den gleichen Artikel und das gleiche Format besitzen. Somit soll ein Auftrag, sofern er Rollen mit unterschiedlichen Eigenschaften umfasst, nur dann zusammengestellt werden, wenn es möglich ist, diese nach Eigenschaften sortiert einzulagern. Andernfalls soll der Auftrag nach Rollentypen verteilt eingelagert werden. Diese Überlegung kommt daher, dass es Kunden gibt, die große Bestellungen aufgeben, jedoch die Rollen nach Artikel und Format sortiert geliefert bekommen möchten. Würden Rollen eines solchen Auftrags ohne weitere Rücksicht auf Artikel und Format zusammengestellt werden, käme es bei der Auslage-

rung unweigerlich zu Konflikten. Diese Kundenstrategie ist nicht allgemein anwendbar, sondern wird nur für bestimmte Kunden angewandt.

Kundenstrategie 3 Bedingt durch die effizientere Verladung von Rollen mit einer Breite kleiner gleich 1250 mm, soll versucht werden, Kleinware von den restlichen Rollen zu trennen. Das liegt darin begründet, dass im Zuge der Verladung von Kleinware eigene Vorrichtungen verwendet werden, um mehrere Rollen auf einmal transportieren zu können. Werden also beide Formatbereiche zusammengelagert, ist ein ständiges Wechseln der Vorrichtung notwendig. Diese Strategie wird für Kunden eingesetzt, die Bestellungen aufgeben, welche Kleinware beinhalten. In diesem Fall sollen alle Rollen eines Auftrags mit einem Format kleiner oder gleich 1250 mm und alle Rollen mit einem Format größer 1250 mm zusammengestellt werden. Das dadurch resultierende Aufteilen eines Auftrags ist in einer solchen Situation erwünscht.

Kundenstrategie 4 Mit Hilfe dieser Strategie soll Ordnung in den Streifen für Kleinware geschaffen werden. In einem Streifen für Rollen mit einem Format kleiner oder gleich 1250 mm sollen jene Rollen mit dem gleichen Kunden und dem gleichen Artikel zusammengestellt werden. Dadurch erlangt man eine Ordnung in den Lagerplätzen für Kleinware. Es ist somit bei einer Auslagerung möglich, dass man mit Hilfe der Vorrichtung, mit einer Fuhre mehrere Rollen für einen Kunden gleichzeitig verlädt. Der Zeitaufwand für eine Verladung eines Auftrags kann so verringert werden. Sie ist allgemein für alle Kunden und Aufträge einsetzbar, kommt jedoch vermehrt für solche Kunden zum Einsatz, die Kleinware bestellen.

Kundenstrategie 5 Durch das Anwenden dieser Strategie wird erreicht, dass die Rollen von gleichen Aufträgen zusammengestellt werden. Das bedeutet, dass im optimalen Fall, alle Rollen eines Auftrags in genau einem Streifen eingelagert werden. Weiters ist erwünscht, dass in einem Streifen nur ein Auftrag eingelagert wird, was jedoch nur bis zu einem gewissen Füllgrad des Lagers erfüllt werden kann. Das Zusammenhalten von Rollen eines Auftrags bringt im Hinblick auf die Auslagerung den Vorteil, dass die Rollen nicht erst von verschiedenen Lagerplätzen zusammengesucht werden müssen. Außerdem vermindert man so die Gefahr, dass die Rollen von einem anderen Auftrag verstellt werden. Diese Strategie ist prinzipiell für alle Aufträge gültig. Eine Ausnahme stellen nur jene Aufträge dar, denen Kundenstrategie 2 zugewiesen ist, oder die Kleinware beinhalten.

2.6 Verwandte Arbeiten

Das Interesse in eine gute Lagerhaltung ist in den letzter Zeit immer bedeutender geworden. Deshalb beschäftigen sich vermehrt Firmen mit dem Thema der Lagerlogistik. Ein führendes Unternehmen in Österreich ist beispielsweise *Rail Cargo Austria - Das Unternehmen der ÖBB* [3]. Weiters wird hier die Firma *Dataphone* [2], mit der bei der Entstehung dieser Arbeit zusammengearbeitet wurde.

Eine gute allgemeine Einführung in die Lagerlogistik ist in [6] zu finden. Es wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten Punkte, die mit der Lagerlogistik im Zusammenhang stehen, gegeben. Weiters soll an dieser Stelle die Arbeit [12] angeführt werden. In dieser Arbeit werden grundsätzliche Überlegungen zum Thema Lagerlogistik angeführt und die Grundbegriffe der Lagerlogistik kurz erklärt (unter anderem *Lager*, *Lagerung*, *Lagerprozess*, *Lagerarten*, *Lagersysteme*). In [18] gibt es Erklärungen zur Lagerstrategie, wie zum Beispiel eine Ein- und Auslagerungsstrategie aussehen kann(FIFO, LIFO), welche verschiedenen Lagerplatzstrategien es gibt (feste Lagerplatzordnung, chaotische Lagerung, Zonung), und verschiedene Lagerarten (verschiedenste Regalsysteme).

An dieser Stelle können Arbeiten genannt werden, die sich mit Optimierung in Lager beschäftigen [17, 21], jedoch sind die Optimierungen immer auf spezielle Gegebenheiten ausgelegt, die daher nicht als Grundlage für unsere Arbeit dienen. Weiters kommt dazu, dass auch die Optimierung dieser Arbeit sehr speziell ist, und das zugrunde liegende Problem stark an die Anforderungen und Gegebenheiten des Papierlagers der Firma Hamburger-Spremberg gebunden ist. Dadurch konnten keine Arbeiten gefunden werden, die sich im Vorfeld mit einer derartigen Situation der Optimierung der Einlagerung auseinander gesetzt haben.

Kapitel 3

Modellierung des Problems

In diesem Kapitel wird aufgrund der Situation im Papierlager Hamburger-Spremberg eine Modellierung des Problems vorgenommen und daraus eine Zielfunktion entwickelt, welche den Zustand im Lager wiedergibt. Zur Bewertung des Lagers werden Funktionen definiert, die die Bedingungen an die Einlagerung, die aus dem Kapitel 2.3 hervorgehen, und die Eigenschaften der Lagerplätze und Rollen, die in Kapitel 2.1 und Kapitel 2.4 beschrieben wurden, berücksichtigen. Die einzelnen Bewertungsfunktionen werden anschließend mit Gewichtungsfaktoren versehen, und zu einer Zielfunktion zusammengefasst.

3.1 Definitionen

Gegeben ist das im Kapitel 2.1 beschriebene Lager L für die Einlagerung von Papierrollen. Es besteht aus Lagerplätzen i, mit $1 \leq i \leq n$, die baulich nicht getrennt sind, sondern nur am Boden markierte Streifen darstellen:

$$\mathrm{L} = \{1, \ldots, n\}, \qquad n \in \mathbb{N} \tag{3.1}$$

Weiters ist die Menge R der Papierrollen j, mit $1 \leq j \leq m$, gegeben. Es handelt sich dabei entweder um Rollen, die im Lager L eingelagert sind, die sich noch in Produktion befinden oder die bereits verladen worden sind:

$$\mathrm{R} = \{1, \ldots, m\}, \qquad m \in \mathbb{N} \tag{3.2}$$

Die Menge $\mathrm{RL} \subseteq \mathrm{R}$ enthält jene Papierrollen, die bereits eingelagert worden sind. Diese Rollen befinden sich in einem Streifen i des Lagers L:

$$\mathrm{RL} = \{o_1, \ldots, o_n\}, \qquad o_i \in \mathbb{N},\ \mathrm{RL} \subseteq \mathrm{R} \tag{3.3}$$

Eine weitere Menge $\mathrm{RP} \subseteq \mathrm{R}$ besteht aus den Rollen, die sich noch nicht im Lager L befinden. Sie umfasst all jene Rollen, die als Bestellung von einem Kunden aufgenommen wurden. Diese Rollen befinden sich entweder bereits in Produktion oder sind für diese vorgesehen:

$$\mathrm{RP} = \{p_1, \ldots, p_n\}, \qquad p_i \in \mathbb{N},\ \mathrm{RP} \subseteq \mathrm{R} \tag{3.4}$$

Des Weiteren ist die Menge $\mathrm{RV} \subseteq \mathrm{R}$ gegeben, die alle Rollen enthält, die bereits verladen wurden und somit bei weiteren Einlagerungen nicht mehr berücksichtigt werden müssen:

$$\mathrm{RV} = \{q_1, \ldots, q_n\}, \qquad q_i \in \mathbb{N},\ \mathrm{RV} \subseteq \mathrm{R} \tag{3.5}$$

Da es nicht zulässig ist, dass eine Rolle sich in mehr als einer der Mengen RL, RP und RV befindet, ergeben sich daraus folgende Beziehungen:

$$\mathrm{RL} \cup \mathrm{RP} \cup \mathrm{RV} = \mathrm{R} \tag{3.6}$$

$$\mathrm{RL} \cap \mathrm{RP} = \mathrm{RP} \cap \mathrm{RV} = \mathrm{RL} \cap \mathrm{RV} = \emptyset \tag{3.7}$$

Jeder Lagerplatz i besteht aus einem geordneten Tupel S_i von Rollen sowie einem Füllgrad f_i, der angibt, wie viele Rollen im jeweiligen Streifen i eingelagert sind:

$$\mathrm{S}_i = (s_{i,1}, s_{i,2}, \ldots, s_{i,f_i}) \tag{3.8}$$

Bei einem Streifen handelt es sich um eine nach dem LIFO Prinzip aufgebaute Lagerstruktur, sodass man immer nur auf die zuletzt eingelagerte Rolle s_{i,f_i} direkten Zugriff hat.

Da für jede Rolle j ist ein Gewicht w_j bekannt ist, lässt sich für jeden Streifen i ein Gesamtgewicht berechnen, das der Summe der Gewichte aller im jeweiligen Streifen eingelagerten Rollen entspricht:

$$\mathrm{w}(i) = \mathrm{w}(\mathrm{S}_i) = \sum_{j=1}^{f_i} w_{s_{i,j}} \tag{3.9}$$

Ebenso ist jedem Streifen i eine Kapazität C_i zugeordnet, die angibt wie viele Tonnen Papier maximal in einem Streifen eingelagert werden können.

$$\mathrm{w}(\mathrm{S}_i) = \sum_{j=1}^{f_i} \mathrm{w}_{s_{i,j}} \leq \mathrm{C}_i, \qquad i = 1 \ldots n \tag{3.10}$$

Aus der Kapazität C_i und dem Gesamtgewicht eines Streifens $\mathrm{w}(\mathrm{S}_i)$ lässt sich der noch vorhandene freie Platz F_i in einem Lagerplatz ermitteln:

$$\mathrm{F}_i = \mathrm{C}_i - \mathrm{w}(\mathrm{S}_i), \qquad i = 1 \dots n \tag{3.11}$$

Jede Rolle j wird mit einem voraussichtlichen Verladedatum d_j versehen. Es gibt Rollen für die zum Zeitpunkt der Einlagerung noch nicht bekannt ist, wann sie verladen werden. Für diese Rollen wird angenommen, dass sie erst zu einem Zeitpunkt verladen werden, der weit in der Zukunft liegt. Daher werden diese Rollen mit einem Verladedatum $d_j = \infty$ versehen.

Weiters ist eine Menge von Aufträgen A bekannt, wobei jeder Auftrag a_i, mit $1 \leq i \leq \alpha$, aus einer oder mehreren Rollen besteht, und somit eine Teilmenge von R bildet:

$$\mathrm{A} = \{a_1, \dots, a_\alpha\}, \qquad \alpha \in \mathbb{N} \tag{3.12}$$

$$\mathrm{a}_i \subseteq \mathrm{R}, \qquad \text{für alle } a_i \in \mathrm{A} \tag{3.13}$$

Jede Rolle j ist genau einem Auftrag zugeordnet, wodurch sich eine Partitionierung von R in paarweise disjunkte Mengen ergibt:

$$\mathfrak{A}_j = a_i, \qquad \text{für alle } j \in a_i \tag{3.14}$$

$$a_i \cap a_j = \emptyset, \qquad i \neq j \tag{3.15}$$

$$\bigcup_{i=1}^{\alpha} a_i = \mathrm{R} \tag{3.16}$$

Für jeden Streifen i und jede Menge S_i kann die Menge $\mathrm{a}(i)$ beziehungsweise $\mathrm{a}(\mathrm{S}_i)$ erzeugt werden. Diese Menge beinhaltet alle Aufträge $a_i \in \mathrm{A}$ die sich in einem Streifen i befinden:

$$\mathrm{a}(i) = \mathrm{a}(\mathrm{S}_i) = \{\mathrm{a}_1, \dots, \mathrm{a}_s\}, \qquad s \in [1, f_i],\ \mathrm{a}(\mathrm{S}_i) \subseteq \mathrm{A} \tag{3.17}$$

Zusätzlich wird eine Menge $\mathfrak{F}_{a_j}$ definiert, die all jene Streifen i enthält, in denen eine Rolle j eines Auftrags $a_j \in \mathrm{A}$ eingelagert wurde:

$$\mathfrak{F}_{a_j} = \{i \mid \mathrm{S}_i \cap a_j \neq \emptyset\} \tag{3.18}$$

Aufgrund der Menge $\mathrm{RP} \in \mathrm{R}$ kann eine Menge $\mathfrak{W}_{a_j}$ definiert werden, die all jene Rollen eines Auftrags a_j beinhaltet, die sich noch in Produktion befinden und eingelagert werden müssen:

$$\mathrm{W}_{a_j} = \{j :\ j \in \mathrm{RP} \wedge j \in a_j\}, \qquad \text{für alle } a_j \in \mathrm{A} \tag{3.19}$$

Weiters ist eine Menge K gegeben, wobei jeder Auftrag $a_i \in \mathrm{A}$ genau einem Kunden zugehörig ist, und somit jede Rolle $j \in \mathrm{R}$ einem Kunden zugewiesen ist:

$$\mathrm{K} = \{1, \ldots, \kappa\}, \qquad \kappa \in \mathbb{N} \tag{3.20}$$

$$\mathfrak{K}_{a_i} = k \Rightarrow \mathfrak{R}_j = k \in \mathrm{K}, \qquad \text{für alle } a_i \in \mathrm{A},\ j \in a_i \tag{3.21}$$

Des Weiteren ist eine Menge von Kundenstrategien KS gegeben, die aus fünf verschiedenen Elementen besteht. Jedem Auftrag $a_i \in \mathrm{A}$ ist genau eine Kundenstrategie zugewiesen:

$$\mathrm{KS} = \{\mathrm{ks}_1, ..., \mathrm{ks}_5\} \tag{3.22}$$

$$\mathfrak{S}_{a_i} = k \in \mathrm{KS}, \qquad \text{für alle } a_i \in \mathrm{A} \tag{3.23}$$

Jede Rolle j wird durch einen Artikel und ein Format beschrieben. Ein Artikel art ist die Kombination einer Sorte von Papier und einer Grammatur:

$$\mathrm{art}_j \in \mathrm{Sorte} \times \mathrm{Grammatur}, \tag{3.24}$$

$$\mathrm{Sorte} = \{1, \ldots, \tau\}, \qquad \tau \in \mathbb{N} \tag{3.25}$$

$$\mathrm{Grammatur} = \{1, \ldots, \theta\}, \qquad \theta \in \mathbb{N}. \tag{3.26}$$

Daraus resultierend ist die Menge der Artikel ART wie folgt definiert:

$$\mathrm{ART} = \{\mathrm{art}_1, \ldots, \mathrm{art}_t\}, \qquad t \in \mathbb{N} \tag{3.27}$$

Das Format $\mathrm{form}_j \in \mathbb{N}$ entspricht der Breite einer Rolle in Millimeter, wobei es die Formate $\mathrm{F} = \{\mathrm{form}_1, \ldots, \mathrm{form}_\zeta\}$, mit $\zeta \in \mathbb{N}$, gibt. Jeder Rolle j wird nun ein Artikel und ein Format zugewiesen:

$$\mathfrak{L}_j = (\mathrm{art}_j, \mathrm{form}_j) \in \mathrm{ART} \times \mathrm{F}, \qquad \text{für alle } j \in \mathrm{R}. \tag{3.28}$$

Weiters besteht jeder Auftrag aus einer Menge von Lieferpositionen LP, wobei eine Lieferposition $l_j \in \mathrm{LP}$ das Zusammenfassen von Rollen mit gleichen Eigenschaften innerhalb eines Auftrags ist. Für jeden Auftrag $a_i \in \mathrm{A}$ existiert ein $\beta \geq 1$ mit:

$$\mathrm{LP} = \{\mathrm{l}_1, \ldots, \mathrm{l}_\beta\}, \qquad \beta \in \mathbb{N} \tag{3.29}$$

$$\bigcup_{j=1}^{\beta} l_j = a_i, \qquad l_j \in \mathrm{LP} \tag{3.30}$$

$$l_i \cap l_j = \emptyset, \qquad j \neq j' \tag{3.31}$$

Alle Rollen einer Lieferposition $j, j' \in l_k$, mit $1 \leq k \leq \beta$, besitzen den gleichen Artikel und das gleiche Format:

$$\mathfrak{L}_j = \mathfrak{L}_{j'} \Leftrightarrow (\mathrm{art}_j, \mathrm{form}_j) = (\mathrm{art}_{j'}, \mathrm{form}_{j'}) \in \mathrm{ART} \times \mathrm{F} \quad \text{mit } j \neq j' \tag{3.32}$$

Es besteht die Möglichkeit, eine Rolle mit dem Lkw oder der Bahn abzutransportieren. Daraus ergibt sich, dass zu jeder Rolle die gewünschte Verladeart $v_j \in \{\mathrm{Lkw}, \mathrm{Bahn}\}$ bekannt ist. Zusätzlich wird die Rolle nach der Verladung, mit dem Status "verladen" markiert, was bedeutet, dass sie ab diesem Zeitpunkt ein Element der Teilmenge $\mathrm{RV} \subseteq \mathrm{R}$ ist.

Im Nachfolgenden werden Eigenschaften beschrieben, die sich auf die Lage der Streifen im Lager beziehen. Für jeden Streifen i werden Werte bezüglich seiner Nähe zu den Verladetoren für Lkw beziehungsweise Bahnverladung angegeben:

$$\mathrm{w}_i^{\mathrm{Lkw}} \in [0,1], \qquad \text{für alle } i \in \mathrm{L} \tag{3.33}$$

$$\mathrm{w}_i^{\mathrm{Bahn}} \in [0,1], \qquad \text{für alle } i \in \mathrm{L} \tag{3.34}$$

Je näher sich ein Streifen der Verladestation für Lkw befindet, desto günstiger ist es, in diesem Streifen Rollen einzulagern, welche mit dem Lkw abgeholt werden. Der Wert $\mathrm{w}_i^{\mathrm{Lkw}}$ gibt den Vorzug für die Einlagerung einer Rolle j mit der Verladeart $v_j = \mathrm{Lkw}$ für den entsprechenden Streifen i an, wobei größere Werte für $\mathrm{w}_i^{\mathrm{Lkw}}$ eine stärkere Präferenz zum Einlagern der Rolle j in diesem Streifen entspricht. Analog gilt, je größer der Wert $\mathrm{w}_i^{\mathrm{Bahn}}$ ist, desto stärker ist die Präferenz eine Rolle, die mit der Bahn abgeholt wird, in diesen Streifen einzulagern. Die Summe dieser beiden Werte muss nicht 1 ergeben, um auch eine entsprechende Bewertung für Streifen, die weit ab von jeder Verlademöglichkeit liegen, vornehmen zu können.

Zur Modellierung der Tatsache, dass manche Streifen bevorzugt für Rollen mit einem Format unter 1250 mm verwendet werden, existiert ein Wert $\mathrm{w}_i^{\mathrm{small}}$. Dieser wird auf 1 gesetzt, falls der Streifen i für eine Einlagerung von Kleinware vorgesehen ist, und andernfalls auf 0:

$$\mathrm{w}_i^{\mathrm{small}} \in \{0,1\}, \qquad \text{für alle } i \in \mathrm{L} \tag{3.35}$$

Analog zur Bewertung der Streifen nach der Verladeart, gibt es für jeden Streifen ein $\mathrm{w}_i^{\mathrm{FB}}$, das die Nähe des Lagerplatzes zum Förderband ausdrücken soll. Jene Streifen, die sich in unmittelbarer Umgebung des Förderbands befinden, bekommen den Wert $\mathrm{w}_i^{\mathrm{FB}} = 1$ zugeordnet. Je weiter ein Streifen nun vom Förderband entfernt ist, desto kleiner wird $\mathrm{w}_i^{\mathrm{FB}}$:

$$\mathrm{w}_i^{\mathrm{FB}} \in [0,1], \qquad \text{für alle } i \in \mathrm{L} \tag{3.36}$$

Diese Streifen werden vorzugsweise für die Einlagerung von Rollen verwendet, welche in „naher Zukunft“ wieder ausgelagert werden sollen. Die genaue Definition von naher Zukunft ist, wie in Kapitel 3.2.1 (Absatz “Kurz eingelagerte Ware”) beschrieben, über einen Parameter, der vom Lagerleiter adaptiert werden kann, gesteuert. Da diese Rollen nicht lange eingelagert werden, möchte man den Zeitaufwand für die Einlagerung dieser Rollen gering halten. Dazu bietet sich ein Abstellen in den Lagerplätzen neben dem Förderband an, da somit die entstandenen Zugriffszeiten möglichst gering gehalten werden. Solche Rollen werden auch als “Schnelldreher” bezeichnet.

3.2 Bewertungen für den Lagerzustand

Um eine Bewertung eines Lagerzustands vornehmen zu können, müssen einige Bewertungsfunktionen definiert werden. Diese betrachten Situationen im Lager und ermitteln, ob die vorliegende Einlagerung der Rollen zu Problemen bei der Verladung führen könnten, oder die Ordnung im Lager nicht den gegebenen Richtlinien entspricht. Eine eventuelle Verletzung dieser werden im Nachfolgenden als Konflikte bezeichnet, während die Funktionen die Anzahl möglicher Verletzungen zählen. Somit gilt, je höher die Bewertung ausfällt, desto schlechter ist der Lagerzustand. Die Bewertung eines Lagerzustands erfolgt prinzipiell nach der Idee, jeden Lagerplatz im Lager zu bewerten und letztendlich diese Werte aufzusummieren. Zusätzlich werden noch Funktionen definiert, die jene Kriterien bewerten, die über mehrere Streifen verteilt berechnet werden. Die gewichtete Summe all dieser Funktionswerte liefert die gewünschte Quantifizierung des Lagerzustands. Letztendlich gilt es, einen möglichst guten Lagerzustand, was in diesem Fall eine möglichst geringe Bewertung des Zustands bedeutet, zu finden.

3.2.1 Bewertung eines Lagerplatzes

Die nachfolgenden Funktionen dienen zur Bewertung eines Streifens im Lager. Es werden die Rollen, die sich in einem Streifen befinden, betrachtet, und aufgrund ihrer Eigenschaften und der Eigenschaften der Lagerplätze werden Bewertungen durchgeführt, die aussagen, wie gut die Rolle bzw. die Rollen in diesen Streifen passen. Die Aussage, wie gut die Einlagerung der Rollen in einem Streifen ist, lässt sich über die Anzahl der Konflikte in einem Streifen ausdrücken. Ein Konflikt tritt auf, wenn durch die gefragte Einlagerung bei der Auslagerung Probleme entstehen könnten, oder das Lager nicht geordnet bzw. aufgeräumt wirkt. Jede Funktion ermittelt im Hinblick auf die Bewertung ihrer Eigenschaften, wie viele Konflikte es im entsprechenden Streifen gibt.

Verladedatum Die Funktion date(i) berechnet den Zustand in einem Lagerplatz bezüglich der Verladedaten d_j der Rollen $j \in \mathrm{S}_i$. Für jeden Streifen $i \in \mathrm{L}$ wird die Anzahl der Konflikte aufgrund der Verladedaten der Rollen ermittelt, wobei ein Konflikt hier so definiert ist, dass eine Rolle j eine andere Rolle j' verstellt. Das heißt, dass Rolle j nach Rolle j' in den Streifen i eingelagert wurde und zu einem späteren Zeitpunkt, als Rolle j', verladen wird. Bei der Auslagerung muss somit Rolle j zuerst umgestellt werden, um zur gewünschten Rolle j' zu gelangen. Da sich dadurch der Zeitaufwand bei der Verladung der Rollen erhöht, ist eine derartige Einlagerung nicht erwünscht und wird als Konflikt angesehen.

Zur Ermittlung der Konflikte wird für jede Rolle $\mathrm{s}_{i,j} \in \mathrm{S}_i$ überprüft, ob sie Rollen eines anderen Auftrags bezüglich des Verladedatums verstellt. Begonnen wird mit der vordersten Rolle s_{i,f_i} in einem Streifen i. Für diese Rolle wird ermittelt, wie viele Aufträge sich nach ihr im Streifen i befinden, die zu einem früheren Zeitpunkt verladen werden sollen. Die Anzahl der verstellten Aufträge entspricht den Konflikten, die Rolle s_{i,f_i} verursacht. In Abbildung 3.1a ist zu sehen, dass die vorderste Rolle s_{i,f_i}, die Rollen des Auftrags a_1 verstellt. Wichtig ist hier, dass die verstellten Rollen vom selben Auftrag sind. Dadurch muss die Rolle s_{i,f_i} bei der Verladung von Auftrag a_1 nur einmal umgestellt werden. Die Überprüfungen bezüglich des Verladedatums werden für jede Rolle im Streifen, bis zu $\mathrm{s}_{i,2}$, durchgeführt, und die auftretenden Konflikte summiert. In Abbildung 3.1b ist ersichtlich, dass die vorderste Rolle s_{i,f_i} zwei Aufträge im Streifen i bei der Auslagerung behindert. Weiters wird noch ein Konflikt durch die Rolle s_{i,f_i-1} hervorgerufen. Eine optimale Einlagerung bezüglich des Verladedatums erfolgt, indem die Rollen mit absteigendem Verladedatum in einen Streifen eingelagert werden. Eine solche Einlagerung ist in Abbildung 3.1c dargestellt. Das Worst-Case-Szenario tritt ein, wenn die Rollen mit aufsteigendem Verladedatum in einen Streifen eingelagert worden sind. Daraus ergibt sich, dass jede Rolle durch alle davorstehenden Rollen im Streifen verstellt wird und somit der Zeitaufwand der Verladungen beträchtlich steigt. Das Worst-Case-Szenario wird in Abbildung 3.1d dargestellt.

Mit Hilfe der Funktion date(i) werden alle Streifen $i \in \mathrm{L}$ auf Konflikte bezüglich der Verladedaten überprüft, und die Anzahl der gegebenen Konflikte wird ermittelt. Bevor die Konflikte summiert werden, erfolgt eine Gewichtung des jeweiligen Konflikts. Dies kommt daher, dass es im Hinblick auf das Verladedatum verschiedene Arten von Konflikten gibt. Die Ermittlung der Art des Konflikts erfolgt durch die Funktionen past(j) und future(j) und die Höhe der Bestrafung wird letztendlich über die Konstanten γ_{past},

γ_{future} und γ_{common} geregelt:

$$\text{date}(i) = \sum_{j=1}^{f_i-1} \sum_{j' \in \text{a}(\text{S}_i)} \text{p}(s_{i,j}, s_{i,\mathfrak{p}(i,j')}), \qquad i = 1 \ldots n, \tag{3.37}$$

mit

$$\mathfrak{p}(i, a_k) = \min \{j : s_{i,j} \in (\text{S}_i \cap a_k)\} \tag{3.38}$$

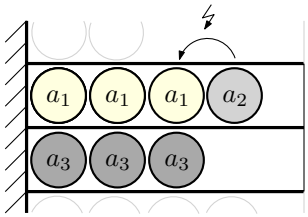
und

$$\text{p}(s_{i,j}, s_{i,j'}) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } \text{d}_{s_{i,j}} \geq \text{d}_{s_{i,j'}} \text{oder } j > j' \\ \text{past}(s_{i,j'}) + \text{future}(s_{i,j'}) & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.39}$$

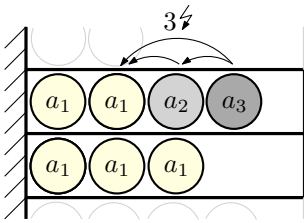
$$\text{past}(s_{i,j'}) = \begin{cases} \gamma_{\text{past}} & \text{wenn } \text{limit}_{\text{past}} \leq \text{d}_{s_{i,j'}} < \text{today} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.40}$$

$$\text{future}(s_{i,j'}) = \begin{cases} \gamma_{\text{future}} & \text{wenn } \text{d}_{s_{i,j'}} \leq \text{limit}_{\text{future}} \\ \gamma_{\text{common}} & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.41}$$

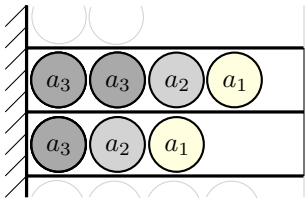
Wenn ein Konflikt ermittelt wurde, berechnet eine der beiden Funktionen past(j) oder future(j) die Art des Konflikts und die daraus resultierende Höhe seiner Bestrafung. Dabei wird Funktion (3.40) für den Fall definiert, dass das Verladedatum d_j einer verstellten Rolle j in der Vergangenheit liegt. Trifft dies zu, so wird ermittelt, wie weit das Datum in der Vergangenheit liegt. Handelt es sich dabei um ein Verladedatum in „naher Vergangenheit“ (beispielsweise gestern), kann angenommen werden, dass sich der Liefertermin des Auftrags aufgrund von Problemen im Transportsystem (Lkw oder Bahn) verschoben hat, und diese Rolle in nächster Zeit verladen wird. Deshalb ist das Verstellen einer solchen Rolle nicht erwünscht und eine solche Einlagerung wird höher bestraft. Die Höhe der Bestrafung erfolgt durch die Konstante γ_{past}. Eine weitere Konstante $\text{limit}_{\text{past}}$ wird verwendet, um den Zustand „nahe Vergangenheit“ zu definieren. In Abbildung 3.2a ist dieser Fall dargestellt. Liegt das Verladedatum d_j der verstellten Rolle j vor dem Datum der Konstante $\text{limit}_{\text{past}}$, so kann angenommen werden, dass diese Rolle nicht in nächster Zeit verladen wird und somit durch das Verstellen dieser Rolle keine Probleme entstehen. In Abbildung 3.2b ist eine solche Einlagerung dargestellt.



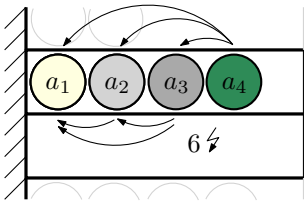
(a) Die vorderste Rolle im oberen Streifen (Auftrag a_2) wird zu einem späteren Zeitpunkt verladen, als die Rollen des Auftrags a_1. Dadurch wird der Auftrag a_1 von dieser Rolle verstellt und es wird hierfür ein Konflikt gezählt.



(b) Für diese Einlagerung werden 3 Konflikte gezählt. Die vorderste Rolle von Auftrag a_3 verstellt die hinteren 2 Aufträge und zusätzlich verstellt die Rolle von Auftrag a_2 die Rollen von Auftrag a_1.



(c) Die Rollen wurden im Hinblick auf das Verladedatum optimal eingelagert. Es wird keine Rolle von einer anderen Rolle verstellt.



(d) Jede Rolle verstellt alle dahinterliegenden Rollen im Streifen. Um alle Aufträge verladen zu können, müssen $f_i(f_i - 1)/2$ Rollen umgestellt werden.

Abbildung 3.1: Hier erfolgt eine Darstellung von möglichen Einlagerungen im Hinblick auf das Verladedatum der Rollen und von den Konflikten, die mit Hilfe der Funktion date(i) ermittelt werden. Wichtig bei der Berechnung ist, dass nicht die Anzahl der verstellten Rollen gezählt wird, sondern die Anzahl der verstellten Aufträge. Dies kommt daher, dass bei der Verladung alle Rollen des Auftrags ausgelagert werden, und eine blockierende Rolle somit nur einmal umgestellt werden muss. In allen Abbildungen gilt, dass Aufträge mit einem niedrigeren Index früher abgeholt werden: $d_{a_1} < d_{a_2} < d_{a_3} < d_{a_4}$.

Funktion (3.41) wird für den Fall definiert, dass das Verladedatum d_j einer verstellten Rolle j in der Zukunft liegt. Trifft es zu, dass eine Rolle j mit einem Verladedatum d_j, das in „naher Zukunft“ liegt, verstellt wird, soll ebenfalls eine höhere Bestrafung vorgenommen werden, da ein Verstellen solcher Rollen als ungünstig betrachtet wird. Die Konstante $\text{limit}_{\text{future}}$ definiert den Zustand „nahe Zukunft“ und die Konstante γ_{future} bestimmt die Höhe der Bestrafung. Das Verstellen von Rollen mit einem Verladedatum in „naher Zukunft“ wird deshalb höher bestraft, da man nicht damit rechnen kann, dass dieser Konflikt bis zur Auslagerung der Rollen durch

(a) Da das Verladedatum von Auftrag a_1 in „naher Vergangenheit“ liegt ($d_{a_1} > \text{limit}_{\text{past}}$), kommt es zu einer höheren Bestrafung des Konflikts ($= \gamma_{\text{past}}$).

(b) Das Verladedatum des Auftrags a_0 liegt vor dem Datum $\text{limit}_{\text{past}}$ ($d_{a_0} < \text{limit}_{\text{past}}$). Da angenommen werden kann, dass diese Rolle nicht in nächster Zeit ausgelagert wird, ist das Verstellen dieser Rolle nicht problematisch.

Abbildung 3.2: Es werden Einlagerungen dargestellt, bei denen das Verladedatum der verstellten Rollen in der Vergangenheit liegt. Die Verladedaten der Aufträge a_0 und a_1 liegen in der Vergangenheit, wobei das Verladedatum des Auftrags a_0 vor dem Datum $\text{limit}_{\text{past}}$ liegt, und Verladedatum von a_1 zeitlich nach dem Datum $\text{limit}_{\text{past}}$ ist.

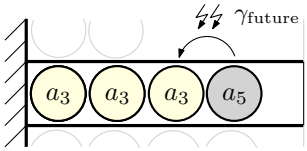
Umlagerungen aufgelöst wird. Dieser Fall ist in Abbildung 3.3a dargestellt. In Abbildung 3.3b hingegen wird ein einfacher Datumskonflikt gezeigt. In diesem Fall kommt es zu keiner höheren Bestrafung des Konflikts.

Differenz des Verladedatums Im nächsten Schritt wird die Funktion $\text{diff}(i)$ definiert, die die Differenz der Verladedaten jener Rollen ermittelt, die keinen Konflikt bezüglich Funktion (3.39), verursachen. Die Idee ist, große Differenzen schlechter zu bewerten, da dadurch ein potenzieller Lagerplatz für Rollen mit einem Verladedatum, das zwischen den beiden entsprechenden Daten liegt, verstellt werden könnte. Die Konstante $\text{diff}_{\text{limit}}$ definiert den größten Datumsabstand, der zwischen zwei Rollen ohne zusätzliche Bestrafung erlaubt ist:

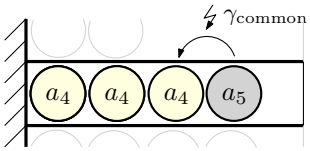
$$\text{diff}(\text{S}_\text{i}) = \sum_{j=1}^{f_i-1} \text{df}(s_{i,j}, s_{i,j+1}), \qquad i = 1 \ldots n \tag{3.42}$$

mit

$$\text{df}(s_{i,j}, s_{i,j+1}) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } (d_{s_{i,j+1}} - d_{s_{i,j}}) > \text{diff}_{\text{limit}} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.43}$$



(a) Da der Auftrag a_3 ein Verladedatum d_{a_3} in „naher Zukunft“ besitzt und von der Rolle des Auftrags a_5 verstellt wird, kommt es zu einer höheren Bestrafung des Konflikts ($= \gamma_{\text{future}}$).

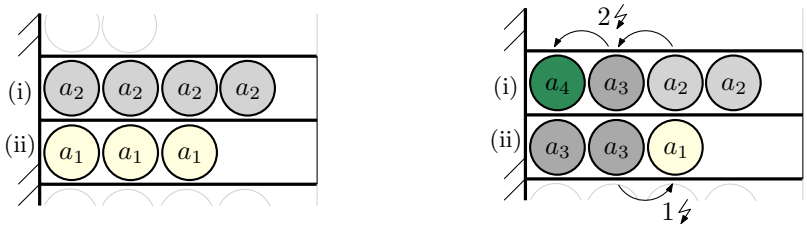


(b) Die Verladedaten beider Aufträge liegen nach dem Datum $\text{limit}_{\text{future}}$. Deshalb wird diese Einlagerung nicht höher bestraft, sondern als einfacher Konflikt gezählt ($= \gamma_{\text{common}}$).

Abbildung 3.3: Es werden hier Einlagerungen gezeigt, bei denen die Verladedaten der Aufträge in der Zukunft liegen. Das Verladedatum des Auftrags a_3 liegt vor $\text{limit}_{\text{future}}$ ($d_{a_3} < \text{limit}_{\text{past}}$), es handelt sich somit um ein Verladedatum in naher Zukunft. Die Verladedaten der Aufträge a_4 und a_5 entsprechen Daten die nach dem Datum $\text{limit}_{\text{future}}$ liegen ($\text{limit}_{\text{future}} < d_{a_4} < d_{a_5}$).

Auftrag Die Funktion order(i) liefert eine Aussage über den Lagerzustand im Hinblick auf die Aufträge $a_j \in \text{a}(i)$ der Rollen in einem Streifen i. Aufgrund der Tatsache, dass Rollen vom gleichen Auftrag meist zum gleichen Zeitpunkt verladen werden und aufgrund des Wunsches des Lagerleiters die einzelnen Streifen auftragsrein zu halten, ermittelt diese Funktion, wie viele verschiedene Aufträge sich in einem Streifen i befinden. Das Ziel ist auftragsreine Streifen zu erlangen, wobei auftragsrein bedeutet, dass nur ein Auftrag in einem Streifen eingelagert wird. Ist ein Streifen auftragsrein eingelagert worden, so kommt es zu keiner Bestrafung und somit zu keiner Verschlechterung des Lagerzustands. In Abbildung 3.4a werden Streifen dargestellt, in denen die Rollen auftragsrein eingelagert wurden. Befinden sich jedoch mehrere Aufträge in einem Streifen, so wird für jeden neuen Auftrag, der in einem Streifen eingelagert wird, eine Bestrafung zur Bewertung gerechnet. Eine solche Einlagerung ist in Abbildung 3.4b abgebildet.

Es existiert ein Ausnahmefall für die Umsetzung der Kundenstrategie 1, indem zwei verschiedene Aufträge $a_k \neq a_l$ mit $a_k, a_l \in \text{a}(\text{S}_i)$ in einem Streifen i, keinen Konflikt darstellen: Dieser tritt auf, wenn es sich um zwei Aufträge handelt, die vom selben Kunden stammen und aus Rollen mit dem gleichen Artikel und dem gleichen Format bestehen. In diesem Fall macht es beim Verladen der Aufträge keinen Unterschied, von welchem Auftrag die Rollen stammen, da es sich um die gleichen Rollen für den gleichen Kunden handelt. Derartige Einlagerungen werden in Abbildung 3.5 gezeigt. Zur übersichtlicheren Darstellung der Funktion order(i) wird die Funktion equ(j, j') definiert, die diesen Ausnahmefall für zwei Rollen $j, j' \in \text{R}$ überprüft. Die Funktion liefert 1 zurück, wenn die beiden Rollen als gleichwertig (gleicher Kunde, Artikel und Format) anzusehen sind. Andernfalls wird 0



(a) In diese beiden Streifen wurden die Aufträge a_1 und a_2 auftragsrein eingelagert. Diese Einlagerung ist im Hinblick auf die Bewertung bezüglich der Aufträge optimal.

(b) Hier sind Einlagerungen von mehreren Aufträgen in einen Streifen getätigt worden. Es wurden 3 verschiedene Aufträge in Streifen(i) eingelagert, und 2 in Streifen(ii). Daher werden 3 Konflikte als Bestrafung gerechnet.

Abbildung 3.4: Darstellung von Bewertungen im Hinblick auf die Einlagerung von verschiedenen Aufträgen in einen Streifen. Wenn in einem Streifen nur Rollen von einem Auftrag eingelagert wurden, so gilt dieser als auftragsrein und es kommt zu keiner Bestrafung des Lagerzustands. Befindet sich mehr als ein Auftrag in einem Streifen ($|\mathrm{a}(i)| > 1$), so wird die Anzahl der übrigen Aufträge im Streifen als Bestrafung zur Lagerbewertung gerechnet.

zurückgegeben:

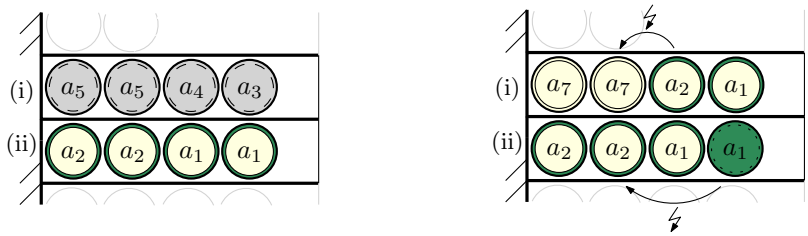
$$\mathrm{equ}(j, j') = \begin{cases} 1 & \text{wenn } a_j \neq a_{j'} \text{ und } \mathfrak{K}_j = \mathfrak{K}_{j'} \text{ und } \mathfrak{L}_j = \mathfrak{L}_{j'} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.44}$$

Im Nachfolgenden wird die Funktion order(i) definiert. Im ersten Schritt wird die Anzahl der Aufträge in einem Streifen i ermittelt. Anschließend wird berechnet, wie viele Rollen es im Streifen gibt, die dem Ausnahmefall entsprechen, und von der Anzahl subtrahiert. Wenn das Ergebnis größer 1 ist, gilt der Streifen i nicht mehr als auftragsrein, und der errechnete Wert wird als Bestrafung zum Lagerzustand gerechnet:

$$\mathrm{order}(i) = \big(\big|\mathrm{a}(i)\big| - 1\big) - \mathrm{exc}(i) \tag{3.45}$$

mit (Ausnahmefall):

$$\mathrm{exc}(i) = \sum_{j=1}^{f_i-1} \sum_{j'=j+1}^{f_i} \mathrm{equ}(s_{i,j}, s_{i,j'}), \qquad \text{und } \forall j'' \text{ mit } j'' > j' \text{ gilt: } \mathrm{equ}(j'', j') \tag{3.46}$$



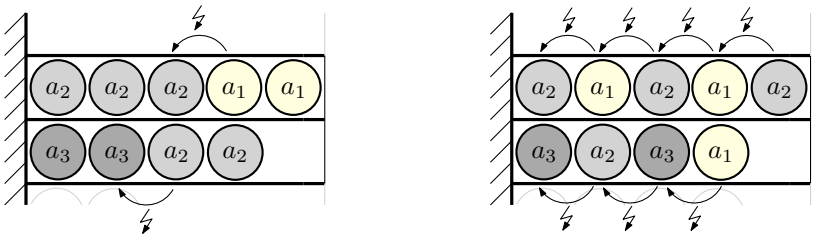
(a) In beiden Streifen wurden verschiedene Aufträge eingelagert. Die Rollen innerhalb eines Streifens stammen jedoch vom selben Kunden, und besitzen den gleichen Artikel und das gleiche Format. Dadurch kommt es zu keiner Bestrafung des Lagerzustands.

(b) Die Rollen der Aufträge a_1 und a_2 sind gleichwertig, und verursachen keinen Konflikt. In Streifen(i) kommt es zum Konflikt, da Auftrag a_7 und a_2 nicht vom gleichen Kunden stammen. Der Konflikt in Streifen(ii) entsteht aufgrund der vordersten Rolle, die einen anderen Artikel besitzt.

Abbildung 3.5: Hier werden Einlagerungen bezüglich des Ausnahmefalls bei den Aufträgen gezeigt. In diesem Fall ist es möglich, Rollen, die nicht dem selben Auftrag angehören, jedoch vom gleichen Kunden stammen und den gleichen Artikel und das gleiche Format besitzen, zusammenzustellen. Der äußere Ring der Rollen besagt, ob die Rollen vom gleichen Kunden stammen und die Art der Linie des inneren Kreises entspricht dem Artikel der Rolle.

Reihenfolge der Aufträge Mit Hilfe der Bewertungsfunktion system(i) wird ein Maß ermittelt, das angibt, wie sehr Aufträge innerhalb eines Streifens ineinander verschachtelt sind. Werden zwei Aufträge in einen Streifen i eingelagert, sollte dies blockweise erfolgen, sodass die Rollen der Aufträge entsprechend voneinander getrennt gelagert werden. Dadurch kommt es nur beim Wechsel der Aufträge zu einem Konflikt. Dies ist in Abbildung 3.6a dargestellt. Das Worst-Case-Szenario im Hinblick auf diese Funktion liegt vor, wenn die Rollen zweier oder mehrerer Aufträge abwechselnd in einen Streifen gestellt werden. In diesem Fall wird die Auslagerung eines Auftrags sehr erschwert, da der Zugriff auf die Rollen eines Auftrags immer nur durch das Umstellen einer Rolle erfolgen kann. Eine derartige Einlagerung ist in Abbildung 3.6b ersichtlich, und sollte nach Möglichkeit vermieden werden.

Für die Berechnung dieser Konflikte werden für jeweils benachbarte Einträge $(\mathrm{s}_{i,j}, \mathrm{s}_{i,j+1})$ im geordneten Tupel $\mathrm{S}(i)$ die entsprechenden Aufträge miteinander verglichen. Liegt ein Unterschied vor, wird eine entsprechende Bestrafung vorgenommen. Analog zu (3.45) wird keine Bestrafung angesetzt, wenn zwei Rollen zwar unterschiedlichen Aufträgen zugeordnet sind, aber vom gleichen Kunden stammen und den gleichen Artikel und das gleiche



(a) In diesen beiden Streifen wurden jeweils 2 Aufträge blockweise eingelagert. Bei einer derartigen Einlagerung kommt es zu $|\mathrm{a}(\mathrm{S}_i)| - 1$ Konflikten, da ein Konflikt nur beim Wechseln der Aufträge auftritt. Für diese beiden Streifen ergibt sich somit jeweils ein Konflikt.

(b) Hier wurden jeweils 2 Aufträge abwechselnd in einen Streifen eingelagert. Dadurch kommt es bei jeder Rolle zum Wechsel des Auftrags, und somit werden für jeden Streifen $f_i - 1$ Konflikte gezählt. Für den oberen Streifen bedeutet das 4 Konflikte, und im unteren Streifen entstehen 3 Konflikte.

Abbildung 3.6: In dieser Abbildung werden Einlagerungen und ihre Konflikte bezüglich der Funktion system(i) dargestellt. Diese ermittelt die Konflikte im Hinblick auf die Reihenfolge von Aufträgen in einem Streifen. Wenn zwei oder mehr Aufträge in einem Streifen eingelagert werden, so soll die Einlagerung der Aufträge blockweise erfolgen. Kommt es zu einer abwechselnden Einlagerung der Aufträge, so wird der Aufwand für die Auslagerung der einzelnen Aufträge erhöht, da immer Rollen umgestellt werden müssen, um zur nächsten Rolle des Auftrags zu gelangen.

Format besitzen:

$$\mathrm{system}(i) = \sum_{j=1}^{f_i-1} \mathrm{sys}(s_{i,j}, s_{i,j+1}), \qquad i = 1 \ldots n \tag{3.47}$$

mit

$$\mathrm{sys}(j, j') = \begin{cases} 0 & \text{wenn } \mathrm{a}_j = \mathrm{a}_{j'} \text{ oder } \mathrm{equ}(j, j') = 1 \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.48}$$

Verladeart Um den Zeitaufwand im Zuge der Auslagerung eines Auftrags weiter zu reduzieren, soll bei der Einlagerung bereits darauf geachtet werden, dass eine Rolle j mit Verladeart v_j = Lkw möglichst in Streifen abgestellt wird, die bevorzugt für Lkw Verladung verwendet werden. Umgekehrt gilt, dass eine Rolle j mit Verladeart v_j = Bahn in Streifen abgestellt werden soll, die für die Bahnverladung bevorzugt werden. Zu diesem Zweck ist die

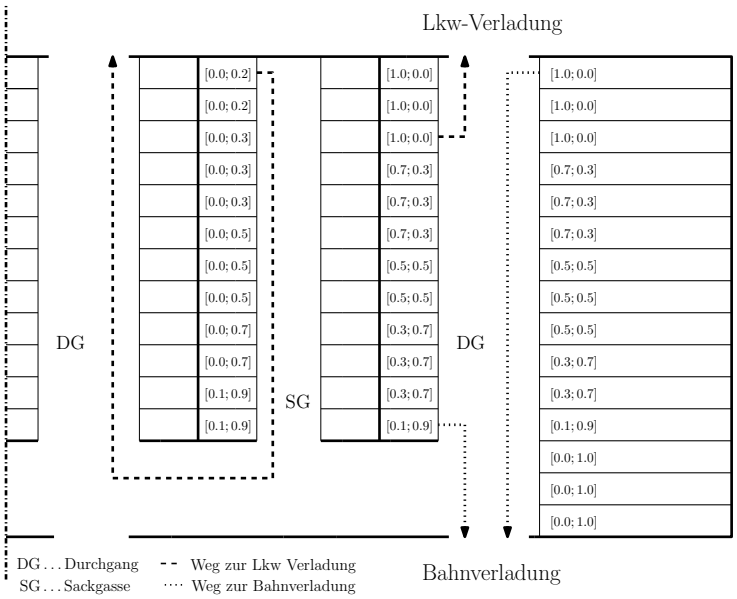


Abbildung 3.7: In dieser Abbildung sind die Annahmen der Werte $\mathrm{w}_i^{\mathrm{Lkw}}$ und $\mathrm{w}_i^{\mathrm{Bahn}}$ für die Durchgänge und die Sackgassen im Lager eingezeichnet. Die Werte sind in folgender Form in die Lagerplätze eingetragen: $[\mathrm{w}_i^{\mathrm{Lkw}}; \mathrm{w}_i^{\mathrm{Bahn}}]$. Zusätzlich sind noch die Distanzen von den Streifen zu den beiden Verladetoren eingezeichnet, um die unterschiedlich langen Wege für den Staplerfahrer bei einer Verladung der Rollen zu demonstrieren.

Funktion $\mathrm{ship}(i)$ definiert, die eine entsprechende Bewertung vornimmt:

$$\mathrm{ship}(i) = \sum_{j=1}^{f_i} \mathrm{s}(s_{i,j}), \qquad i = 1 \ldots n \tag{3.49}$$

mit

$$\mathrm{s}(s_{i,j}) = \begin{cases} 1 - \mathrm{w}_i^{\mathrm{Lkw}} & \text{wenn } \mathrm{v}_{s_{i,j}} = \mathrm{Lkw} \\ 1 - \mathrm{w}_i^{\mathrm{Bahn}} & \text{sonst } (\mathrm{v}_{s_{i,j}} = \mathrm{Bahn}) \end{cases} \tag{3.50}$$

Die Werte $\mathrm{w}_i^{\mathrm{Lkw}}$ und $\mathrm{w}_i^{\mathrm{Bahn}}$ werden für jeden Streifen $i \in \mathrm{L}$ angegeben und drücken den jeweiligen Vorzug für die Einlagerung der entsprechenden Verladungsart aus. Die Annahme dieser beiden Werte erfolgte nach folgenden Überlegungen: Die Durchgänge im Lager können als eine Distanzgerade der Länge 1 zwischen den Verladetoren (Lkw und Bahn) angesehen werden. Die Werte der Streifen in den Durchgängen sollen daher eine Summe von 1 bilden. Der Vorzug eines Streifens für eine Verladeart drückt somit gleich den

Nachteil der anderen Verladeart aus ($\mathrm{w}_i^{\mathrm{Lkw}} = 1 - \mathrm{w}_i^{\mathrm{Bahn}}$). Für die Streifen die sich unmittelbar neben einem Verladetor befinden, wird der entsprechende Vorzug auf 1 gesetzt. Dieser verringert sich proportional zur Distanz vom Verladetor bis auf 0 (anderes Verladetor). Für die Werte der Streifen in den Sackgassen gilt dies nicht (Summe kann ungleich 1 sein). Das kommt daher, dass die Distanz der hinteren Streifen in den Sackgassen zu beiden Verladetoren groß ist. Die genauen Annahmen der Werte $\mathrm{w}_i^{\mathrm{Lkw}}$ und $\mathrm{w}_i^{\mathrm{Bahn}}$ für Durchgänge und Sackgassen und die Wege von den Streifen zu den Verladetoren sind in Abbildung 3.7 eingezeichnet.

Kleinware Als Kleinware werden jene Rollen bezeichnet, die ein Format kleiner gleich 1250 mm haben. Es gibt definierte Streifen im Lager, die rein für die Einlagerung solcher Rollen vorgesehen sind. Diese Streifen sind in Abbildung 2.1 als solche gekennzeichnet. Formal ausgedrückt, wird der Wert von $\mathrm{w}_i^{\mathrm{small}}$ für diese Streifen auf 1 gesetzt, was den Vorzug für die Einlagerung von Kleinware ausdrücken soll. Für alle anderen Streifen ist der Wert von $\mathrm{w}_i^{\mathrm{small}} = 0$.

Die Funktion $\mathrm{small}(s_{i,j})$ ermittelt für jede Rolle j, ob sie aufgrund ihres Formats form_j in den jeweiligen Streifen i passt. Handelt es sich bei der Rolle um Kleinware und besitzt der Streifen einen Vorzug für die Einlagerung von Kleinware, kommt es zu keiner Bestrafung. Dies gilt auch für Rollen mit einem Format größer 1250 mm und einer Einlagerung derer in Streifen, denen kein Kleinwarevorzug zugeteilt wurde. Andernfalls, wenn eine Kleinformatrolle in einen nicht dafür vorgesehenen Streifen gestellt wird, oder eine Rolle mit einem Format größer 1250 mm in einen Streifen der für Kleinware vorgesehen ist, eingelagert wird, kommt es zu einer Bestrafung der Einlagerung. Durch die Funktion $\mathrm{small}(s_{i,j})$ kann sichergestellt werden, dass die Rollen mit Kleinformat nur in die dafür definierten Lagerplätze eingelagert wird, und sich dadurch ein Zusammenstellen der Kleinware ergibt:

$$\mathrm{small}(\mathrm{S_i}) = \sum_{j=1}^{f_i - 1} \mathrm{sm}(s_{i,j}), \qquad i = 1 \ldots n \tag{3.51}$$

mit

$$\mathrm{sm}(s_{i,j}) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \mathrm{w}_i^{\mathrm{small}} = 1 \text{ und } \mathrm{form}_j > 1250 \\ & \text{oder } \mathrm{w}_i^{\mathrm{small}} = 0 \text{ und } \mathrm{form}_j \leq 1250 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}, \qquad j \in \mathrm{R} \tag{3.52}$$

Kurz eingelagerte Ware Es gibt Rollen, die alsbald nach der Produktion verladen werden. Das bedeutet, dass diese Rollen eine kurze Lagerdauer

besitzen und somit der Aufwand für die Einlagerung gering gehalten werden soll. Dazu bietet sich ein Abstellen in den Lagerplätzen an, die sich in unmittelbarer Nähe des Förderbands befinden. Diese Lagerplätze sind in Abbildung 2.1 hellgrau markiert. Da sich bei Verwendung dieser Lagerplätze ein geringerer Weg für die Einlagerung der Schnelldreher ergibt, kann der Zeitaufwand der Einlagerung solcher Rollen verringert werden.

Mit Hilfe der Funktion short(i) wird daher ein langer Weg zur Einlagerung eines Schnelldrehers bestraft. Für jene Streifen i, die sich in der Nähe des Förderbands befinden, gilt $\mathrm{w}_i^{\mathrm{FB}} = 1$. Die restlichen Lagerplätze werden mit $\mathrm{w}_i^{\mathrm{FB}} = 0$ versehen. Die Konstante $\mathrm{d}_{\min}$ definiert einen Zeitraum in „naher Zukunft“. Liegt das Verladedatum d_j einer Rolle j in diesem Zeitraum, so handelt es sich um kurz eingelagerte Ware und ein Einlagern in einen Streifen mit $\mathrm{w}_i^{\mathrm{FB}} = 1$, ist erwünscht:

$$\mathrm{short(i)} = \sum_{j=1}^{f_i-1} \mathrm{fb}(s_{i,j}), \qquad i = 1 \dots n \tag{3.53}$$

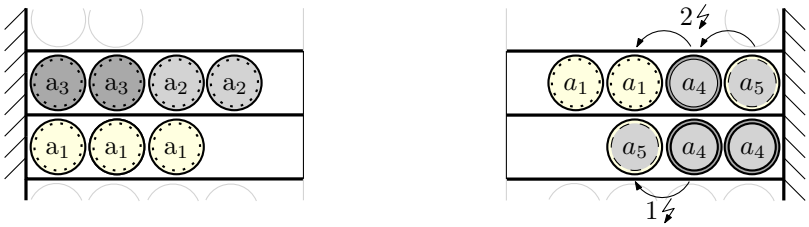
mit

$$\mathrm{fb}(s_{i,j}) = \begin{cases} w_i^{\mathrm{FB}} & \text{wenn } \mathrm{w}_i^{\mathrm{FB}} > 0 \text{ und } d_j \geq \mathrm{d}_{\min} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}, \qquad j \in \mathrm{R} \tag{3.54}$$

Kunde Diese Funktion wurde modelliert, um Rollen, die vom gleichen Kunden bestellt worden sind, zusammenzustellen. Wenn ein Kunde beispielsweise mehrere verschiedene Aufträge erteilt, sollen nicht nur die Rollen der einzelnen Aufträge zusammen eingelagert werden, sondern ist auch gefordert, alle Aufträge dieses Kundens in einen Lagerplatz abzustellen (siehe Abbildung 3.8a). Diese Einlagerung verringert in erster Linie den Zeitaufwand bei der Auslagerung der Rollen eines Kundens und sorgt zusätzlich für eine gewisse Ordnung im Lager, welche von Seiten der Lagerleitung erwünscht ist.

Die Funktion kunde(i) geht nach dem Prinzip von (3.45) vor. Es wird ermittelt, wie viele Aufträge $a_i \in \mathrm{A}$, die von verschiedenen Kunden $\mathfrak{K}_{a_i}$ bestellt worden sind, sich in einem Streifen i befinden. Ist die Anzahl der verschiedenen Kunden in einem Streifen größer 1, so gilt dieser Streifen nicht als „kundenrein“ und die übrige Anzahl von verschiedenen Kunden wird als Bestrafung zur Lagerbewertung gerechnet:

$$\mathrm{kunde}(i) = \Big| \bigcup_{a_j \in \mathrm{a}(i)} \mathfrak{K}_{a_j} \Big| - 1, \qquad i = 1 \dots n \tag{3.55}$$



(a) In diesen beiden Streifen erfolgte eine Einlagerung, die zu „kundenreinen“ Streifen führte. Es sind verschiedene Aufträge von einem Kunden, gemeinsam eingelagert worden.

(b) Hier wird eine Einlagerung von Rollen von verschiedenen Kunden in einen Streifen gezeigt. Dadurch kommt es in beiden Streifen zu den entsprechenden Konflikten.

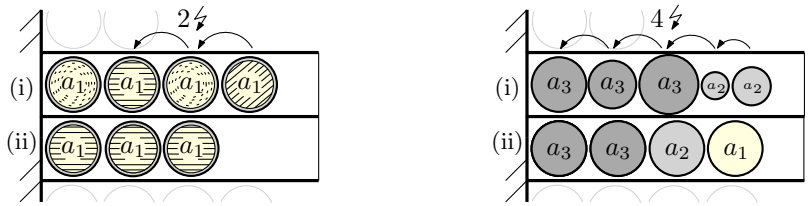
Abbildung 3.8: Es werden Einlagerungen bezüglich der Funktion kunde(i) betrachtet, die ermittelt, ob ein Streifen „kundenrein“ eingelagert worden ist. Ein Streifen i gilt dann als „kundenrein“, wenn nur Rollen vom gleichen Kunden eingelagert worden sind. Der Linientyp des inneren Kreises stellt jeweils einen Kunden dar.

Artikel Die Idee hinter der Einführung von Funktion (3.56) ist eine gewisse optische Ordnung im Lager zu erlangen. Dies wurde von Seiten der Lagerleitung gefordert. Ein optisch aufgeräumtes Lager erhält man, indem Rollen mit dem gleichen Artikel zusammengestellt werden (zum Beispiel das Zusammenstellen von braunen Papierrollen). Diese Art der Einlagerung führt nicht zu einem geringeren Aufwand bei der Auslagerung, sondern sorgt nur für ein aufgeräumtes Lager. Treten bei dieser Funktion Konflikte auf, so bedeutet das, dass die Rollen im Hinblick auf die Ordnung im Lager, nicht optimal eingelagert wurden.

In diesem Fall ist ein Konflikt das Einlagern von zwei oder mehreren Artikeln in einem Streifen. Die Funktion artikel(i) ermittelt also, wie viele verschiedene Artikeln $\text{art}_j \in \text{ART}$ in einem Streifen i abgestellt worden sind. Wurde nur ein Artikel in einem Streifen eingelagert, so gilt dieser als „artikelrein“. Eine solche Einlagerung ist im unteren Streifen von Abbildung 3.9a zu sehen. Ist dies nicht der Fall, so wird die Anzahl der übrigen verschiedenen Artikel als Strafpunkte zur Lagerbewertung gezählt:

$$\text{artikel}(i) = \Big| \bigcup_{j \in \text{S}(i)} \text{art}_j \Big| - 1, \qquad i = 1 \ldots n \tag{3.56}$$

Format Zum Erlangen eines optisch aufgeräumten Lagers wird eine weitere Funktion eingeführt. Nachdem die Rollen unterschiedliche Formate besitzen, kann durch das Zusammenstellen von gleichen Formaten ein optisch



(a) Im Streifen(ii) ist eine „auftragsreine“ Einlagerung zu sehen. In Streifen(i) befinden sich nur Rollen des Auftrags a_1, jedoch werden Strafpunkte für das Zusammenstellen von unterschiedlichen Artikeln vergeben.

(b) Im Streifen(ii) erfolgte eine „formatreine“ Einlagerung. Im Streifen(i) hingegen, wurden mehrere verschiedene Formate eingelagert. Dies führt zu einer Bestrafung des Lagerzustands.

Abbildung 3.9: Es werden Einlagerungen und deren Bewertungen im Hinblick auf ein optisch geordnetes Lager dargestellt. Durch das Zusammenstellen von Rollen mit dem gleichen Artikel oder dem gleichen Format, kann eine Ordnung im Lager geschaffen werden.

besserer Zustand erreicht werden. Ziel dieser Funktion ist, einen Streifen „formatrein“ zu gestalten. In Abbildung 3.9b ist im unteren Streifen eine derartige Einlagerung zu sehen.

Die Funktion format(i) ermittelt die Anzahl der Rollen $j \in \mathrm{RL}$ mit unterschiedlichen Formaten form_j in einem Streifen i. Wenn ein Streifen mehr als ein Format enthält, gilt er nicht mehr als „formatrein“ und daher wird die restliche Anzahl der verschiedenen Formate als Bestrafung zur Lagerbewertung gerechnet:

$$\mathrm{format}(i) = \left|\{\mathrm{form} \mid \exists j : \mathfrak{L}_{s_{i,j}} = (x, \mathrm{form})\}\right| - 1, \qquad i = 1 \ldots n \tag{3.57}$$

Neuer Streifen Mit Hilfe von Funktion empty(i) wird der Umgang mit leeren Lagerplätzen geregelt. Ein leerer Lagerplatz bietet den Vorteil, dass, falls eine Rolle von einem Auftrag und/oder Kunden eingelagert werden muss, die sich noch nicht im Lager befinden, diese in den leeren Lagerplatz abgestellt werden kann ohne Konflikte bzw. Bestrafungen zu verursachen. Dadurch soll versucht werden, erst mit der Einlagerung von Rollen in leere Lagerplätze zu beginnen, wenn diese in keinen anderen Streifen gut eingelagert werden können. In Abbildung 3.10 und 3.11 werden Beispiele für die Einlagerung von Rollen im Hinblick auf leere Lagerplätze dargestellt und beschrieben.

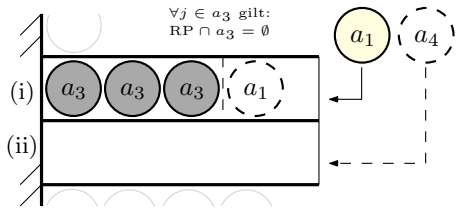
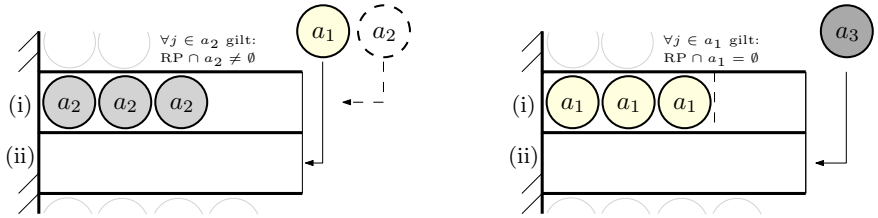


Abbildung 3.10: Hier wird ein Beispiel gezeigt, bei dem es um die Einlagerung einer Rolle j von Auftrag a_1 geht und für die 2 Streifen im Lager zur Auswahl stehen. In Streifen(i) befinden sich bereits Rollen des Auftrags a_3, der bereits fertig eingelagert wurde. Das bedeutet, dass von diesem Auftrag keine Rollen mehr eingelagert werden müssen. Der Streifen(ii) hingegen ist leer. Es soll nun eine Rolle des Auftrags a_1 eingelagert werden. Die Entscheidung für die Einlagerung der Rolle fällt hier auf Streifen(i), da ein Abstellen vor einen fertig eingelagerten Auftrag, vorausgesetzt es kommt zu keinem Konflikt bezüglich des Verladedatums (ist hier nicht der Fall, da $d_{a_1} < d_{a_3}$), eine bessere Bewertung des Lagerzustands erzielt, als das Abstellen der Rollen in den leeren Lagerplatz. Das kommt daher, dass so der leere Streifen beispielsweise für Rollen freigehalten wird, die einen Datumskonflikt in Streifen(i) verursachen würden. Eine Einlagern des Auftrags a_4 mit $d_{a_4} > d_{a_3} > d_{a_1}$ in den leeren Streifen wäre ohne Konflikte möglich (dargestellt mit strichlierten Linien).

Aufgrund der Tatsache, dass man mit leeren Lagerplätzen sorgfältig umgehen soll, wurde eine Funktion empty(i) modelliert, die versucht, die leeren Streifen nicht leichtfertig zu vergeben. Es wird ermittelt, ob in einem Streifen i Rollen eingelagert sind ($f_i > 0$) oder ob er er leer ist ($f_i = 0$). Bei der Bewertung des Lagerzustands erhält nun jeder Streifen, indem bereits Rollen eingelagert sind, einen Strafpunkt. Für leere Streifen hingegen gibt es keine Bestrafung. Dadurch wird erreicht, dass bei einer Einlagerung einer Rolle in einen leeren Streife eine schlechtere Bewertung des Lagerzustands erlangt wird. Hingegen kommt es bei der Einlagerung in einen Streifen, der bereits Rollen enthält, zu keiner Bestrafung mehr:

$$\text{empty}(i) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } f_i > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \qquad i = 1 \dots n \tag{3.58}$$



(a) Von Auftrag a_2 gibt es noch Rollen in Produktion, die eingelagert werden müssen. Durch das Einlagern von Auftrag a_1 in Streifen(i) wird zwar kein Datumskonflikt erzeugt, jedoch wird der Auftrag a_2 verstellt. Dadurch ist in diesem Fall eine Einlagerung in den leeren Streifen erwünscht.

(b) In diesem Fall ist der Auftrag a_1 bereits fertig eingelagert worden. Das bedeutet, es sind keine Rollen mehr für die Einlagerung von a_1 zu erwarten. Die Rolle von Auftrag a_3 würde jedoch einen Datumskonflikt bei einer Einlagerung in Streifen(i) erzeugen. Daher erhält man durch eine Einlagerung in den leeren Streifen, den besseren Lagerzustand.

Abbildung 3.11: Hier werden Einlagerungen im Hinblick auf die Funktion empty(i) gezeigt, bei denen die Entscheidung für die Einlagerung einer Rolle auf den leeren Streifen fällt. Es wird erläutert, warum es in diesen Situationen besser ist, mit der Einlagerung in einen leeren Streifen zu beginnen. Die Verladedaten der Aufträge a_1, a_2 und a_3 entsprechen: $d_{a_1} < d_{a_2} < d_{a_3}$.

3.2.2 Lager

Alle bisher definierten Funktionen dienen dazu, den Zustand eines einzelnen Lagerplatzes zu ermitteln. Um eine detailliertere Aussage über den gesamten Lagerzustand treffen zu können, werden noch weitere Funktionen definiert, die das ganze Lager betrachten. Nachdem die Rollen eines Auftrags nicht immer alle in einen Streifen eingelagert sind, muss es Bewertungen geben, die alle Streifen in denen die Rollen eines Auftrags abgestellt sind, betrachten. Des weiteren wird noch ermittelt, wie viele Rollen eines Auftrags bereits eingelagert wurden. Daraus ergibt sich die Anzahl der Rollen, die sich noch in Produktion befinden und für die somit noch eine Einlagerung getätigt werden muss. Auch diese Informationen sollen bei Entscheidungen für Einlagerungen von Rollen miteinbezogen werden. Es ist hier anzumerken, dass man nur die Information besitzt, dass die Rollen ins Lager kommen werden, jedoch nicht, zu welchem Zeitpunkt.

Distribution eines Auftrags Die Distribution eines Auftrags sagt aus, wie verteilt die Rollen eines Auftrags im Lager eingelagert worden sind. Dies wird berechnet, indem die Anzahl der verschiedenen Streifen, in denen sich Rollen eines Auftrags befinden, ermittelt wird. Die Absicht dieses Vorge-

hens ist, Rollen die einem Auftrag zugehören, zusammen einzulagern. Das Zusammenhalten von Rollen eines Auftrags ist im Hinblick auf die Auslagerung von Vorteil, da die zu verladenen Rollen nicht erst zusammengesucht werden müssen. Weiters kann dadurch die Gefahr vermindert werden, dass die Rollen von einem anderen Auftrag verstellt werden. Mit dieser Überlegung für die Lagerbewertung kann die definierte Kundenstrategie 5 umgesetzt werden. Diese verlangt das Zusammenstellen von Rollen des gleichen Auftrags.

Die Funktion distribution(L) ermittelt für alle Aufträge im Lager, in wie vielen verschiedenen Streifen i ein Auftrag $a_i \subset \mathrm{A}$ eingelagert wurde. Für jeden Auftrag $a_j \in \mathrm{RL}$ wird berechnet, in welchem Maß der Auftrag im Lager verteilt wurde. Dafür werden alle Rollen des Auftrags $j \in a_j$ mit $a_j \in \mathrm{RL}$ betrachtet, und die Anzahl der verschiedenen Streifen i, in denen sie abgestellt wurden, ermittelt:

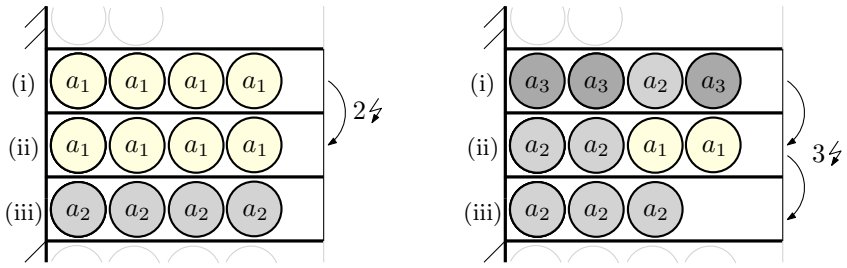
$$\mathrm{distribution(L)} = \sum_{a_j \in \mathrm{RL}} \mathrm{distr}(a_j) \tag{3.59}$$

mit

$$\mathrm{distr}(a_j) = \begin{cases} \mathrm{cnt}(a_j) & \text{wenn } \mathrm{cnt}(a_j) > 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.60}$$

$$\mathrm{cnt}(a_j) = \Big|\big\{i \,|\, \mathrm{S}_i \cap a_j \neq \emptyset\big\}\Big|, \quad \forall i \in \mathrm{L} \tag{3.61}$$

Vollständigkeit Die Bewertungsfunktion complete(L) ermittelt Konflikte bezüglich der Voll-ständigkeit von Aufträgen. Ein Auftrag gilt als vollständig eingelagert, wenn alle Rollen des Auftrags bereits ins Lager eingelagert wurden. Daraus ergibt sich, dass von diesem Auftrag keine Rollen mehr in Produktion sind und anschließend eingelagert werden müssen. Mit Hilfe dieser Funktion soll verhindert werden, dass Aufträge die als nicht vollständig gelten, nicht durch Rollen von anderen Aufträgen verstellt werden. Dies soll deshalb vermieden werden, da es ansonsten entweder zu einer Vermischung von Rollen der Aufträge kommt, oder zu einer Verteilung des verstellten Auftrags. Deshalb werden für das Verstellen von nicht vollständigen Aufträgen, Strafpunkte vergeben. Ist ein Auftrag bereits fertig eingelagert worden, so führt das Hinzustellen eines neuen Auftrags zu keiner Verschlechterung des Lagerzustands (im Hinblick auf diese Funktion).



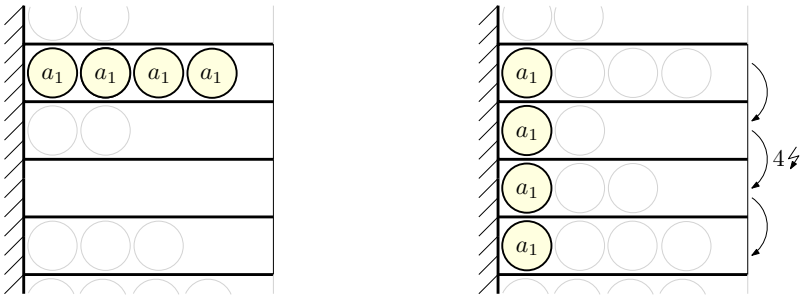
(a) Auftrag a_1 wurde in die Streifen(ii) und (iii) eingelagert. Da die Einlagerung auf 2 Streifen erfolgte, kommt es zu einer Bestrafung des Lagerzustands.

(b) Hier ist zu sehen, dass Auftrag a_2 in 3 verschiedene Streifen eingelagert wurde und dadurch die Gefahr besteht, weitere Konflikte im Hinblick auf die Auslagerung zu erhalten.

Abbildung 3.12: Hier werden zwei Einlagerungen im Hinblick auf die Verteilung eines Auftrags dargestellt. Ziel ist, die Rollen eines Auftrags zusammen einzulagern. Je weniger verschiedene Streifen für das Einlagern eines Auftrags benötigt werden, desto besser ist es. Durch das Verteilen eines Auftrags besteht die Gefahr, weitere Konflikte im Hinblick auf die Auslagerung zu erhalten. Es wird dadurch wahrscheinlicher, dass die Rollen des Auftrags andere Aufträge verstellen, oder aber auch, dass Rollen des Auftrags selbst verstellt werden.

Funktion (3.62) berechnet zuerst für alle Aufträge $\mathrm{A} \in \mathrm{L}$, ob sie vollständig eingelagert sind. Anschließend wird für jeden Auftrag, der als nicht vollständig gilt, ermittelt, ob er von einer Rolle eines anderen Auftrags verstellt ist. Trifft dies zu, wird eine Bestrafung zur Lagerbewertung gerechnet. Eine derartige Einlagerungssituation ist in Abbildung 3.14a dargestellt. Ist ein nicht vollständiger Auftrag von keiner Rolle verstellt worden, oder gilt der Auftrag bereits als vollständig, so kommt es zu keiner Verschlechterung des Lagerzustands (siehe Abbildung 3.14b).

Es existiert ein Ausnahmefall bei der Ermittlung der Vollständigkeit eines Auftrags: Für alle Aufträge $a \in \mathrm{A}$ mit $\mathfrak{S}_a = 2$ (Aufträge mit Kundenstrategie 2) wird die Vollständigkeit der einzelnen Lieferpositionen ermittelt. Das ergibt sich daraus, dass Aufträge der Kundenstrategie 2 nach Lieferpositionen getrennt eingelagert werden sollen und man somit verhindern möchte, dass eine Lieferposition von anderen Rollen verstellt wird. In Abbildung 3.15 wird eine solche Situation dargestellt. Funktion (3.63) ermittelt nun für Aufträge der Kundenstrategie 2 die Vollständigkeit einer Lieferposition, andernfalls die Vollständigkeit eines Auftrags:



(a) Optimale Einlagerung im Hinblick auf Funktion distribution(L).

(b) Darstellung des Worst-Case-Szenario bezüglich Funktion distribution(L).

Abbildung 3.13: Hier wird der Vergleich einer optimalen Einlagerung und einem Worst-Case-Szenario bezüglich Funktion distribution(L) gezeigt. Die optimale Einlagerung erfolgt, indem alle Rollen eines Auftrags in einen Streifen eingelagert werden. Beim Worst-Case-Szenario wird jede Rolle eines Auftrags in einen anderen Streifen eingelagert. In 3.13b ist gut ersichtlich, zu wie vielen weiteren Konflikten eine derartige Einlagerung führen kann. Um die Auslagerung des Auftrags a_1 zu ermöglichen, müssen zuerst alle davorstehenden Rollen (hellgrau eingezeichnet) umgestellt werden.

$$\text{complete(L)} = \sum_{i \in \text{L}} \sum_{a \in \text{a}(i)} \text{compl}(i, a) \tag{3.62}$$

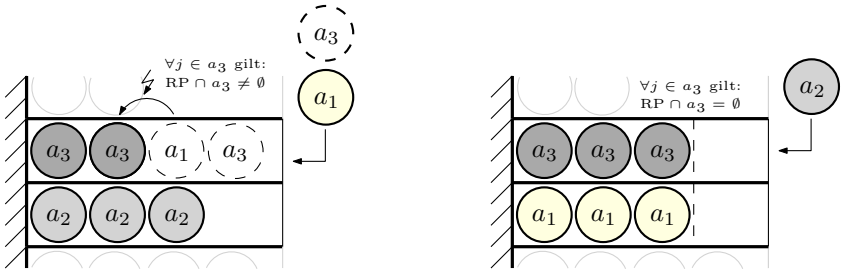
mit

$$\text{compl}(i, a) = \begin{cases} \text{liefpos}(i, a) & \text{wenn } \mathfrak{S}_a = 2 \\ \text{auftrag}(i, a) & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.63}$$

mit

$$\text{auftrag}(i, a) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \exists j, j' < f_i : \ j' > j, \ s_{i,j} \in a, \ s_{i,j'} \notin a, \\ & \qquad a \cap \text{RL} \neq a \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.64}$$

$$\text{liefpos}(i, a) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \exists j, j' < f_i : \ j' > j, s_{i,j} \in l, \ s_{i,j'} \notin l, \\ & \qquad l \cap \text{RL} \neq l, \ l \in a \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.65}$$



(a) Die beiden Aufträge a_2 und a_3 gelten als nicht vollständig eingelagert. Wird in einen dieser Streifen eine Rolle von Auftrag a_1 eingelagert, so kommt es zu einer Bestrafung des Lagerzustands. Weiters ist hier eine mögliche nachfolgende Einlagerung einer weiteren Rolle von a_3 abgebildet (strichlierte Linien), und es dadurch zu einer Vermischung der beiden Aufträge a_3 und a_1 kommt.

(b) Hier sind die beiden Aufträge a_1 und a_3 vollständig eingelagert. Dadurch ist es bezüglich Funktion (3.62) kein Problem eine Rolle eines anderen Auftrags vor diese zu stellen. Durch das Einlagern der Rolle von Auftrag a_2 vor den Auftrag a_1 würde ein Konflikt im Hinblick auf das Verladedatum erzeugt werden. Um dies zu vermeiden, wird die Rolle vor den Auftrag a_2 eingelagert werden.

Abbildung 3.14: Es werden hier Beispiele von Einlagerungen bezüglich Funktion complete(L) gezeigt. Es wird ermittelt, ob ein nicht vollständig eingelagerter Auftrag von anderen Rollen verstellt wird. Ein Auftrag gilt als vollständig eingelagert, wenn bereits alle Rollen eingelagert wurden. Das Verstellen eines nicht vollständig eingelagerten Auftrags soll vermieden werden, da es sonst zur gemischten Einlagerung von Aufträgen oder zur Distribution von Aufträgen kommt.

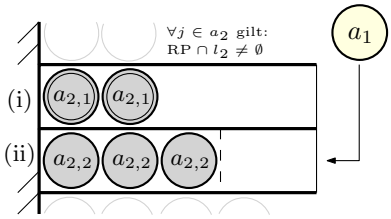
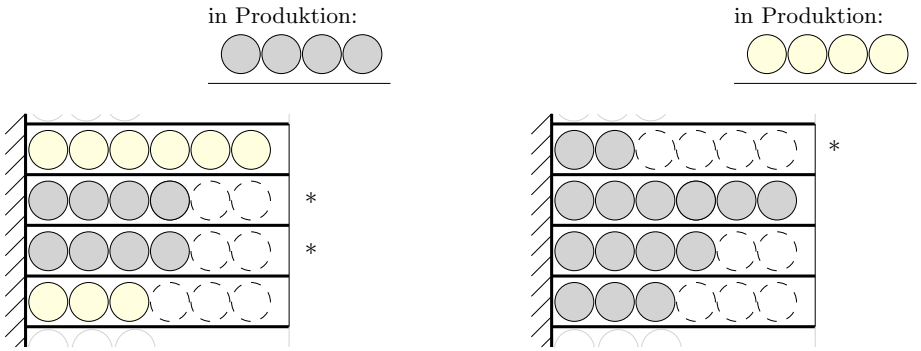


Abbildung 3.15: Hier wird eine Einlagersituation eines Auftrags mit Kundenstrategie 2 gezeigt. Auftrag a_2 besteht aus 2 verschiedenen Lieferpositionen($a_{2,1}$, $a_{2,2}$). Da dem Auftrag die Kundenstrategie 2 zugewiesen ist, wurde die Rollen der beiden Lieferpositionen getrennt eingelagert. Lieferposition $a_{2,2}$ ist bereits vollständig in Streifen(ii) eingelagert worden. Von Lieferposition $a_{2,1}$ hingegen sollen noch Rollen eingelagert werden. Daraus ergibt sich, dass Auftrag a_2 eigentlich noch nicht vollständig ist, jedoch eine Einlagerung vor die Lieferposition $a_{2,2}$ keinen Konflikt verursacht, da sie bereits als vollständig gilt, und der Auftrag der Kundenstrategie 2 angehört.



(a) Hier wird der freie Platz jener Streifen summiert, in denen bereits Rollen des einzulagernden Auftrags, abgestellt wurden. Dies ergibt in diesem Fall, 4 freie Plätze, und die Einlagerung der Rollen in Produktion ist somit ohne die Verwendung eines zusätzlichen Streifens möglich.

(b) In dieser Abbildung ist zu sehen, dass der einzulagernde Auftrag, nur im obersten Streifen als Ganzes eingelagert werden kann. Würde die erste Rolle in einen anderen Streifen einlagern werden, so müsste man einen zusätzlichen Streifen für die Einlagerung des restlichen Auftrags verwenden.

Abbildung 3.16: Es wird hier gezeigt, wie die Funktion capacity(L) bei der Einlagerung von Rollen eines Auftrags vorgeht. Es wird ein Fall dargestellt, bei dem sich bereits Rollen eines Auftrags im Lager befinden (3.16a), und ein Fall bei dem ein Auftrag neu eingelagert wird (3.16b). In beiden Situationen befinden sich 4 Rollen des Auftrags in Produktion. Die noch vorhandenen freien Plätze für die Rollen in einem Streifen sind strichliert eingezeichnet.

Freier Platz Da es erwünscht ist, jeden Auftrag in einem Streifen einzulagern, wurde die Funktion capacity(L) modelliert, die versucht, einen Auftrag in so wenig Lagerplätze wie möglich einzulagern. Die Idee ist, dass Rollen eines Auftrags, nicht in einem Streifen abgestellt werden, von dem man von vornherein weiß, dass der vorhandene freie Platz im Streifen, für die Einlagerung der restlichen Rollen des Auftrags nicht ausreichen wird. Aufgrund des aktuellen Lagerzustands kann ermittelt werden, wie viel freier Platz in jedem Streifen vorhanden ist, und wie viele Tonnen von einem Auftrag noch eingelagert werden müssen. Somit kann bestimmt werden, ob es möglich ist, alle noch einzulagernden Rollen des Auftrags in einem Streifen abzustellen, oder ob für die Einlagerung der Rollen ein zusätzlicher Streifen benötigt wird. Ist es nicht möglich, diese Rollen ohne Verwendung eines zusätzlichen Lagerplatzes einzulagern, so werden dafür Strafpunkte zum Lagerzustand gerechnet.

Für die Bewertung werden die nicht vollständig eingelagerten Aufträge im Lager $a_i \in \mathrm{A}$, für die gilt: $\exists\ \mathfrak{A}_j \in a_i$ mit $j \in \mathrm{RP}$ und mindestens ein $\mathfrak{A}_j \in a_i$

mit $j' \in \mathrm{RL}$, betrachtet. Für jeden dieser Aufträge wird die Menge $\mathfrak{W}_{a_i}$ ermittelt, die alle Rollen von Auftrag a_i enthält, die sich noch in Produktion befinden. Aufgrund von $\mathfrak{W}_{a_i}$ wird ermittelt, wie viele Tonnen vom Auftrag a_i eingelagert werden müssen (mit Hilfe von Funktion (3.68)). Die Elemente der Menge $\mathfrak{F}_{a_i}$ entsprechen jenen Lagerplätzen, in denen bereits Rollen des Auftrags a_i eingelagert sind. Um den gesamten noch vorhandenen freien Platz zu ermitteln, wird der freie Platz der Streifen $i \in \mathfrak{F}_{a_i}$ summiert (Funktion (3.69)). Es kommt nun zu einer Verschlechterung des Lagerzustands, wenn der ermittelte freie Platz kleiner als das Gewicht der noch einzulagernden Rollen eines Auftrags ist. Daraus ergibt sich nämlich, dass noch mindestens ein zusätzlicher Streifen, für die Einlagerung des restlichen Auftrags benötigt wird:

$$\mathrm{capacity}(\mathrm{L}) = \sum_{a_i \in \mathrm{RL}} \mathrm{cap}(a_i) \tag{3.66}$$

mit

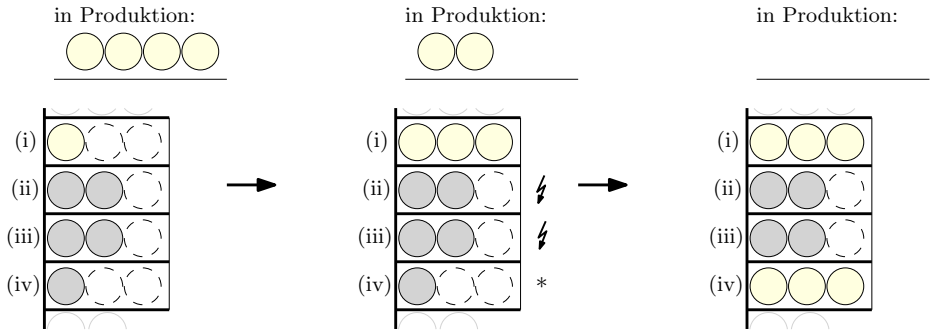
$$\mathrm{cap}(a_i) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \mathrm{free}(a_i) < \mathrm{prod}(a_i) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.67}$$

$$\mathrm{prod}(a_i) = \sum_{j \in \mathfrak{W}_{a_i}} \mathrm{w}_j, \qquad \text{für alle } a_i \in \mathrm{A} \tag{3.68}$$

$$\mathrm{free}(a_i) = \sum_{i \in \mathfrak{F}_{a_i}} \mathrm{F}_i, \qquad \text{für alle } a_i \in \mathrm{A} \tag{3.69}$$

3.3 Zielfunktion

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin ein optisch gut geordnetes, sowie bezüglich der Auslagerungen gut strukturiertes Lager zu erhalten. Durch eine gute Einlagerung der Rollen im Lager soll der Arbeitsaufwand beim Verladen der Rollen möglichst minimiert werden. Optimal wäre, wenn alle Aufträge im Lager verladen werden könnten, ohne ein Umstellen von Rollen zu benötigen. In der Praxis ist es jedoch sehr unwahrscheinlich diesen optimalen Lagerzustand zu erreichen, da mit einem Ansteigen des Lagerfüllgrades das Vermeiden von Konflikten schwer beziehungsweise sogar unmöglich wird. Daher



(a) Die ersten Rollen des Auftrags werden in die freien Plätze in Streifen(i) eingelagert. An dieser Stelle muss nun ein zusätzlicher Streifen gefunden werden, der für die Einlagerung der restlichen Rollen geeignet ist.

(b) Versucht man jetzt die nächste Rollen in Streifen(ii) oder (iii) einzulagern, so bräuchte man für die Einlagerung des gesamten Auftrags noch einen weiteren Lagerplatz (insgesamt 3 Streifen).

(c) Somit erfolgt die Einlagerung der restlichen Rollen in Streifen(iv), da so kein zusätzlicher Streifen mehr für die Einlagerung benötigt wird.

Abbildung 3.17: Hier wird die Absicht der Funktion capacity(L) anhand der Einlagerung eines Auftrags genauer erklärt. Es gilt einen Auftrag einzulagern, von dem eine Rolle im Lager ist (eingelagert in Streifen(i)) und 4 Rollen in Produktion sind. Da in diesem Fall nur 2 freie Plätze zur Verfügung stehen, wird für die Einlagerung der restlichen Rollen mindestens ein zusätzlicher Streifen benötigt. Das Ziel ist es nun, so wenig zusätzliche Streifen wie möglich, für die Einlagerung zu verwenden.

wird versucht den Aufwand bei den Verladungen zu minimieren. Unter Rücksichtnahme auf die Tatsache, dass die oben definierten Funktionen im besten Fall jeweils den Wert 0 zurückliefern, erhält ein optimal eingelagertes Lager einen Lagerzustand mit Wert 0. Alle Abweichungen von einer optimalen Einlagerung führen unweigerlich zu einer Erhöhung des Zielfunktionswerts. Somit handelt es sich bei dieser Optimierung um ein Minimierungsproblem.

Es wurde für jede Funktion zur Bewertung des Lagerzustands ein entsprechender Gewichtungsfaktor γ definiert, der aussagt, welchen Einfluss die jeweilige Funktion auf den gesamten Lagerzustand hat. Grundsätzlich können die einzelnen Faktoren beliebig gewählt werden. Um jedoch eine gute Einlagerung zu erlangen, ist es notwendig abzuschätzen, welche Kriterien und Konflikte wichtiger und welche weniger wichtig sind. Beispielsweise wird es sinnvoll sein den Gewichtungsfaktor der Funktion für die Ermittlung der Verletzungen bezüglich des Verladedatums sehr hoch anzunehmen, da diese Art von Konflikten zu einem beträchtlichen Zusatzaufwand bei der Verladung von Aufträgen führt. Im Gegensatz dazu werden die Gewichtungsfaktoren

der Funktionen, die für die Bewertung eines aufgeräumten Lagers eingeführt wurden, eher niedrig gewählt werden. Grundsätzlich ist zu sagen, dass die Bestimmungen der einzelnen Gewichtungsfaktoren und die Anpassung der Faktoren untereinander selbst ein Optimierungsproblem darstellt. In Kapitel 4.2 wird näher auf die einzelnen Gewichtungsfaktoren eingegangen und unter Berücksichtigung der Kundenstrategien aufeinander abgestimmt.

Die Zielfunktion Z(L), lässt sich wie folgt, definieren:

$$\begin{aligned} \mathrm{Z(L)} \quad = \quad & \mathrm{streifenwert(L)} \quad + \quad \gamma_{\mathrm{dist}} \cdot \mathrm{distribution(L)} \\ & \qquad\qquad\qquad + \quad \gamma_{\mathrm{comp}} \cdot \mathrm{complete(L)} \\ & \qquad\qquad\qquad + \quad \gamma_{\mathrm{capa}} \cdot \mathrm{capacity(L)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathrm{streifenwert(L)} \quad = \quad \sum\nolimits_{i \in \mathrm{L}} \quad & \gamma_{\mathrm{date}} \cdot \mathrm{date}(i) \quad + \quad \gamma_{\mathrm{diff}} \cdot \mathrm{diff}(i) \quad + \\ & \gamma_{\mathrm{order}} \cdot \mathrm{order}(i) \quad + \quad \gamma_{\mathrm{ship}} \cdot \mathrm{ship}(i) \quad + \\ & \gamma_{\mathrm{sys}} \cdot \mathrm{system}(i) \quad + \quad \gamma_{\mathrm{small}} \cdot \mathrm{small}(i) \quad + \\ & \gamma_{\mathrm{short}} \cdot \mathrm{short}(i) \quad + \quad \gamma_{\mathrm{client}} \cdot \mathrm{kunden}(i) \quad + \\ & \gamma_{\mathrm{article}} \cdot \mathrm{artikel}(i) \quad + \quad \gamma_{\mathrm{form}} \cdot \mathrm{format}(i) \quad + \\ & \gamma_{\mathrm{empty}} \cdot \mathrm{empty}(i) \end{aligned}$$

Tabelle 3.1: Zielfunktion Z(L) zur Bewertung des Lagerzustands.

Dabei steht streifenwert(L) für die gewichtete Summe der Streifenbewertungen aller Streifen des Lagers. Zusätzlich müssen alle Bewertungen, die über das gesamte Lager berechnet werden, hinzugezählt werden.

Kapitel 4

Einlagerungsstrategie

In den vorherigen Kapiteln wurde die Motivation für eine gute Einlagerung dargelegt und die Gegebenheiten im Lager Hamburger-Spremberg erklärt. Des Weiteren wurden Funktionen für die Bewertung eines Lagerzustands definiert. In diesem Kapitel wird eine Strategie erarbeitet, die für eine gute Einlagerung der Rollen sorgen soll.

Das Ziel der Einlagerungsstrategie ist, Rollen so im Lager einzulagern, dass es zu keiner beziehungsweise zu einer möglichst geringen Verschlechterung des Lagerzustands kommt. Die von den Kunden in Auftrag gegebenen Rollen gelangen über das Förderband von der Produktion in das Lager. Für diese Rollen soll nun ein optimaler Lagerplatz für die Einlagerung ermittelt werden. Im nachfolgenden Kapitel werden all jene Rollen ausgenommen, die direkt verladen werden, da sie für die Einlagerung und den Lagerzustand nicht von Bedeutung sind. Die Einlagerungsstrategie berechnet für jede Rolle die drei besten Einlagerungsmöglichkeiten. Um eine optimale Einlagerung zu garantieren, betrachtet die von uns hier vorgestellte Strategie nicht nur die zum Zeitpunkt der Einlagerung bekannten Fakten, sondern versucht auch Lagerplätze so zu wählen, dass für spätere Einlagerungen bereits optimale Verhältnisse geschaffen werden. Genauer gesagt, wird aus der vorhandenen Information der Rollen, die zu einem Auftrag gehören und noch eingelagert werden müssen, versucht, mögliche Einlagerungen vorherzusehen und diese bei der Auswahl der Streifen für die aktuell einzulagernde Rolle zu berücksichtigen. Die ermittelten Lagerplätze werden dann dem Staplerfahrer am Lesegerät angezeigt. Wichtig ist hier, dass diese Lagerplätze als Vorschläge gehandhabt werden. Dadurch soll die endgültige Entscheidung für die Platzierung der Rolle dem zuständigem Staplerfahrer übergeben werden. Diese Vorgehensweise wird einerseits gewählt, damit sich die Mitarbeiter nicht vom System übervorteilt sehen, und andererseits kann damit kurzfristig auf

Änderungen (Schäden im Lager, Verschieben eines Liefertermins) problemlos reagiert werden.

Die Einlagervorschläge werden unter Berücksichtigung der Zielfunktion Z(L) berechnet. Als Ausgangssituation für die Berechnung wird der aktuelle Lagerzustand verwendet. Für die einzulagernde Rolle wird anschließend eine Einlagerung in jeden Streifen simuliert und der theoretische, neue Lagerzustand wird inkrementell ermittelt. Nachdem das Ziel die Minimierung des berechneten Lagerzustands ist, werden die drei Lagerplätze als Vorschläge geliefert, die den kleinsten neuen Lagerzustand ergeben.

4.1 Inkrementelle Berechnung des neuen Lagerzustands

Für die Ermittlung der besten Vorschläge für die Einlagerung einer Rolle werden im ersten Schritt all jene Streifen i gesucht, in denen die einzulagernde Rolle j, aufgrund ihres Gewichts w_j, eingelagert werden kann. Diese Streifen bilden eine Menge E, die für die weiteren Berechnungen verwendet wird:

$$\mathrm{E} = \{i \mid \mathrm{w}_j + \mathrm{w}(\mathrm{S}_i) \leq \mathrm{C}_i, i = 1 \ldots n\}. \tag{4.1}$$

Anschließend wird für jeden Streifen $i \in \mathrm{E}$ die Bewertung des neuen Lagerzustands berechnet, unter der Annahme, dass die einzulagernde Rolle j in den Streifen i eingelagert wird. Dafür reicht es aus, jeweils die Änderungen in der Zielfunktion zu ermitteln. Im Folgenden werden die nötigen Berechnungsschritte für diese inkrementelle Berechnung beschrieben.

empty(S_i) Bei der Berechnung für die Einlagerung einer Rolle j ermittelt Funktion (3.58), ob der Streifen i leer ist. Wenn dies der Fall ist, kommt es im Zuge einer Einlagerung in diesen Streifen zu einer zusätzlichen Bestrafung. In Abbildung 4.1a wird dies dargestellt.

date(S_i) Für die inkrementelle Berechnung von Funktion (3.37) müssen mehrere Schritte durchgeführt werden. Die einzulagernde Rolle j wird mit jeder Rolle eines Auftrags im Streifen $\mathrm{S}_i = (s_{i,1}, s_{i,2}, \ldots, s_{i,f_i})$ bezüglich des Verladedatums verglichen. Bei jedem Vergleich wird überprüft, ob die einzulagernde Rolle j einen anderen Auftrag im Hinblick auf das Verladedatum verstellt. Die Ermittlung der Konflikte und deren Art der Bestrafung er-

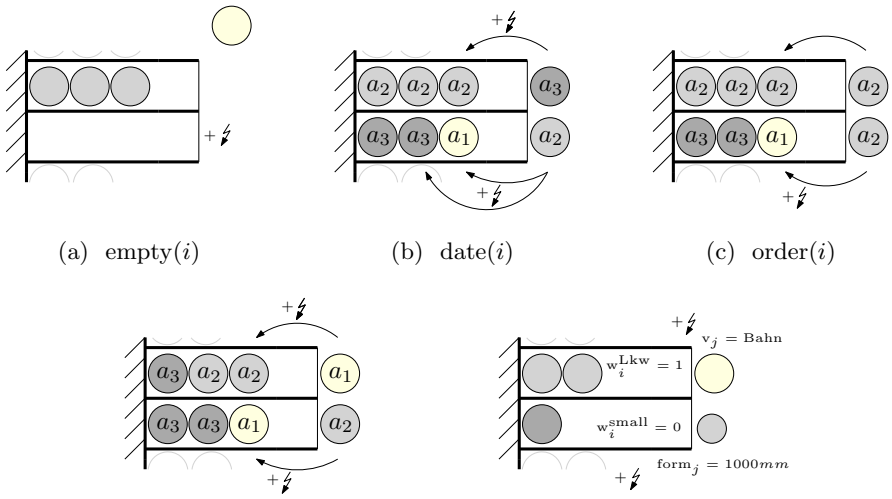
folgt so, wie es in der Funktion date(i) der Zielfunktion definiert wurde. In Abbildung 4.1b sind die Vergleiche exemplarisch dargestellt, die bei einer Einlagerung bezüglich des Verladedatums entstehen.

order(S_i) Für Funktion (3.45) erfolgt die Aktualisierung, indem ermittelt wird, ob sich Rollen des Auftrags $\mathfrak{A}_j$ für die einzulagernde Rolle j im jeweiligen Streifen i befinden. Es kommt nur dann zu Erhöhung dieses Funktionswerts, wenn noch keine Rolle dieses Auftrags im Streifen eingelagert wurde. Ist dies der Fall, wird die Anzahl der Aufträge in einem Streifen erhöht. Dies wird in Abbildung 4.1c dargestellt.

diff(S_i)**, system**(S_i) Für die Ermittlung des neuen Zustands bezüglich der beiden Funktionen (3.42) und (3.47) muss jeweils nur ein Vergleich durchgeführt werden. Es wird die letzte Rolle in einem Streifen s_{i,f_i} mit der einzulagernden Rolle j verglichen. Für die Funktion diff(i) wird der Datumsabstand der beiden Rollen ermittelt, und im Falle eines Konflikt verschlechtert sich der Lagerzustand. Für die inkrementelle Berechnung der Funktion system(i) werden die Aufträge der beiden Rollen verglichen. Gehören die Rollen zu unterschiedlichen Aufträgen und der im Kapitel 3.2.1 definierte Ausnahmezustand gilt nicht, so wird der Zustand des Lagers um diesen Konflikt erhöht. Die entsprechenden Vergleiche sind in Abbildung 4.1d eingezeichnet.

ship(S_i)**, small**(S_i)**, short**(S_i) Die inkrementell berechneten Bewertungen für den Lagerzustand bezüglich der Funktionen (3.49), (3.51) und (3.53) erfolgen durch einen Vergleich der einzulagernden Rolle j und dem Streifen i. Die Daten der einzulagernden Rolle werden mit den Eigenschaften des Lagerplatzes verglichen. Daraus ergibt sich, ob diese Rolle in dem Streifen einen Konflikt verursacht oder nicht. Eine Darstellung dessen ist in Abbildung 4.1e zu sehen.

kunden(S_i)**, artikel**(S_i)**, format**(S_i) Die Bewertung des neuen Lagerzustands erfolgt für diese Funktionen nach der gleichen Vorgehensweise wie für die Funktion order(i). Die einzulagernde Rolle j wird mit den Rollen in einem Streifen i verglichen, und es wird ermittelt, ob sich bereits eine Rolle vom gleichen Kunden, mit dem gleichen Artikel oder mit dem gleichen Format im Streifen befindet. Ist die Rolle, die eingelagert werden soll, die erste Rolle mit einen dieser Eigenschaften im Streifen, so wird die entsprechende Bewertung erhöht und zum aktuellen Lagerzustand hinzugefügt.



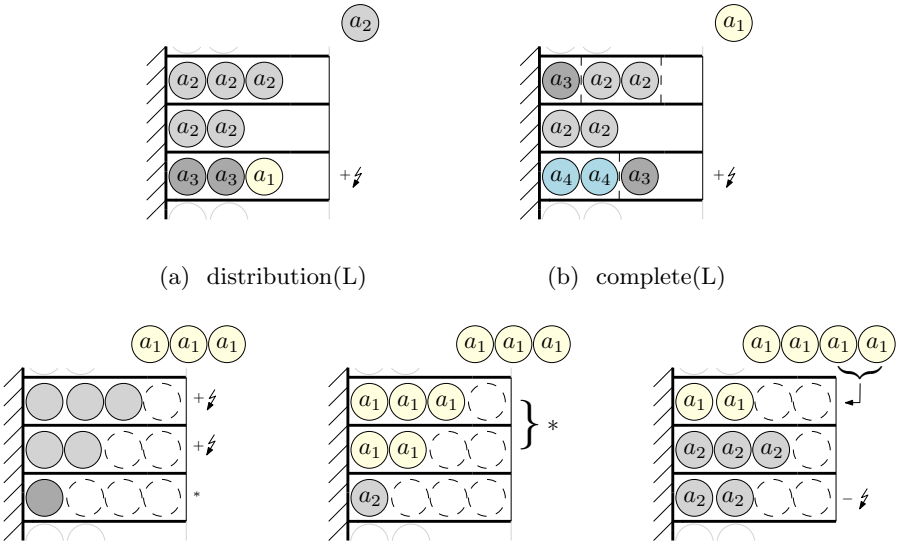
(a) empty(i) (b) date(i) (c) order(i)

(d) diff(i) und system(i) (e) ship(i) und small(i)

Abbildung 4.1: Vergleiche für die inkrementellen Berechnungen innerhalb eines Streifens. Es wird gezeigt, wie der Lagerzustand, bei der Einlagerung einer Rolle, neu berechnet wird. Für die einzelnen Funktionen zur Bewertung des Zustands in einem Streifen wird der neue Zustand inkrementell berechnet, und zum aktuellen Lagerzustand addiert.

distribution(L) Um den neuen Zustand bezüglich der Verteilung eines Auftrags im Lager zu errechnen, wird im ersten Schritt überprüft, ob es sich um die erste Rolle eines Auftrags handelt, die eingelagert wird. Ist dies der Fall muss keine weitere Berechnung durchgeführt werden, da dieser Auftrag nicht verteilt sein kann. Wurden bereits Rollen dieses Auftrags eingelagert, so wird ermittelt, in wie vielen Streifen dieser Auftrag bereits abgestellt wurde. Dazu wird jeder Streifen i überprüft, ob er eine Rolle des entsprechenden Auftrags enthält. Für den Versuch die Rolle in einen Streifen einzulagern, indem sich noch keine Rollen des Auftrags befinden, wird die Bewertung für die Distribution eines Auftrags erhöht (siehe auch Abbildung 4.2a).

complete(L) Die inkrementelle Berechnung von Funktion (3.62) erfolgt durch das Überprüfen der Vollständigkeit der Rollen in einem Streifen i. Es wird für jede Rolle $s_{i,j} \in S_i$ ermittelt, ob der dazugehörige Auftrag $a_{s_{i,j}}$ bereits vollständig eingelagert ist. Ist dies nicht der Fall, so wird für das Verstellen des Auftrags bestraft. Der Auftrag der einzulagernden Rolle a_j ist nur dann relevant, wenn sich dieser Auftrag im Streifen befindet, und als nicht vollständig eingelagert gilt. Trifft dies zu, so kommt es zu keiner Bestrafung, da es sich um ein Zusammenstellen von Rollen des gleichen



(a) distribution(L)

(b) complete(L)

(c) capacity(L): Einlagerung eines neuen Auftrags in einen Streifen, indem der gesamte Auftrag Platz haben wird.

(d) capacity(L): Der vorhandene freie Platz ist ausreichend für die Einlagerung des restlichen Auftrags.

(e) capacity(L): Der Auftrag kann, nach Einlagerung der ersten drei Rollen, ohne zusätzlichen Streifen eingelagert werden.

Abbildung 4.2: Inkrementelle Berechnung der Bewertungsfunktionen für das gesamte Lager.

Auftrags handelt. Die Vergleiche für die inkrementelle Berechnung dieser Funktion sind in Abbildung 4.2b exemplarisch dargestellt.

capacity(L) Für die Berechnung des neuen Lagerzustands bezüglich Funktion (3.66) wird ermittelt, wie viele Tonnen des Auftrags der einzulagernden Rolle j sich noch in Produktion befinden. Bei der Einlagerung der ersten Rolle eines Auftrags wird für jeden Streifen i überprüft, ob der gesamte Auftrag darin Platz haben wird (Abbildung 4.2c). Ist der vorhandene freie Platz des Streifens zu klein für die Einlagerung des gesamten Auftrags, so kommt es zu einer Verschlechterung des Lagerzustands. Wurden bereits Rollen des Auftrags eingelagert, so wird der freie Platz der entsprechenden Streifen summiert. Ist dieser Platz nicht ausreichend für die Einlagerung des Auftrags, kam es bei der Berechnung des Lagerzustands zu einer Bestrafung, da mindestens ein zusätlzicher Streifen benötigt wird. Das Ziel der Einlagerung dieser Rolle ist, einen zusätzlichen Streifen zu finden, so dass die restlichen Rollen des Auftrags ohne Verwendung von weiteren Streifen eingelagert werden können. Der freie Platz jedes Streifens wird zum bereits errechneten freien Platz addiert und überprüft, ob der Platz nun ausreichend ist. Wenn

mit der Hinzugabe dieses Streifens der Auftrag ohne weiteren Streifen eingelagert werden kann, so wird die Bestrafung für diesen Auftrag aufgehoben. Das bedeutet, dass es zu einer Verbesserung des aktuellen Lagerzustands kommt (siehe Abbildung 4.2e). Andernfalls bleibt die Bestrafung aufrecht, und der Lagerzustand bleibt gleich.

4.2 Anpassung der Gewichtungsfaktoren

Im ersten Schritt der Entwicklung einer optimalen Einlagerungsstrategie wurden Funktionen für die Bewertung des Lagerzustands definiert (siehe Kapitel 3). Die Bewertungen der Funktionen werden im Hinblick auf eine konfliktfreie Auslagerung und auf die Berücksichtigung der Kundenstrategien durchgeführt. Damit es aber zu einer guten Einlagerung kommt, müssen die Bewertungen der einzelnen Funktionen untereinander abgestimmt werden. Die Abstimmung aller Gewichtungsfaktoren γ_i stellt selbst eine schwere Aufgabe dar und muss für die jeweiligen Gegebenheiten und Intentionen der Lagerleitung angepasst werden. Im Folgenden wird versucht einen Vorschlag für eine im Allgemeinen gute Bewertung Gewichtung zu entwickeln.

Für jeden Teil in der Zielfunktion wird ein Faktor definiert, der angibt, wie viel Einfluss diese Funktion in der Bewertung des gesamten Lagerzustands haben soll. Für die Funktionen zur Bewertung der Streifen werden die Gewichtungsfaktoren γ_{date}, γ_{diff}, γ_{order}, γ_{sys}, γ_{ship}, γ_{short}, γ_{small}, γ_{client}, γ_{article}, γ_{form} und γ_{empty} definiert, und für die Funktionen des Lagers werden die Faktoren γ_{distr}, γ_{compl} und γ_{capa} eingeführt. Welche Funktion mit welchem Faktor multipliziert wird, kann aus der Zielfunktion Z(L) in Kapitel 3.3 entnommen werden. Durch die Höhe des Gewichtungsfaktors wird angegeben, wie entscheidend ein Konflikt der dazugehörigen Funktion für den Zustand im Lager ist. Je höher der Faktor ist, desto problematischer ist der ermittelte Konflikt. Beispielsweise ist es möglich nur für den Gewichtungsfaktor γ_{client} einen Wert größer 0 anzunehmen und die restlichen Faktoren auf 0 setzen. Dadurch wird erreicht, dass bei der Einlagerung nur Konflikte bezüglich der Kunden ausschlaggebend sind. Das Lager wird somit nur nach Kunden sortiert. Alle anderen Konflikte, wie zum Beispiel Datumskonflikte, Auftragskonflikte usw. sind durch diese Einstellung unbedeutend.

Eine gute Abstimmung der Gewichtungsfaktoren untereinander ist ausschlaggebend für das Umsetzen der einzelnen Kundenstrategien. Die einzelnen Funktionen der Zielfunktion wurden so definiert, dass die Realisierung der Kundenstrategien durch eine Anpassung der Gewichtungsfaktoren erfolgen kann. Damit die Kundenstrategien umgesetzt werden, müssen einige Bedingungen für die Relation der einzelnen Faktoren zueinander definiert werden.

Bedingungen für die Gewichtungen

In diesem Kapitel werden die Bedingungen für die Gewichtungsfaktoren definiert, die für die Realisierung der Kundenstrategien beziehungsweise einer guten Einlagerung im Allgemeinen erfüllt sein müssen. Im ersten Schritt wird eine Konstante definiert, die mehrere Gewichtungsfaktoren zusammenfasst. Das Einführen dieser Konstante hat keine direkte Bedeutung für die Einlagerungsstrategie, sondern wird rein zur besseren Lesbarkeit eingeführt:

$$\gamma_{\text{ordnung}} = \gamma_{\text{order}} + \gamma_{\text{diff}} + \gamma_{\text{system}} + \gamma_{\text{ship}} + \tag{4.2}$$

$$\gamma_{\text{short}} + \gamma_{\text{client}} + \gamma_{\text{article}} + \gamma_{\text{form}} \tag{4.3}$$

Gewichtungsfaktor γ_{date}: Da ein Konflikt bezüglich des Verladedatums den größten zusätzlichen Aufwand bei der Auslagerung eines Auftrags erzeugt, wird ein derartiger Konflikt am höhsten gewichtet. Dadurch ergibt sich, dass der Faktor γ_{date} größer sein muss, als alle anderen Gewichtungsfaktoren und folgende Bedingung lässt sich aufstellen:

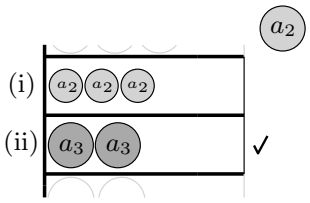
$$\gamma_{\text{date}} > \gamma_{\text{ordnung}}, \gamma_{\text{small}}, \gamma_{\text{compl}}, \gamma_{\text{distr}}, \gamma_{\text{capa}}, \gamma_{\text{empty}} \tag{4.4}$$

Gewichtungsfaktor γ_{small}: Das Festlegen dieser Bedingung dient zur Realisierung von Kundenstrategie 3. Die Einlagerung der entsprechenden Aufträge soll so erfolgen, dass die Kleinware des Auftrags in die dafür vorgesehenen Streifen eingelagert wird, und die anders formatigen Rollen in den anderen Lagerplätzen abgestellt werden. Da andere Funktionen versuchen die Rollen eines Auftrags zusammenzustellen, in diesem Falle aber das Aufteilen des Auftrags erwünscht ist, muss die Gewichtung entsprechend höher gewählt werden. Somit ergibt sich folgende Bedingung für die Umsetzung der Kundenstrategie 3:

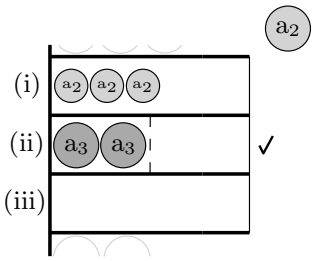
$$\gamma_{\text{small}} > \gamma_{\text{compl}} + \gamma_{\text{distr}} + \gamma_{\text{ordnung}} \tag{4.5}$$

In Abbildung 4.3a und Tabelle 4.1 wird ein Beispiel für die Festlegung dieser Bedingung gezeigt. Es wird eine Einlagerung mit der entsprechenden Ermittlung des neuen Lagerzustands dargestellt. In diesem Beispiel ist zu sehen, dass durch die hohe Gewichgung von γ_{small} die Kundenstrategie 3 umgesetzt werden kann.

Gewichtungsfaktor γ_{empty}: Das Abstellen von Rollen in einen leeren Lagerplatz soll sorgfältig überlegt werden. Die leeren Streifen im Lager sollen



(a) Hier soll eine Rolle j mit Format $\geq$ 1250 mm von Auftrag a_2 eingelagert werden. Auftrag a_3 ist zwar nicht vollständig eingelagert, trotzdem soll Rolle j vor diesen gestellt werden (siehe Kundenstrategie 3). Um dies zu erreichen, muss der Konflikt bezüglich des Formats schwerwiegender sein, als die anderen Konflikte (siehe Tabelle 4.1).

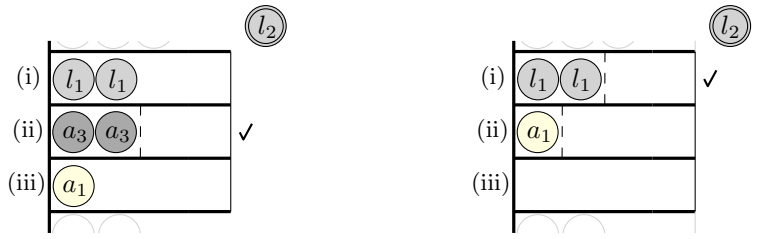


(b) In dieser Situation gilt Auftrag a_3 bereits als vollständig eingelagert und es steht zusätzlich noch ein leerer Streifen für die Einlagerung zur Verfügung. Aufgrund des Wunsches mit leeren Streifen sorgfältig umzugehen, soll die Rolle vor Auftrag a_3 gestellt werden, um den leeren Streifen für die Einlagerung anderer Aufträge freizuhalten.

Abbildung 4.3: Kleinwarenvorzug: Hier wird gezeigt, warum $\gamma_{\text{small}} > \gamma_{\text{compl}} + \gamma_{\text{distr}} + \gamma_{\text{ordnung}}$ und $\gamma_{\text{empty}} > \gamma_{\text{lagerordnung}}$ gelten soll. Es sollen Rollen von Auftrag a_2 mit Kundenstrategie 3 eingelagert werden, von dem die Kleinware bereits eingelagert wurde. Es gilt hier, dass die Einlagerung von a_2 in keinem Streifen einen Datumskonflikt erzeugt.

i	γ_{order}	γ_{system}	γ_{ship}	γ_{small}	γ_{diff}	γ_{client}	γ_{article}	γ_{form}	γ_{compl}	γ_{distr}	γ_{empty}	$=$
	3	3	1	90	1	3	3	3	50	20	20	
Abb.4.3a												
(i)			x	x				x				94
(ii)	x	x	x		x	x	x	x	x	x		87
Abb.4.3b												
(i)			x	x				x				94
(ii)	x	x	x		x	x	x	x		x		37
(iii)			x							x	x	40

Tabelle 4.1: Kleinwarenvorzug: Hier werden die Ermittlungen des neuen Lagerzustands der Einlagerungen von Abbildung 4.3a und 4.3b dargestellt. Es wird für den jeweiligen Streifen und auftretenden Konflikt ein „x“ in die Tabelle eingetragen. Die verschiedenen Werte der Gewichtungsfaktoren sind ebenfalls eingetragen. In der letzten Spalte ist zu sehen, wie viele Strafpunkte eine derartige Einlagerung erzeugt. Der Streifen mit dem niedrigsten Ergebnis ist der Best geeignetste Streifen für die Einlagerung der Rolle.



(a) Hier ist die Lieferposition l_1 noch nicht vollständig eingelagert. Deshalb soll die einzulagernde Rolle von l_2 diese nicht Verstellen, und eine verteilte Einlagerung des Auftrags wird erwünscht.

(b) Bei dieser Einlagerung ist die Lieferposition l_1 bereits vollständig eingelagert. Daher kann eine Rolle von l_2 ohne Probleme vor diese eingelagert werden. Dies ist sogar erwünscht, da dadurch ein auftragsreiner Streifen entsteht.

Abbildung 4.4: Kundenstrategie 2: Es soll eine Einlagerung eines Auftrags bestehend aus 2 Lieferpositionen erfolgen, dem Kundenstrategie 2 zugewiesen ist. Dieser Auftrag soll somit nach Lieferpositionen getrennt eingelagert werden. Dies wird durch einen hohen Wert für γ_{compl} realisiert. Dadurch wird eine nicht vollständig eingelagerte Lieferposition nicht von anderen Rollen verstellt, auch nicht von Rollen des eigenen Auftrags. Zu dieser Abbildung ist Tabelle 4.2 zugehörig.

für die Einlagerung von schwierigen Aufträgen bereitstehen. Das bedeutet, dass Rollen, die in anderen Streifen schwerwiegende Konflikte erzeugen, in leere Streifen eingelagert werden sollen. Entstehen jedoch nur kleine Konflikte, so soll der leere Lagerplatz für spätere Einlagerungen freigehalten werden. Daraus ergibt sich, dass der Faktor γ_{empty} für die Gewichtung des Konflikts eine Rolle in einen leeren Streifen abzustellen, größer sein soll, als die Faktoren für die Lagerordnung:

$$\gamma_{\text{empty}} > \gamma_{\text{lagerordnung}} \tag{4.6}$$

In Abbildung 4.3b und Tabelle 4.1 wird eine diesbezügliche Einlagerung dargestellt. Es wird hier gezeigt, dass wenn die Möglichkeit besteht eine Rolle vor einen vollständig eingelagerten Auftrag zu stellen (ohne Datumskonflikt), so wird diese Einlagerung der Einlagerung in den leeren Streifen vorgezogen, um den leeren Streifen, für die Einlagerung von problematischeren Aufträgen freizuhalten.

Gewichtungsfaktor γ_{compl}: Die nächsten Abstimmungen werden für die Realisierung der Kundenstrategie 2 gemacht. Diese Strategie besagt, dass Aufträge mit dieser Kundenstrategie nach Artikel und Format sortiert ein-

i	γ_{date}	γ_{order}	γ_{system}	γ_{diff}	γ_{ship}	γ_{client}	γ_{article}	γ_{form}	γ_{compl}	γ_{distr}	γ_{empty}	=
	150	3	3	1	1	3	3	3	50	20	20	
Abb.4.4a												
(i)							x		x			53
(ii)		x	x		x	x	x	x		x		36
(iii)	x	x	x		x	x	x	x	x	x		236
Abb.4.4b												
(i)							x					3
(ii)	x	x	x	x	x	x	x	x		x		187
(iii)					x					x	x	41

Tabelle 4.2: Abstimmungen für Kundenstrategie 2

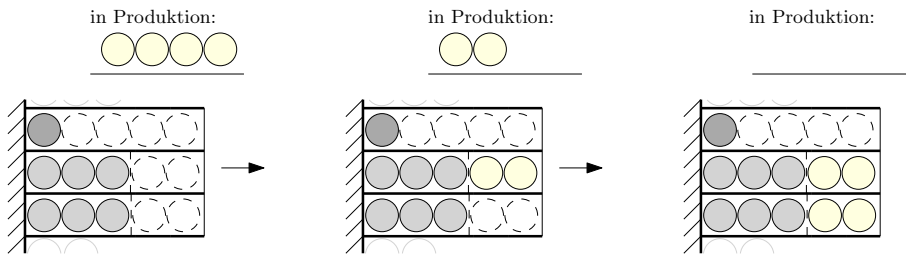
gelagert werden sollen. Dies wird erreicht, indem die Funktion complete(i) für diese Aufträge die Vollständigkeit der Lieferpositionen überprüft. Wenn eine Lieferposition nicht vollständig eingelagert wurde, soll keine andere Rolle davor gestellt werden. Diese Lieferposition soll auch nicht durch Rollen des gleichen Auftrags verstellt werden. In diesem Fall soll ebenfalls erreicht werden, dass der Auftrag verteilt eingelagert wird. Dazu muss der Gewichtungsfaktor γ_{compl} entsprechend hoch angenommen werden. Ein Verstellen von einer nicht vollständig eingelagerten Lieferposition muss somit schlechter bewertet werden, als die Distribution eines Auftrags:

$$\gamma_{\text{compl}} > \gamma_{\text{distr}} + \gamma_{\text{lagerordnung}} \tag{4.7}$$

In Abbildung 4.4 und in Tabelle 4.2 werden Einlagerungen von Aufträgen mit Kundenstrategie 2 dargestellt. Der entsprechende Auftrag soll hier nach Lieferpositionen getrennt eingelagert werden.

Gewichtungsfaktor γ_{distr}: Aufgrund der beiden Bedingungen (4.5) und (4.7) kann die Kundenstrategie 5, ohne zusátzlichen Bedingungen, umgesetzt werden. Nachdem die beiden Gewichtungsfunktionen γ_{compl} und γ_{small} höher als der Faktor γ_{distr} gewählt wurden, wird ein Auftrag nur im Falle von Kundenstrategie 2 und 3 getrennt eingelagert. Andernfalls wird immer versucht die Rollen eines Auftrags zusammenzustellen.

Gewichtungsfaktor γ_{capa}: Die nachfolgenden Bedingungen werden eingeführt, um bei der Einlagerung von Aufträgen gute Entscheidungen im



(a) 4 Rollen in Produktion.

(b) 2 Rollen in Produktion.

(c) Auftrag fertig eingelagert.

Abbildung 4.5: Kapazität: Hier soll ein Auftrag mit 4 Rollen eingelagert werden. Im obersten Streifen wäre es möglich, den gesamten Auftrag einzulagern, jedoch würde ein Konflikt bezüglich der Vollständigkeit des Auftrags entstehen, da dieser noch nicht fertig eingelagert ist. Aufgrund der festgelegten Bedingungen werden die Rollen nun in die unteren beiden Streifen eingelagert. Zuerst erfolgt eine Einlagerung von 2 Rollen in einem Streifen, und anschließend werden die restlichen 2 Rollen in den anderen Streifen abgestellt.

Hinblick auf die Funktion capacity(i) zu treffen. Um dies zu realisieren muss der Gewichtunsfaktor γ_{capa} entsprechend gewählt werden. Diese Funktion ermittelt für einen Auftrag, ob die Rollen die sich noch in Produktion befinden, einen zusätzlichen Streifen für die Einlagerung benötigen. Können nicht alle Rollen des Auftrags ohne einen zusätzlichen Streifen eingelagert werden, so kommt es zu einer Bestrafung der Lagerbewertung. Um dieses Kriterium zu erfüllen, sollte es jedoch nicht dazu kommen, dass ein nicht vollständig eingelagerter Auftrag verstellt wird. Daraus ergibt sich folgende Bedingung:

$$\gamma_{\text{compl}} > \gamma_{\text{capa}} + \gamma_{\text{lagerordnung}} \tag{4.8}$$

In Abbildung 4.5 und der dazugehörigen Tabelle 4.3 wird eine Einlagerung eines Auftrags abgebildet, bei dem es zu Konflikten der Funktion capacity(i) kommt.

Im Fall, dass für die Einlagerung der restlichen Rollen eines Auftrags ein zusätzlicher Streifen benötigt wird, sollte die Einlagerung so erfolgen, dass zuerst der Lagerplatz, indem sich bereits Rollen vom Auftrag befinden, gefüllt wird, und erst dann ein neuer Streifen für die restlichen Rollen er-

i	γ_{order}	γ_{system}	γ_{diff}	γ_{short}	γ_{client}	γ_{article}	γ_{form}	γ_{compl}	γ_{distr}	γ_{capa}	γ_{empty}	$=$
	3	3	1	1	3	3	3	50	20	25	20	
(i)	x	x	x		x	x	x	x				66
(ii)	x	x	x		x	x	x			x		41
(iii)	x	x	x		x	x	x			x		41
(i)	x	x	x		x	x	x	x	x			86
(ii)												
(iii)	x	x	x		x	x	x		x	x		61

Tabelle 4.3: Kapazität

γ_{date}	γ_{small}	γ_{compl}	γ_{capa}	γ_{distr}	γ_{empty}	γ_{order}	γ_{system}	γ_{client}	γ_{article}	γ_{form}	γ_{ship}	γ_{diff}	γ_{short}
150	90	50	25	20	20	3	3	3	3	3	1	1	1

Tabelle 4.4: Gewichtungen

mittelt wird. Dadurch wird folgende Bedingung angeschrieben:

$$\gamma_{\text{capa}} < \gamma_{\text{distr}} + \gamma_{\text{order}} + \gamma_{\text{system}} \tag{4.9}$$

Weiters soll mit der Einlagerung in einen leeren Streifen erst begonnen werden, wenn die Einlagerung der restlichen Rollen in keinem anderen Streifen aufgrund von zu wenig freiem Platz erfolgen kann. Dies wird durch diese Bedingung realisiert:

$$\gamma_{\text{compl}} > \gamma_{\text{capa}} + \gamma_{\text{empty}} \tag{4.10}$$

Nach vielen Tests und Beispielen ergaben sich nun folgende Annahmen der Gewichtungen als optimal, da mit diesen Werten die gewünschten Anforderungen umgesetzt werden können. Alle entsprechenden Annahmen sind in Tabelle 4.4 angegeben.

Kapitel 5

Umlagerungsstrategie

Das Ziel der Umlagerungsstrategie ist, Rollen, die bereits eingelagert wurden, so im Lager umzustellen, dass sich dadurch der Lagerzustand verbessert. Dieser Vorgang ist erwünscht, da es aufgrund des zeitweise hohen Füllstands des Lagers, zu unvermeidlichen Konflikten bei der Einlagerung von Rollen kommt, die auf diese Weise beseitigt werden können. Der Füllstand variiert deshalb sehr stark, da zu Monatsbeginn alle braunen Rollen produziert werden, die für das ganze Monat eingelagert werden müssen. Dadurch kommt es zu einem erheblichen Anstieg des Füllstands (bis zu 90%). Ab der zweiten Woche im Monat wird weißes Papier produziert, das im Vergleich zu den braunen Rollen kürzer eingelagert wird. Da im Verlauf des Monats beide Sorten von Papier ausgelagert werden, jedoch nur mehr weißes Papier eingelagert werden muss, kommt es zu einer Senkung des Lagerfüllstands. Da somit der Füllstand am Monatsbeginn sehr hoch ist, und es weniger Möglichkeiten gibt, eine Rolle im Lager abzustellen, ist es unvermeidlich, dass bei der Einlagerung von Rollen Konflikte entstehen. Eine Einlagerung einer Rolle in einen zur Zeit der Einlagerung optimalen Lagerplatz bedeutet nicht, dass keine Konflikte entstehen, sondern dass mit der Einlagerung in diesen Lagerplatz die Lagerbewertung minimal ist. Deshalb wird die Möglichkeit geschaffen, die vorhandenen Konflikte im Lager, mit Hilfe von Umlagerungen aufzulösen.

Zur Aufhebung der Konflikte im Lager gibt es mehrere Möglichkeiten. Momentan werden Konflikte nur durch Auslagerungen von Rollen beseitigt. Jene Rollen, die die auszulagernden Rollen verstellen, werden beim Umräumen entweder in den unmittelbaren Nachbarstreifen gestellt oder nach den Verladetätigkeiten wieder in den gleichen Lagerplatz zurückgestellt. Werden die Rollen in den gleichen Streifen eingelagert, so kommt es zu einer Verbesserung des Lagerzustands, da zumindest die Konflikte mit den ausgelagerten Rollen beseitigt wurden. Dieses Vorgehen benötigt jedoch einen

höheren Zeitaufwand, da die Rollen zwei mal umgestellt werden müssen. Dadurch werden die problematischen Rollen bei der Auslagerung meist in einen danebenliegenden Streifen gestellt, was in einer einzigen Umlagerung resultiert. Dabei können aber wieder neue Konflikte in den Nachbarlagerplätzen entstehen. Aufgrund dieser Problematik wurde die Möglichkeit von gezielten Umlagerungen eingeführt. Mit Hilfe dieser wird es möglich, für Rollen, die sich im Lager befinden, einen optimalen Lagerplatz zu ermitteln. Beispielsweise wird bei einer einfachen Umlagerung eine Rolle aus einem Streifen genommen (im Zuge einer Auslagerung oder zur Beseitigung von Konflikten) und für diese eine optimale Einlagerung berechnet. Die besten drei Lösungen für die Einlagerung werden anschließend dem Staplerfahrer als Vorschläge angezeigt.

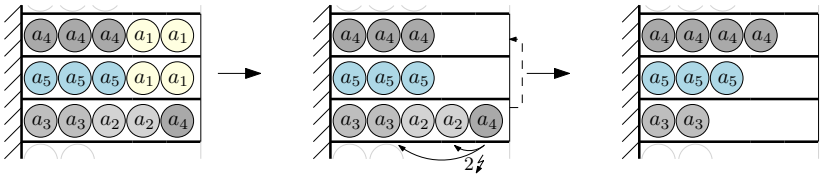
Neben den im Zuge der Auslagerung auftretenden Umlagerungen können solche auch gezielt durchgeführt werden, wenn aktuell keine anderen Tätigkeiten anfallen. Im Allgemeinen werden die Umlagerungen nur von den Staplerfahrern, die für die Auslagerungen eingeteilt sind, durchgeführt.

5.1 Einfache Umlagerung

Eine einfache Umlagerung wird meistens aufgrund von Konflikten bei der Auslagerung eines Auftrags durchgeführt. Das Umstellen der problematischen Rolle erfolgt so, dass sie nicht temporär aus dem Streifen gestellt wird, oder in den nebenan liegenden Streifen, sondern für genau diese Rolle wird eine Einlagerung berechnet, die besagt, in welchem Lagerplatz die Rolle optimal eingelagert werden kann. Um zum Ergebnis für eine Umlagerung zu kommen, wird die entsprechende Rolle aus dem Lagerplatz herausgenommen und es erfolgt eine Aktualisierung des Lagerzustands. Anschließend wird eine Einlagerung mit dieser Rolle und dem neuen Lagerzustand simuliert. Die besten 3 Ergebnisse werden dem Staplerfahrer angezeigt, und die Rolle kann umgehend in einen optimalen Lagerplatz neu eingelagert werden. Klarerweise ist jener Streifen aus dem die Rolle entfernt werden soll, nicht in den Ergebnissen enthalten. In Abbildung 5.1 ist eine derartige Umlagerung exemplarisch dargestellt.

5.2 Beste Verbesserung

Diese Variante der Umlagerung ist im Prinzip eine Erweiterung der einfachen Umlagerung. Bei der einfachen Umlagerung ist der Lagerplatz, aus dem die Rolle entnommen wird, bekannt, und es muss lediglich der Streifen für eine erneute Einlagerung ermittelt werden. Bei der Suche nach der besten



(a) Da Auftrag a_1 von keiner Rolle verstellt wird, kommt es bei der Auslagerung des Auftrags zu keinen Problemen.

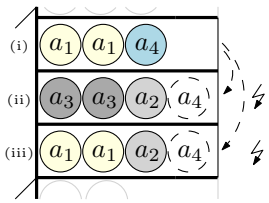
(b) Für die Rolle von a_4 wird eine Umlagerung berechnet, da beim Abstellen im selben Streifen ein weiterer Konflikt entstehen würde.

(c) Die Rolle von a_4 ist in einen optimalen Streifen eingelagert worden und die Auslagerung der restlichen Rollen kann ohne Konflikte erfolgen.

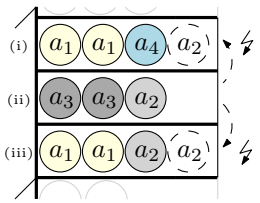
Abbildung 5.1: Hier wird gezeigt, dass es aufgrund eines Konflikts bei der Auslagerung eines Auftrags, zu einer einfachen Umlagerung einer Rolle kommt. Die Ausgangssituation stellt eine Einlagerung dar, bei der aufgrund des hohen Füllgrads des Lagers, Konflikte entstanden sind. Es gilt nun, die einzelnen Aufträge, entsprechend dem Verladedatum ($d_{a_1} < d_{a_2} < d_{a_3} < d_{a_4} < d_{a_5}$) auszulagern. Bei der Auslagerung kommt es erst bei Auftrag a_2 zu einem Konflikt, da dieser von a_4 verstellt wird. Für diese Rolle gilt es, einen neuen Streifen zu ermitteln, da beim Zurückstellen in den gleichen Streifen wieder ein Konflikt mit a_3 entstehen würde.

Verbesserung des Lagerzustands geht es darum, eine Rolle ausfindig zu machen, die aufgrund einer Umlagerung von einem Lagerplatz in einen anderen Lagerplatz die Bewertung des Lagerzustands minimiert. Diese Art der Umlagerung kann erfolgen, wenn es kurze Stehzeiten für die Staplerfahrer, die für die Auslagerungen zuständig sind, gibt. Der Mitarbeiter kann jederzeit eine derartige Umlagerung anfordern und anschließend die entsprechende Umlagerung durchführen. Da die beste Verbesserung immer nur für das Bewegen einer Rolle berechnet wird, kann es sich nur um ein Umstellen der zuletzt eingelagerten Rolle eines Streifens handeln. Somit wird dem Mitarbeiter nur angezeigt, von welchem Lagerplatz er die Rolle nehmen muss, und in welchen sie neu eingelagert werden soll.

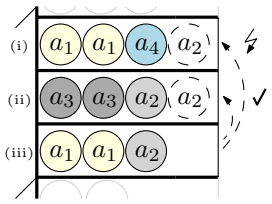
Die Berechnung dieser Umlagerung erfolgt nach dem Prinzip der „best improvement“ Methode. Diese ermittelt alle möglichen Verbesserungen und liefert die beste davon als Lösung zurück. In dem hier vorliegenden Fall, wird nacheinander von jedem Lagerplatz eine Rolle genommen und in allen anderen Lagerplätzen versucht einzulagern. Jene Umlagerung, mit der der minimale Lagerzustand erreicht werden kann, wird als Vorschlag für eine Umlagerung zurückgeliefert. Da der Aufwand einer Umlagerung nicht sehr viel Zeit beansprucht, können diese genutzt werden, um kleine Verbesserungen im Lager vorzunehmen. Gibt es im gesamten Lager keine Möglichkeit mit der Umlagerung einer einzelnen Rolle Verbesserungen zu erzielen, so soll



(a) Das Auslagern von Rolle a_4 aus Streifen(i) bringt eine Verbesserung von einem Datumskonflikt. Dies bedeutet eine enorme Verbesserung, jedoch kann diese Rolle in keinen anderen Lagerplatz ohne Datumskonflikt eingelagert werden. In diesen Fällen würden sogar jeweils 2 Datumskonflikte entstehen. Daher kommt eine Umlagerung von a_4 nicht in Frage.



(b) Die Umlagerung der Rolle von (ii) würde bei der Auslagerung einen Auftragskonflikt beseitigen. Eine Einlagerung in Streifen(i) würde einen Datums- und Auftragskonflikt verursachen. Bei der Einlagerung in (iii) würde der Auftrag a_2 zusammengestellt werden, aber es käme zu einem weiteren Datumskonflikt in dem Streifen.



(c) Die Auslagerung der letzten Rolle von (iii) beseitigt einen Datumskonflikt. Zusätzlich kommt es bei der Einlagerung in Streifen(ii) zu keinen neuen Konflikten. Im Gegenteil, hier kommt es zu einer weiteren Verbesserung, da Rollen des Auftrags a_2 zusammengestellt werden. Die Umlagerung von Streifen(iii) nach (ii) gilt dadurch als beste Verbesserung.

Abbildung 5.2: Hier wird eine Umlagerung nach *best improvement* vorgenommen. Es ist eine beliebige Einlagerung gegeben, und es soll die beste Umlagerung einer Rolle ermittelt werden. In allen Abbildungen gilt für das Verladedatum der Aufträge: $d_{a_1} < d_{a_2} < d_{a_3} < d_{a_4} < d_{a_5}$. Es wird nun der Reihe nach, von jedem Streifen eine Rolle herausgenommen, und eine Einlagerung in die anderen Lagerplätze simuliert. Es ist zu erkennen, dass in manchen Situationen das Herausnehmen einer Rolle aus einem Streifen die gleiche Verbesserung des Lagerzustands bringt, jedoch die erneute Einlagerung der jeweiligen Rollen unterschiedlich gute Ergebnisse liefert. Wenn sich beim Herausnehmen einer Rolle aus einem Streifen Konflikte auflösen, jedoch durch die erneute Einlagerung mehr oder schwerwiegendere Konflikte erzeugt werden, so soll die Umlagerung nicht durchgeführt werden.

keine Umlagerung getätigt werden. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es keine Konflikte im Lager gibt, sondern besagt nur, dass die Konflikte nicht unmittelbar beseitigt werden können. In Abbildung 5.2 wird eine Umlagerung nach „best improvement“ dargestellt.

5.3 Umräumen beliebig vieler Rollen

Mit Hilfe dieser Umlagerungsvariante wird die Möglichkeit geboten, größere Umräumungen zur Konfliktbehebung durchzuführen. Auf diese Art und Weise sollen Stehzeiten, die zum Beispiel an Wochenenden und Feiertagen oder wegen Problemen in der Produktion entstehen, bestmöglich genutzt werden. Aufgrund unterschiedlich langer Stehzeiten wurde diese Variante bezüglich der Anzahl der durchzuführenden Bewegungen bei einer Umlagerung flexibel gestaltet. Dies wurde so gelöst, dass der Staplerfahrer dem System bekannt geben kann, für wie viele Umlagerungen von Rollen er Zeit haben wird, und dementsprechend werden passende Umräumungen berechnet. Das Ergebnis der Berechnungen wird dem Staplerfahrer als Liste von Bewegungen angezeigt, die eingehalten werden müssen, um den gewünschten, verbesserten Lagerzustand nach und nach zu erreichen. Der entwickelte Algorithmus zur Berechnung dieser Umlagerungen basiert auf einer lokalen Suche.

5.3.1 Lokale Suche

Basierend auf der Beobachtung, dass die wiederholte Anwendung von kleinen, lokalen Änderungen auf eine gegebene Startlösung x eines Optimierungsproblem oftmals zu einer kontinuierlichen Verbesserung führt, kann man das Prinzip der Lokalen Suche (engl. *local search*, LS) [5, 20] definieren. Dabei handelt es sich um ein Optimierungsverfahren, dass durch die iterative Ausführung von kleinen, auf einen Teil der aktuellen Lösung beschränkten Verbesserungsschritten zu einer Sequenz von neuen Lösungen x^i kommt, die sich dadurch auszeichnen, dass $f(x^i) > f(x^{i+1})$ gilt, wobei von einem Minimierungsproblem ausgegangen wird und $f(x)$ den Zielfunktionswert einer Lösung x berechnet[1]. Die Menge all jener Lösungen x', die sich von einer gegebenen Ausgangslösung x nur in einigen wenigen Merkmalen unterscheiden, wird auch als Nachbarschaft $\mathcal{N}(x)$ von x bezeichnet. Meist wird eine solche Nachbarschaft nicht explizit definiert sondern eine implizite Beschreibung durch die Anwendung eines oder mehrerer Züge findet statt.

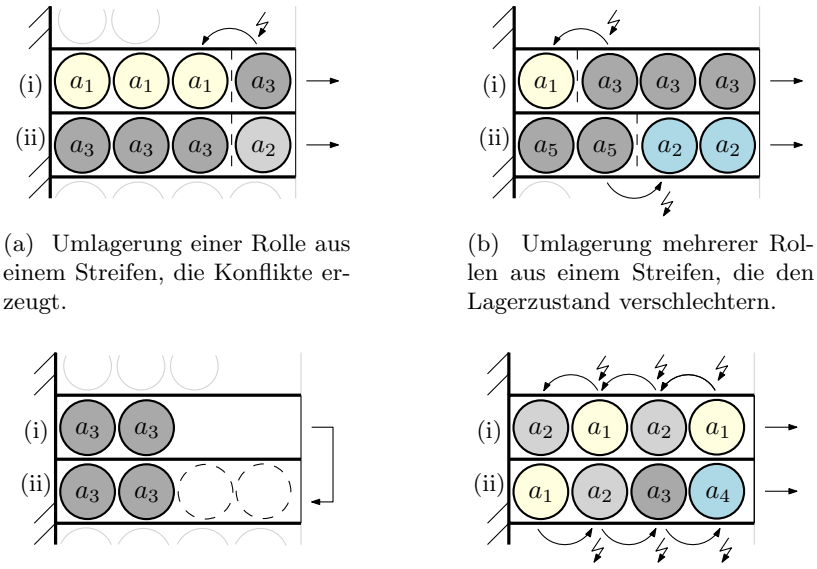
[1] Dieses Prinzip kann auch bei Maximierungsproblemen angewandt werden, da bekanntlich jedes Maximierungsproblem durch Vertauschen des Vorzeichens in der Zielfunktion in ein Minimierungsproblem umgewandelt werden kann.

Dabei versteht man unter einem Zug (engl. *move*) eine Vorschrift, wie man von der gegebenen Lösung x zu anderen Lösungen x' gelangt.

Obwohl die Ausführung einer LS meist sehr effizient möglich ist, leidet sie oftmals darunter, dass die Anzahl der aus einer Lösung x durch iteratives Anwenden von vordefinierten Zügen theoretisch erreichbaren Lösungen x' stark beschränkt ist, und somit die Suche meist in einem lokalen Optimum, das nicht dem globalen Optimum entspricht, stecken bleibt. Um diesen Nachteil überbrücken zu können, wurden unterschiedlichste Verfahren entwickelt, unter anderem LS mit unterschiedlichen Nachbarschaften [8], wiederholte LS (engl. *iterated local search*) [15], simuliertes Abkühlen (engl. *simulated annealing*) [13] und Tabusuche (engl. *tabu search*) [7]. Ein erst relativ junges auf LS basierendes Verfahren ist die sogenannte Variable Nachbarschaftssuche (engl. *variable neighborhood search*, VNS) [10], die dem Konzept des systematischen Durchsuchens unterschiedlichster Nachbarschaften folgt, und als lokales Suchverfahren einen Variablen Nachbarschaftsabstieg (engl. *variable neighborhood descent*, VND) [9, 11] durchführt. Dabei ist die zugrunde liegende Beobachtung, dass ein lokales Optimum bezüglich aller (theoretischen) Nachbarschaftsstrukturen gleichzeitig ein globales Optimum sein muss. Da es aber meist nicht möglich ist, alle Nachbarschaftsstrukturen zu definieren und auch zu durchsuchen, wird, sobald ein lokales Optimum bezüglich aller berücksichtigten Nachbarschaften erreicht wurde, eine oder mehrere Zufallsbewegungen durchgeführt, die dazu verwendet werden, um dem lokalen Optimum zu entkommen. Grundlegende Bausteine einer VNS sind neben den Nachbarschaften die Bereitstellung einer Ausgangslösung und die Definition der Reihenfolge der Nachbarschaftsdurchsuchungen. Es hat sich in letzter Zeit gezeigt, dass besonders der letztere Punkt von großer Bedeutung bei der Anwendung einer VNS ist [11, 19].

5.3.2 Berechnung der Umräumungen

Für das spezielle Problem der Berechnung der Umräumungen im Lager Hamburger-Spremberg, wurden ein auf einer VND basierender Algorithmus und ein an die LS mit unterschiedlichen Nachbarschaften angelehnter Algorithmus entwickelt. Es gilt hier, aufgrund der angegebenen Anzahl der Umlagerungen eine Umräumung zu ermitteln, die den aktuellen Lagerzustand verbessert. Somit gilt der aktuelle Lagerzustand als Startlösung für die Berechnungen. Weiters werden verschiedene Nachbarschaftsstrukturen definiert und es wird festgelegt, in welcher Reihenfolge die Nachbarschaftsstrukturen gewechselt werden. Zusätzlich wird bestimmt, wie die Auswahl der Nachbarlösungen erfolgen wird und es werden passende Abbruchbedingungen definiert.



(a) Umlagerung einer Rolle aus einem Streifen, die Konflikte erzeugt.

(b) Umlagerung mehrerer Rollen aus einem Streifen, die den Lagerzustand verschlechtern.

(c) Zusammenstellen von Rollen eines Auftrags, der verteilt eingelagert worden ist.

(d) Eine Möglichkeit alle Konflikte in einem Streifen auszuräumen.

Abbildung 5.3: Verschiedene Nachbarschaftsstrukturen für die Variable Neighborhood Search, mit denen versucht wird, den aktuellen Lagerzustand zu verbessern.

Nachbarschaftsstrukturen Die Nachbarschaften wurden in diesem Fall dahingehend definiert, dass es möglichst viele verschiedene Varianten von Umlagerungen gibt, die den Lagerzustand verbessern. Die Nachbarschaftsstrukturen unterscheiden sich in ihrer Größe, das heißt, in der Anzahl der Rollen, die umgelagert werden sollen, und in der Art des Konflikts, der versucht wird aufzulösen. Die festgelegten Nachbarschaftsstrukturen werden im folgenden Absatz beschrieben, und sind zusätzlich in Abbildung 5.3 dargestellt.

$\mathcal{N}_1$: Hier gilt es eine einzige Rolle im Lager umzustellen, die im aktuellen Lagerzustand als nicht optimal eingelagert gilt. Aufgrund des LIFO Prinzips der Streifen kann es sich immer nur um die zuletzt eingelagerte Rolle eines Lagerplatzes handeln.

$\mathcal{N}_2$: In dieser Nachbarschaftsstruktur wird versucht, jene Rollen eines Streifens umzulagern, die aufgrund ihrer Einlagerung Konflikte bezüglich des Verladedatums erzeugen. Es ist hier zu beachten, dass aufgrund der Zugriffsreihenfolge nur jene Rollen im Streifen betroffen sind, auf die ohne zusätzlichen Umstellungen von Rollen der Reihe nach zugegriffen werden kann.

$\mathcal{N}_3$: Diese Nachbarschaftsstruktur umfasst all jene Rollen, die am Beginn eines Streifens stehen und im Hinblick auf die Bewertung der Aufträge Konflikte erzeugen. Auch hier gilt zu beachten, dass nur jene Rollen genommen werden können, auf die man beim Auslagern ohne zusätzliche Umlagerungen Zugriff hat.

$\mathcal{N}_4$: Mit Hilfe dieser Nachbarschaftsstruktur soll versucht werden, Aufträge, die verteilt eingelagert worden sind, zusammenzustellen. Sie umfasst alle verteilten Aufträge, für die es möglich und erwünscht ist, die entsprechenden Rollen gemeinsam einzulagern (also alle Aufträge mit Ausnahme jener mit Kundenstrategie 2 und 3). Zusätzlich zu den direkten Zugriffsmöglichkeiten auf die entsprechenden Rollen muss hier beachtet werden, dass in mindestens einem der betroffenen Streifen genügend Platz für das Hinzustellen der anderen Rollen vorhanden ist.

$\mathcal{N}_5$: Diese Nachbarschaftsstruktur enthält jene Rollen eines Streifens, die im Hinblick auf die Reihenfolge der Aufträge Konflikte verursachen. Dadurch werden die Rollen des Streifens umgelagert, die eine Vermischung von verschiedenen Aufträgen bilden. Es kann hier zu einer Umlagerung von lediglich zwei Rollen aber auch zur Auslagerung aller Rollen eines Streifens kommen.

$\mathcal{N}_6$: Mit dieser Nachbarschaftsstruktur wird versucht, schwerwiegende Konflikte im Lager aufzulösen. Daher soll eine Umlagerung für alle Rollen, die sich in einem bestimmten Streifen befinden, durchgeführt werden. Es werden nur jene Streifen in Erwägung gezogen, deren Rollen zumindest einen Konflikt verursachen. Mit Hilfe dieser Nachbarschaft können auch Konflikte aufgehoben werden, die von Rollen, auf die man keine direkte Zugriffsmöglichkeit hat, beseitigt werden.

Auswahl der Nachbarlösung Nach den Definitionen der einzelnen Nachbarschaftsstrukturen gilt es nun festzulegen, wie eine Lösung aus der entsprechenden Nachbarschaftsstruktur ausgewählt werden soll. Es ist an dieser Stelle aufgrund der Forderung eine schnelle Berechnung durchzuführen und der Größe einiger Nachbarschaftsstrukturen (alle Rollen eines Streifens) nicht möglich, diese vollständig durch zugehen und eine beste Nachbarlösung daraus zu wählen. Daher werden zwei Vorgänge zur Auswahl einer Nachbarlösung $x' \in \mathcal{N}_k(x)$ verwendet:

Worst Neighbor Mit Hilfe dieser Funktion wird jene Nachbarlösung aus der entsprechenden Nachbarschaftsstruktur gewählt, die die meisten Strafpunkte in der Bewertung des Lagerzustands ergeben hat. Beispielsweise wird aus der Nachbarschaftsstruktur $\mathcal{N}_6$ jener Streifen im

Lager ausgewählt, der den schlechtesten Wert bezüglich aller Bewertungen hat. Aus $\mathcal{N}_2$ wird jener Streifen genommen, in dem die größte Anzahl aufeinanderfolgender Rollen am Beginn eines Streifens eingelagert sind, die mindestens einen Auftrag im Streifen bezüglich des Verladedatums verstellen. Es wird somit versucht, die schlechteste Einlagersituation der jeweiligen Nachbarschaft durch Umlagerungen zu beheben.

Random Neighbor Hier wird, im Gegensatz zur Auswahlfunktion Worst Neighbor, eine zufällige Nachbarlösung aus der Nachbarschaftsstruktur ausgewählt. Mit dieser zufälligen Auswahl gelingt es, aus eventuell gefundenen lokalen Optima zu kommen. Man kann sich das so vorstellen, dass durch die Umlagerung der am schlechtesten eingelagerten Rollen im Lager nicht zwingend eine Verbesserung erzielt werden muss, sich jedoch durch Umlagern anderer Rollen wieder neue Situationen für weitere Umlagerungen ergeben, die Verbesserungen erzielen. Damit trotzdem schlechtere Einlagerungen bevorzugt gewählt werden, wird die zufällige Auswahl der Nachbarlösung dahin gelenkt, dass die Wahrscheinlichkeit der Auswahl einer Nachbarlösung proportional zur Bewertung der betreffenden Rollen steht. Daraus ergibt sich, dass Rollen, die weniger gut eingelagert worden sind, mit einer höheren Wahrscheinlichkeit gewählt werden.

Reihenfolge der Nachbarschaftsstrukturen Eine entscheidende Rolle in diesen Berechnungen stellt die Reihenfolge der Durchsuchung der Nachbarschaftsstrukturen dar. Mit ihr kann man festlegen, aus welchen Nachbarschaftsstrukturen eine Nachbarlösung für eine Umlagerung genommen werden soll. Um möglichst gute Ergebnisse für eine Umlagerung zu erlangen, wurden zwei verschiedene Anordnungen der Nachbarschaftsstrukturen überlegt. Daraus ergeben sich auch zwei verschiedene Varianten der VNS, die in den Kapiteln 5.3.3 und 5.3.4 erklärt werden. Es handelt sich hierbei um eine systematische und eine zufällige Anordnung der Nachbarschaftsstrukturen:

Systematisch Es wird hier prinzipiell nach einer klassischen VND [9, 11] vorgegangen. Die Idee einer VND basiert auf einem systematischen Wechseln von verschiedenen Nachbarschaftsstrukturen $\mathcal{N}_1, \ldots, \mathcal{N}_{k_{max}}$. Es wird von einer beliebigen Startlösung x ausgegangen und mit der Suche in der ersten Nachbarschaftsstruktur $\mathcal{N}_1$ begonnen. Hierbei erfolgt eine LS mit üblicherweise *best* oder *next improvement*, bis keine Verbesserungen mehr gefunden werden können. Von diesem lokalen Optimum wird eine LS in der nächsten Nachbarschaft $\mathcal{N}_2$ durchgeführt. Wird eine Verbesserung in dieser Nachbarschaft gefunden,

so wird anschließend wieder in die ursprüngliche Nachbarschaft $\mathcal{N}_1$ gewechselt. Trifft dies nicht zu, so wird mit der nächsten Nachbarschaft $\mathcal{N}_3$ fortgefahren. Dies wird so lange durchgeführt, bis die letzte Nachbarschaftsstruktur $\mathcal{N}_{k_{max}}$ erreicht wird und keine Verbesserungen mehr gefunden werden. Dadurch wird eine Lösung erreicht, die in allen Nachbarschaftsstrukturen ein lokales Optimum ist.

Der Unterschied zum Vorgehen der klassischen VND und der Anwendung in unserer Arbeit liegt darin, dass die einzelnen Nachbarschaftsstrukturen nicht vollständig durchsucht werden. Das heißt, die Auswahl der Lösung erfolgt nicht nach *best* oder *next improvement*, sondern nach den oben vorgestellten Auswahlmöglichkeiten *Worst* oder *Random Neighbor*.

Zufällig Da sich das Lager bei den Berechnungen immer in einem anderen Ausgangszustand befindet und es dadurch immer andere Konfliktsituationen gibt, ist es bei den Ermittlungen entscheidend, auf alle möglichen Fälle einzugehen. Dadurch erweist sich eine LS mit unterschiedlichen Nachbarschaften [8] als praktikabel. Es wird von einer beliebigen Startlösung x ausgegangen und es sind verschiedene Nachbarschaftsstrukturen $\mathcal{N}_1, \ldots, \mathcal{N}_n$ gegeben. In jeder Iteration wird versucht, eine Verbesserung mit einer Nachbarlösung x', aus einer zufällig gewählten Nachbarschaft $\mathcal{N}_i \in \{\mathcal{N}_1, \ldots, \mathcal{N}_n\}$ zu erzielen. Kann mit dieser Lösung x' eine Verbesserung des Lagerzustands erlangt werden $(\mathrm{Z}(x')) < \mathrm{Z}(x))$, so wird sie übernommen $(x \leftarrow x')$ und gilt nun als neue Ausgangslösung x. Erreicht man mit dieser Lösung keine Verbesserung, so wird sie verworfen. In beiden Fällen kommt es in der nächsten Iteration erneut zu einer zufälligen Auswahl einer Nachbarschaftsstrutktur $\mathcal{N}_{i'} \in \{\mathcal{N}_1, \ldots, \mathcal{N}_n\}$. Die Suche wird beendet, wenn entweder eine gültige Lösung gefunden wurde oder ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Das Abbruchkriterium sieht in unserem Fall so aus, dass eine Nachbarschaft $\mathcal{N}_i$, die über mehrere Iterationen keine Verbesserung bringt, aus der Menge der auszuwählenden Nachbarschaften fällt.

Da nun alle Vorgehensweisen und Auswahlverfahren definiert und beschrieben wurden, werden nun zwei Algorithmen vorgestellt, die die oben definierten Anordnungen und Auswahlverfahren anwenden.

5.3.3 Variable Neighborhood Descent (VND)

Ziel des hier vorgestellten Algorithmus ist, anhand des aktuellen Lagerzustands und der gewünschten Anzahl der Bewegungen eine bestmögliche Umlagerung zu ermitteln. Diese Variante ist betreffend der Anordnung der

Nachbarschaftsstrukturen stark an eine VND angelehnt. Auch hier werden die einzelnen Nachbarschaftsstrukturen systematisch gewechselt. Der Unterschied liegt in der Auswahl der Nachbarlösung aus einer Nachbarschaftsstruktur, da in dieser Variante, im Gegensatz zur VND, nicht die gesamte Nachbarschaftsstruktur bis zum lokalen Optimum durchsucht wird.

Ausgangssituation Die Anordnung der einzelnen Nachbarschaftsstrukturen $\mathcal{N}_1, \ldots, \mathcal{N}_6$ erfolgt nach der oben definierten Reihenfolge. Grundsätzlich kann man sagen, dass die Nachbarschaftsstrukturen der Größe nach angeordnet wurden, wobei mit der Größe hier die Anzahl der umzulagernden Rollen gemeint ist. Dies ist auch der Grund für die gewählte Reihenfolge der Nachbarschaftsstrukturen, da so zuerst kleine Umlagerungen berechnet werden, deren Zeitaufwand geringer ist. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass zum Beispiel bei der Umlagerung aller Rollen in einem Streifen ($\mathcal{N}_6$) die Anzahl der bewegten Rollen größer ist, als in einer anderen Nachbarschaft. Dennoch kann es vorkommen, dass aufgrund der aktuellen Gegebenheiten die Anzahl der berücksichtigten Rollen kleiner ist, als in anderen Nachbarschaften. Die Reihenfolge der Nachbarschaftsdurchsuchungen bleibt davon aber unbeeinflusst.

Die Auswahl der Nachbarlösung $x' \in \mathcal{N}_k(x)$ aus einer Nachbarschaftsstruktur erfolgt nach der *Worst Neighbor* Methode, bei der jene Rolle bzw. Rollen bezüglich der Nachbarschaft ausgewählt werden, mit denen beim Herausnehmen der beste Lagerzustand erreicht werden kann. Kommt es zu der Situation, dass es mehrere gleichwertige Lösungen gibt, so wird die erste gefundene Lösung genommen. Durch Anwenden dieser Methode will man erreichen, dass die Konflikte mit den höhsten Bestrafungen aufgelöst werden. Als Startlösung x gilt jener Zustand, in dem sich das Lager zum Zeitpunkt der Anforderung für die Berechnung einer Umräumung befindet.

Ablauf Angestoßen wird die Berechnung durch die Anforderung einer Umräumung für eine bestimmte Anzahl von Rollen durch den zuständigen Staplerfahrer. Das Ziel ist nun, anhand der übergebenen Anzahl an Bewegungen eine Umlagerung zu berechnen.

Der Ablauf sieht so aus, dass mit der Auswahl einer Nachbarlösung x' aus der Nachbarschaftsstruktur $\mathcal{N}_1(x)$ begonnen wird. Zur Auswahl der Nachbarlösung x' ist hier anzumerken, dass die Anzahl der Rollen, die umgestellt werden müssen, um den Lagerzustand x' aus x zu erreichen, kleiner gleich der Anzahl, der noch zur Verfügung stehenden Bewegungen sein muss. Trifft dies nicht zu, so wird diese Lösung sofort verworfen. Die Idee dahinter ist, für von vornherein ungültige Lösungen keine Berechnungen durchzuführen [14]. Im Falle der Nachbarschaftsstruktur $\mathcal{N}_1$ wird nun versucht, jene zuletzt

eingelagerte Rolle eines Streifens umzulagern, die die meisten Bestrafungspunkte in der Bewertung erhalten hat. Liefert die Bewertung von x' ein besseres Ergebnis als vom Lagerzustand x, so wird diese Umlagerung übernommen, die Anzahl der noch zur Verfügung stehenden Bewegungen verringert und die Auswahl der nächsten Nachbarlösung x' wird in der selben Nachbarschaftsstruktur $\mathcal{N}_1$ getätigt.

An dieser Stelle ist noch zu sagen, dass alle Zwischenschritte zu besseren Zuständen führen müssen, um übernommen zu werden. Diese Überlegung kommt daher, dass es vorkommen kann, dass ein Staplerfahrer aufgrund überraschend auftretender Situationen die Umlagerung abbrechen muss und so das Lager in einem schlechteren Zustand zurücklassen würde. Erreicht man keine Verbesserung der Bewertung des Lagerzustands mit x', so kommt es zu einem Wechsel in die nächstgrößere Nachbarschaftsstruktur, in unserem Falle $\mathcal{N}_2$. Hier wird erneut eine Nachbarlösung gewählt und überprüft, ob sich der Lagerzustand dadurch verbessert hat. Wird hier eine entsprechende Umlagerung gefunden, wird erneut nach $\mathcal{N}_1$ gewechselt und der Vorgang beginnt von Neuem. Ist dies nicht der Fall, so wird in die wiederum nächste Nachbarschaftsstruktur $\mathcal{N}_3$ gewechselt.

Diese Durchläufe werden solange wiederholt, bis entweder eine Liste von Umlagerungen von Rollen erstellt worden ist, die der gewünschten Anzahl entspricht oder in keiner Nachbarschaftsstruktur eine Lösung gefunden werden konnte, die eine Verbesserung des Lagerzustands erreicht. Der Pseudocode ist in Algorithmus 1 dargestellt.

Algorithmus 1 VND (x, moves)

```
Ergebnisliste E = [ ]
Nachbarschaftsstrukturen N_1, ..., N_6
k ← 1
repeat
    wähle x' mittels Worst Neighbor, wobei x' ∈ N_k(x) und
        die Anzahl der dadurch umzulagernden Rollen ≤ moves
    if Z(x') < Z(x) then
        moves -= Anzahl der umgelagerten Rollen
        x ← x'
        insert (E, Liste der durchgeführten Umlagerungen)
        k ← 1
    else
        k ← k + 1
until k > 6 or moves ≤ 0
return E
```

Diese Variante brachte durchaus Verbesserungen des Lagerzustands. Es ist jedoch zu der Problematik kommen, dass am Beginn viele einzelne Rollen umgelagert wurden, und somit beim Erreichen der großen Nachbarschaftsstrukturen (beispielsweise $\mathcal{N}_6$) die Anzahl der noch vorhandenen Bewegungen zu klein war, um entsprechende Umräumungen durchführen zu können. Deshalb wurde auch versucht, die Nachbarschaftsstrukturen in umgekehrter Reihenfolge $\mathcal{N}_6, \ldots, \mathcal{N}_1$ anzuordnen. Aber auch diese Variante brachte nicht die gewünschten Verbesserungen. Daher wurde eine weitere Variante entwickelt.

5.3.4 Randomized VND (RVND)

Durch die Implementierung der ersten Variante (VND) und zahlreiche Tests konnte man erkennen, dass die systematische Anordnung der Nachbarschaftsstrukturen die größte Problematik darstellt. Das kommt daher, dass es derartig viele verschiedene Einlagersituationen und Konflikte gibt, die durch diese strikte Anordnung der Nachbarschaftsstrukturen nicht zu beheben waren. Daher wurde eine Randomized VND entwickelt, die das Augenmerk auf die Behebung dieser Punkte legt.

Ausgangssituation Im Gegensatz zu einer starren und unveränderlichen Anordnung der Nachbarschaften wird hier von einer veränderlichen Anordnung ausgegangen, wobei die Auswahl letztlich zufällig passiert. Somit erreicht man, dass immer andere Kombinationen von Umlagerungen durchgeführt werden und so besser auf die verschiedensten Situationen im Lager eingegangen werden kann.

Nach der zufälligen Auswahl einer Nachbarschaftsstruktur wird aus dieser eine entsprechende Nachbarlösung gewählt. Dies erfolgt wiederum zufällig nach der *Worst Neighborhood* oder *Random Neighborhood* Methode. Das bedeutet, dass nicht immer nur jene Rollen versucht werden umzulagern, die die schlechtesten Bewertungen bei der Einlagerung verursacht haben, sondern es werden auch andere schlecht eingelagerte Rollen betrachtet. Auf diese Art und Weise ist es möglich, mehrere verschiedene Kombinationen von Umlagerungen zu probieren. Die Startlösung x entspricht auch hier wieder dem aktuellen Lagerzustand.

Ablauf Die Berechnungen für die Umlagerung werden vom Staplerfahrer für eine bestimmte Anzahl von Bewegungen angestoßen. Begonnen wird nun mit der zufälligen Auswahl einer Nachbarschaftsstruktur $\mathcal{N}_i \in \{\mathcal{N}_1, \ldots, \mathcal{N}_6\}$, aus der dann eine Nachbarlösung $x' \in \mathcal{N}_i(x)$ wiederum zufällig mit *Worst Neighbor* oder *Random Neighbor* gewählt wird. Ist die Anzahl der Rollen die

umgelagert werden müssen um x' zu erreichen kleiner gleich der Anzahl der noch zur Verfügung stehenden Bewegungen, so wird überprüft, ob sich der Lagerzustand verbessert hat. Trifft dies zu, so werden die vorgenommenen Umlagerungen übernommen und gespeichert ($x \leftarrow x'$). Es werden jedoch auch in dieser Variante keine schlechteren Lagerzustände zugelassen. Deshalb kann die Situation eintreten, dass eine kleine Anzahl an Bewegungen übrig bleibt, mit denen in keiner Nachbarschaftsstruktur Verbesserungen erreicht werden können. Im nächsten Durchgang kommt es dann erneut zur Auswahl einer zufälligen Nachbarschaftsstruktur und dem Versuch eine neue, bessere Lösung x' zu finden.

Da es hier, aufgrund der zufälligen Reihenfolge der Nachbarschaftsstrukturen, nicht sinnvoll ist, die Berechnungen nach Durchsuchen aller Nachbarschaftsstrukturen abzubrechen, wird folgendermaßen vorgegangen. Es wird für jede Nachbarschaftsstruktur ein Zähler t_i größer 0 initialisiert, der sich um 1 verringert, wenn eine Umlagerung $x' \in \mathcal{N}_i$ keine Verbesserung erzielt. Erreicht ein Zähler einer Nachbarschaftsstruktur den Wert 0, so fällt diese aus den Auswahlmöglichkeiten für den nächsten Durchgang. Diese Zähler wurden eingeführt, damit eine Nachbarschaftsstruktur nicht sofort (wenn es keine Verbesserung gibt) aus der Auswahl fällt, da es vorkommen kann, dass sie zu einem späterem Zeitpunkt (auf einem neuen Lagerzustand, der durch Umlagerungen erreicht wurde) durchaus noch Verbesserungen bringen kann. Experimente haben gezeigt, dass sich 10 als Initialwert für die Zähler als gut erwiesen hat. Größere Werte erhöhen die Laufzeit ohne signifikant bessere Ergebnisse zu liefern, während kleinere Werte zu oft in lokalen Optima hängen bleiben.

Daraus ergibt sich, dass der Vorgang entweder durch das Erreichen der entsprechenden Anzahl von Bewegungen beendet wird, oder wenn die Zähler aller Nachbarschaftsstrukturen den Wert 0 erreicht haben. Aufgrund der vielen verschiedenen Möglichkeiten, die sich durch die zufällige Anordnung der Nachbarschaftsstrukturen ergeben, werden eine bestimmte Anzahl an gesamten Durchläufen berechnet, und das beste Ergebnis davon zurückgeliefert. Es wurden verschiedene Werte für die Anzahl der Durchläufe getestet, und ein Wert von 70 ergab einen guten Kompromiss zwischen Laufzeit und Ergebnissen. Der resultierende Pseudocode ist in Algorithmus 2 dargestellt.

Algorithmus 2 RVND (x, moves)

```
Bestes Ergebnis E_best = [ ]
round ← 70
while round > 0 do
    Ergebnis E_tmp = [ ]
    N = {N_1, ..., N_6}
    t_1, ..., t_6 ← 10
    repeat
        wähle zufällig ein N_i ∈ N
        wähle zufällige Schrittfunktion s ← Random || Worst Neighbor
        wähle x' mit s, wobei x' ∈ N_i(x) und
            Anzahl der dadurch umzulagernden Rollen ≤ moves
        if Z(x') < Z(x) then
            moves -= Anzahl der umgelagerten Rollen
            x ← x'
            insert (E_tmp, Liste der durchgeführten Umlagerungen)
        else
            t_i ← t_i − 1
            if t_i = 0 then
                N ← N \ N_i
    until moves ≤ 0 or N = ∅
    if E_tmp < E_best then
        E_best ← E_tmp
    round ← round − 1
return E_best
```

Kapitel 6

Ergebnisse

6.1 Einlagerungen

Um die Qualität des von uns entwickelten Prototyps zu testen, sind eine Reihe von Experimente durchgeführt worden, deren Ergebnisse wir an dieser Stelle präsentieren möchten.

Testdaten Zu den Testdaten ist zu sagen, dass es leider nicht möglich war, Daten des Lagers über einen längeren Zeitraum zu erlangen. Es wurde uns ein Abbild der Datenbank des Lagers zur Verfügung gestellt, das einen Lagerzustand darstellt, der nach dem herkömmlichen Einlagerungsprozess erreicht wurde. Dieses Lager umfasst 2304 Rollen, was einem Füllgrad von circa 55% entspricht. Weiters bekamen wir eine Testinstanz mit 7000 Rollen, die zu Testzwecken noch zusätzlich in das Lager eingelagert werden können.

Vergleich der Lagerzustände Die ersten Tests wurden mit den Daten des zur Verfügung stehenden Datenbankdumps durchgeführt. Im ersten Schritt wurde dieser Lagerzustand mit der von uns entwickelten Zielfunktion zur Bewertung des Lagerzustands bewertet. Dies ergab eine Bewertung von 140.104 Strafpunkten. Um zu verdeutlichen, welche Verbesserung durch eine Einlagerung nach der entwickelten Einlagerungsstrategie erzielt werden konnte, wurde eine Auslagerung der gesamten Rollen im Lager sowie eine Einlagerung nach der hier vorgestellten Einlagerungsstrategie simuliert. Dadurch ergab sich ein neuer Lagerzustand von 14.018 Strafpunkten. Diese beiden Werte sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Weiters kann man dieser Abbildung den Verlauf der Bewertung des Lagerzustands beim Einlagern jeder Rolle entnehmen. Zusätzlich wurde zu Testzwecken eine Auslagerung der Rollen simuliert, die die Rollen nach Verladedatum und Auftrag sortiert

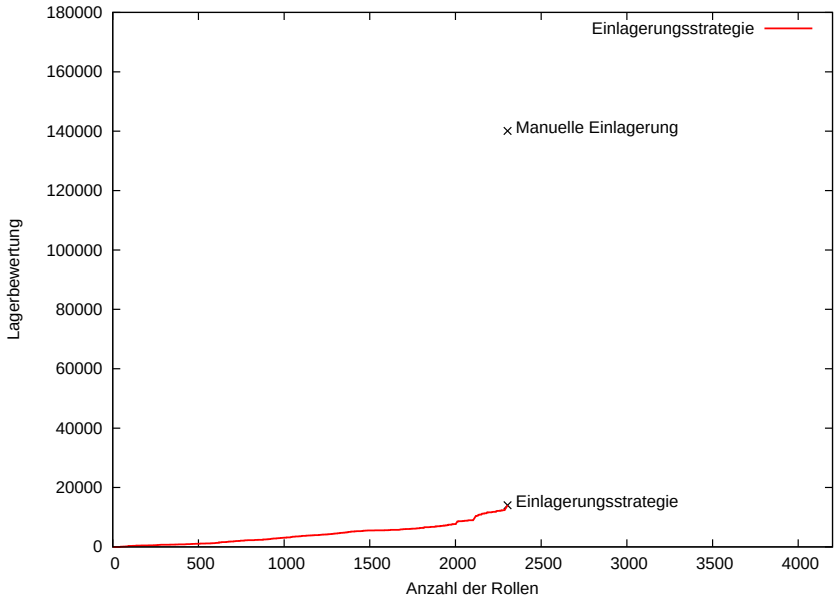


Abbildung 6.1: Der Punkt "Manuelle Einlagerung" markiert das Ergebnis der Bewertung eines manuell eingelagerten Lagers, während die mit "Einlagerungsstrategie" benannte Linie den Lagerzustand nach der Einlagerung der selben Rollen mit Hilfe der entwickelten Einlagerungsstrategie zeigt.

auslagert und die auftretenden Konflikte zählt. Die Anzahl dieser Konflikte entspricht den notwendigen Umstellungen von Rollen bei der Verladung. Hierbei konnte festgestellt werden, dass es bei der Auslagerung der Rollen des manuell eingelagerten Lagers zu 239 Konflikten kam, hingegen die Auslagerung der Rollen des neuen Lagers ohne Konflikte getätigt werden konnte. Daraus ergibt sich, dass es bei einem Füllgrad von circa 55% keine Schwierigkeiten gibt, einen guten Lagerzustand mit Hilfe der Einlagerungsstrategie zu erzielen.

Anstieg des Füllstands Weitere Tests beschäftigten sich damit, wie sich der Anstieg der Bewertung des Lagerzustands mit dem Wachsen des Füllstands verhält. Hierfür wurde das ursprüngliche Lager ausgeräumt und solange mit unterschiedlichen Rollen der Testinstanz befüllt, bis ein Füllgrad von 100% erreicht wurde. Dies wurde mit 3 verschiedenen Instanzen durchgeführt, die sich aus einer zufälligen Auswahl von Rollen der Testinstanz ergeben haben. Der Verlauf der Bewertungen beim Einlagern jeder Rolle kann in Abbildung 6.2 nachvollzogen werden. Es ist hier gut zu sehen, dass die Bewertungen bei einem Füllgrad von circa 70% (entspricht in etwa 3000 Rollen) zu steigen beginnen und schließlich bei einem Füllgrad von über 90% deutlich merkbar zunehmen. Es kann an dieser Stelle noch einmal der

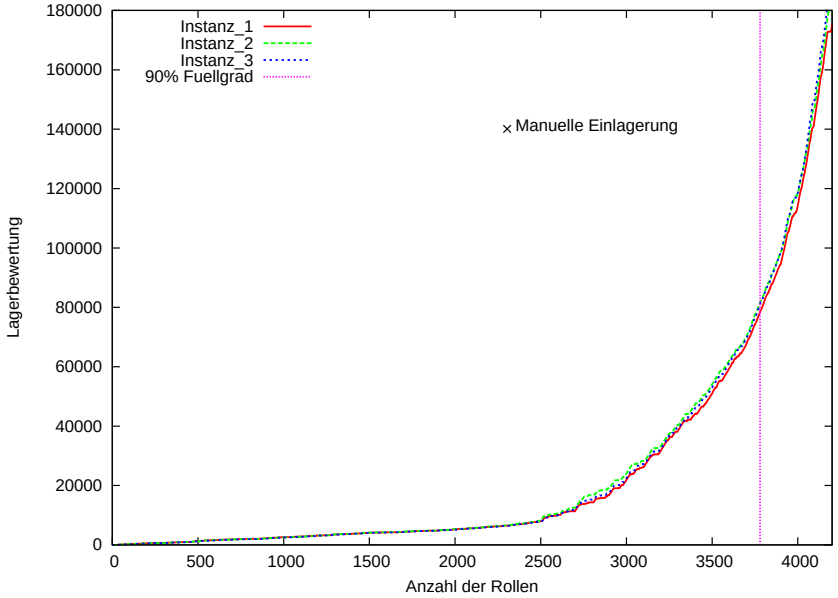


Abbildung 6.2: Hier ist zu sehen, wie sich der Lagerzustand durch Ansteigen des Füllgrads zunehmend verschlechtert. Es kann jedoch aufgrund der neuen Einlagerungsstrategie sogar bei einem Füllgrad von 90% ein besserer Lagerzustand erreicht werden, als mit dem manuell eingelagerten Lager mit einem Füllgrad von circa 50%.

Vergleich zum herkömmlichen Lagerzustand gemacht werden, der den Unterschied in der Qualität der Einlagerungen deutlich zeigt. Es ist ersichtlich, dass mit den Einlagerungen aller drei Instanzen zu dem Zeitpunkt, zu dem sich 2304 Rollen im Lager befinden, einen deutlich besseren Lagerzustand erzielt wurde. Weiters kann auch beobachtet werden, dass sogar bei einem Füllgrad von 90% die Bewertung des Lagers wesentlich besser ist, als die Bewertung des Zustands der manuellen Einlagerung.

6.2 Umlagerungen

Um Festzustellen, welche Verbesserungen des Lagerzustands die Umlagerungen vollbringen, wurden zahlreiche Experimenten durchgeführt. Es standen generell aber die selben Testdaten, wie für die Tests der Einlagerungen, zur Verfügung.

Umlagerungen ausgehend vom alten Lagerzustand Bei diesen Tests wurden eine Reihe von Umlagerungen am manuell eingelagerten Lager durch-

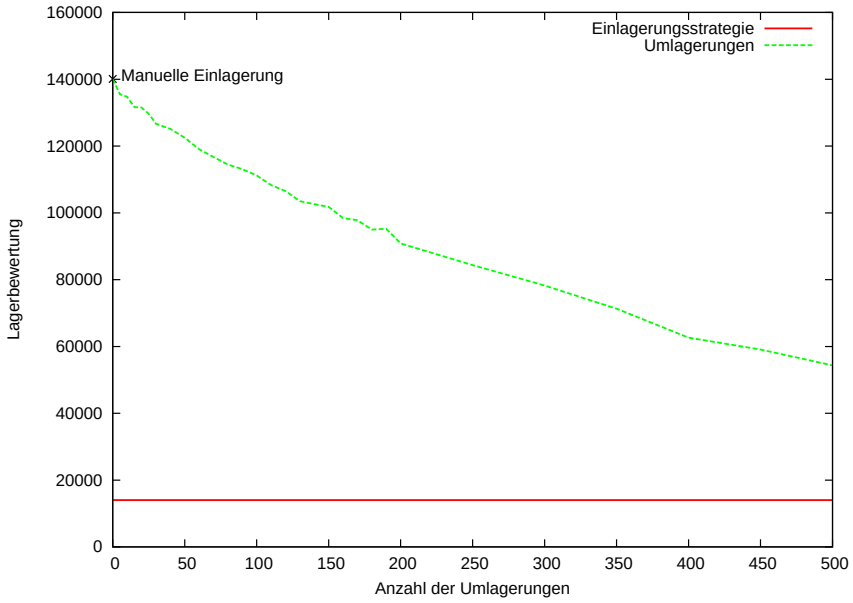
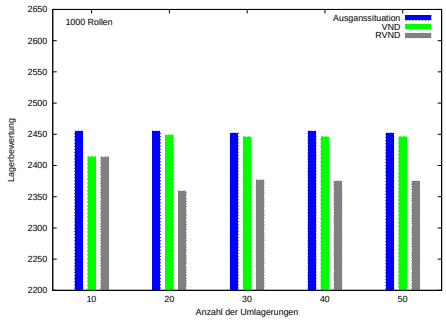


Abbildung 6.3: Verbesserung des manuell eingelagerten Lagerzustands durch eine Reihe verschieden umfangreicher Umlagerungen mit RVND.

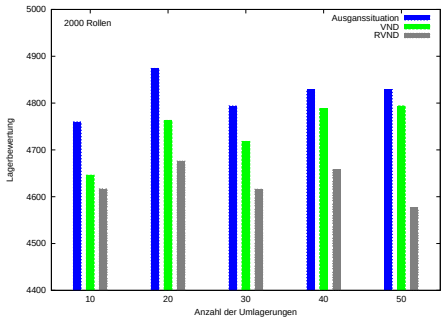
geführt, mit dem Ziel, durch Ein- und Umlagerungen entstandene Konflikte aufzulösen. Zu beachten ist hier, dass für Testzwecke Umlagerungen mit bis zu 500 Rollen durchgeführt wurden, was jedoch in der Praxis nicht umgesetzt werden kann, da derartig große Umlagerungen aus Zeitgründen nicht getätigt werden können. Für das Umlagern einer Rolle wird eine Zeit von mindestens 3 Minuten gerechnet. Dies ergibt sich aus der Anfahrtszeit zum entsprechenden Lagerplatz, dem Aufnehmen der Rolle und dem erneuten Einlagern. Würde man also eine Umlagerung von 500 Rollen durchführen, bräuchte man dafür mindestens 25 Stunden Zeit. Daher werden Umlagerungen in der Praxis für maximal 50 Rollen angefordert, was einem Zeitaufwand von in etwa 2-3 Stunden entspricht.

In Abbildung 6.3 wird dargestellt, wie sich der Lagerzustand durch eine immer größer werdende Anzahl von Umlagerungen verbessert. Es ist jedoch nicht möglich, an jenen Wert des Lagerzustands heranzukommen, der sich durch eine von Beginn an gute Einlagerung ergeben hat (diesen Wert von 14.018 markiert die rote Linie in Abbildung 6.3). Bei den Tests wurden 10 Umlagerungen bis zu einer Anzahl von 500 Rollen durchgeführt und der Mittelwert daraus berechnet.

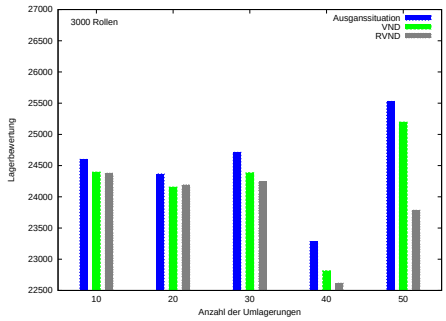
Umlagerungen nach Anwendung der neuen Einlagerungsstrategie
Abschließend wurden noch Tests durchgeführt, die Umlagerungen mit den



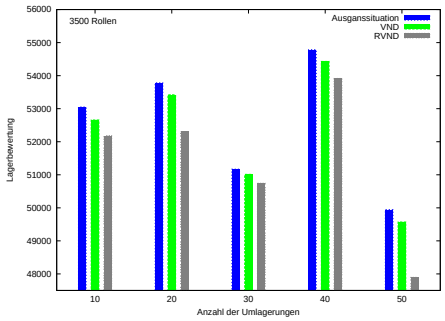
(a) 1000 Rollen



(b) 2000 Rollen



(c) 3000 Rollen



(d) 3500 Rollen

Abbildung 6.4: Hier werden die Ergebnisse der beiden Algorithmen (VND und RVND) verglichen, die durch Umlagerungen von 10, 20, 30, 40 und 50 Rollen, auf einem Lager mit unterschiedlichem Füllstand, entstehen. In den Abbildungen wird der aktuelle Lagerzustand (blau) gezeigt, und im Vergleich dazu sind die Lagerzustände nach den Umlagerungen mit VND (grün) und RVND (grau) zu sehen.

beiden entwickelten Algorithmen (VND 1 und RVND 2) auf einem Lagerzustand, der sich durch Anwendung unserer Einlagerungsstrategie ergeben hat, durchführen. Für einen Testdurchlauf wurde das gesamte Lager leer geräumt und eine bestimmte Anzahl von Rollen (1000, 2000, 3000 und 3500) nach der Einlagerungsstrategie neu eingelagert. Vor der Einlagerung wurde ein eigens implementiertes Mischverfahren auf die entsprechenden Rollen angewandt, welches die nicht geordnete Reihenfolge, in der die Rollen ins Lager kommen, simulieren soll. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Lagerzustände, von denen ausgegangen wird. Danach wurden auf jedem dieser sich ergebenden Lagerzustände Umlagerungen durchgeführt. Es wurden für jede Variante (VND und RVND) Umlagerungen von 10, 20, 30, 40 und 50 Bewegungen ausgeführt. Dies wurde für jede Kombination 10 mal durchgeführt, und die durchschnittlichen Ergebnisse sind in Abbildung 6.4 ersichtlich.

Anzahl der Rollen	1000		2000		3000	
m	RVND	VND	RVND	VND	RVND	VND
10	47	1	26	1	38	3
20	78	1	38	2	61	6
30	134	1	65	4	79	9
40	177	2	137	8	136	11
50	196	3	164	11	166	15

Tabelle 6.1: Performanz: m stellt die Anzahl der Bewegungen für eine Umlagerung dar; die Zeiten sind in Sekunden angegeben.

Aus den Graphen von Abbildung 6.4 kann entnommen werden, dass Umlagerungen immer zu Verbesserungen führen, jedoch mit unterschiedlichem Umfang. Es ist zu sehen, dass Umlagerungen nach einer guten Einlagerung nie an das Ausmaß an Verbesserungen herankommen, wie sie bei Umlagerungen in einem manuell eingelagerten Lager aufgetreten sind (Verbesserung von circa 15%, bei einer Umlagerung von 50 Rollen). Weiters ist hier zu sehen, dass die Verbesserungen bei einem Füllstand von 1000 (Abb. 6.4a) und 2000 Rollen (Abb. 6.4b) wesentlich niedriger sind, als bei einem Füllstand von 3000 Rollen (Abb. 6.4c). Dies kommt daher, dass bis zu einem Füllgrad von circa 60% Einlagerungen ohne größere Konflikte durchgeführt werden können. Weiters ist zu erkennen, dass sich Umlagerungen bei einem Füllstand von 3500 Rollen als schwierig erweisen. Auch hier kommt es zu weniger Verbesserungen als bei einem Zustand von 3000 Rollen. Dies kommt daher, dass es mit 3500 Rollen im Lager aus Platzgründen schwierig ist, eine Rolle in einen anderen besseren Lagerplatz abzustellen.

Aus Abbildung 6.4 kann auch entnommen werden, dass die Berechnungen für die Umlagerungen mit RVND meist zu einem besseren Ergebnis führen, als Umlagerungen die mit Algorithmus 1 (VND) durchgeführt worden sind. Nur in seltenen Fällen kommt es dazu, dass eine VND die besseren Werte liefert als RVND.

6.3 Performanz

Durch den Einsatz des Programms in der Praxis ist die Performanz von großer Bedeutung, deshalb wurden Experimente dahingehend durchgeführt. Im ersten Schritt wurde getestet, wie viel Zeit für die Berechnung der Einlagerungsvorschläge benötigt wird. Es wurden die Zeiten von Berechnungen für Einlagerungen in ein Lager mit einem Füllstand von 500, 1000, 2000, 3000 und 4000 Rollen gemessen. Dies ergab, dass für die Berechnungen der Vorschläge in keinem Fall mehr als 140 Millisekunden benötigt wurden.

Es wurden auch Zeitmessungen von verschiedenen Umlagerungen durchgeführt. Die Messungen wurden für Umlagerungen von 10, 20, 30, 40 und 50 Bewegungen und auf Lager mit einem Füllstand von 1000, 2000, 3000 Rollen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass für keine Berechnung länger als 4 Minuten gebraucht worden ist. Die genauen Zeiten der Umlagerungen sind in Tabelle 6.1 abzulesen.

6.4 Einsatz im Lager Hamburger-Spremberg

Die Firma Dataphone entwickelte und installierte das gesamte Informations- und Scannsystem im Lager Hamburger-Spremberg. Von uns wurde ein Prototyp (Implementierung in Java) entwickelt, der die eingeführten Strategien umsetzt, und in das System von Mitarbeitern der Firma Dataphone eingepflegt wurde. Die Einführung des Systems erfolgte im Juli 2008. Zu Beginn gab es von Seiten der Lagerleitung kleine Änderungsanforderungen, die jedoch durch die Anpassung einiger Gewichtungen rasch und problemlos umgesetzt werden konnten. Nach einigen anfänglichen Schwierigkeiten, läuft das System jetzt stabil.

Aufgrund der vielen Probleme bei der Einlagerung nach dem herkömmlichen Einlagerungsprozess, wurden gleich nach der Einführung des Systems die Berechnung für die Vorschläge der Einlagerungen eingesetzt. Man erwartete sich, dass die Staplerfahrer dem System skeptisch gegenübertreten werden, machte jedoch die Erfahrung, dass diese rasch die Handhabung des Systems lernten, und die Akzeptanz der Einlagervorschläge sehr hoch war. Somit wurden in den letzten Monaten die Einlagerungen fast zur Gänze nach den berechneten Vorschlägen getätigt. Es kam nur dann zu einem Übergehen der Vorschläge, wenn der Staplerfahrer entsprechende aktuelle Informationen von der Lagerleitung bekommen hat, die noch nicht im System eingepflegt worden waren und daher in den Berechnungen nicht berücksichtigt werden konnten.

Durch die monatelange Einlagerung nach der von uns entwickelten Einlagerungsstrategie konnte der Lagerzustand wesentlich verbessert werden. Dies konnte von Seiten der Lagerleitung bestätigt werden, und ist vor allem durch das Reduzieren des Aufwands beim Auslagern bemerkbar. Da das Lager sich jetzt in einem gut strukturierten und aufgeräumten Zustand befindet, ist es zu einer deutlichen Verringerung des Zeitaufwands für Auslagerungen gekommen. Zusätzlich können durch die Möglichkeit der einfachen Umlagerungen Konflikte im Zuge einer Auslagerung aufgehoben werden. Diese Möglichkeit brachte einen enormen Vorteil, da die problematischen Rollen sofort gut eingelagert werden konnten, und somit kein weiterer Zeitaufwand für diese Rolle entsteht. Eine weitere Verbesserung des Lagerzustands in

Spremberg brachte die Möglichkeit, in längeren Stehzeiten Umräumungen zu tätigen. Diese werden hauptsächlich an den Wochenenden durchgeführt. Es konnte beobachtet werden, dass Umlagerungen gegen Ende des Monats die besten Verbesserungen bringen, da sich in dieser Zeit der Füllgrad etwas entspannt und somit mehr Möglichkeiten für eine gute Umlagerung vorhanden sind.

Abschließend kann gesagt werden, dass durch die Einführung dieses Systems im Lager Hamburger-Spremberg die gewünschten Verbesserungen erzielt werden konnten, und dadurch der Zeitaufwand der gesamten Lagerhaltung enorm verringert wurde.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Verbesserungsvorschläge

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Optimierung der Lagerhaltung erfolgreich umgesetzt worden ist. Nach der Einführung des passenden Lagersystems war es möglich alle Vorgänge, und dadurch Informationen über den aktuellen Lagerzustand und die einzulagernden Rollen, zu erlangen. Zusätzlich brachte vor allem die Einführung der eigens entwickelten Ein- und Umlagerungsstrategie die gewünschten Verbesserungen im Lager Hamburger-Spremberg. Es ist hier positiv anzumerken, dass die Einführung der Einlagerungsstrategie eine hohe Akzeptanz bei den Mitarbeitern gefunden hat, und somit die einzulagernde Rolle meist in die vorgeschlagenen Streifen eingelagert wird. Das kam daher, dass sich aufgrund der berechneten Vorschläge für Lagerplätze und der Einlagerung in diese, der Zeitaufwand der Auslagerungen von Aufträgen beträchtlich verringerte. Weiters war zu erkennen, dass dadurch ein geordneter und strukturierter Lagerzustand erreicht werden konnte. Zusätzlich brachten auch die verschiedenen Varianten der Umlagerungen enorme Verbesserungen des Lagerzustands. Einerseits bringen die Umlagerungen von einzelnen Rollen laufend Verbesserungen, da es nun möglich ist, die entsprechende Rolle umgehend in einen optimalen Lagerplatz abzustellen, und andererseits gelingt es durch große Umräumungen am Wochenende viele Konflikte aufzuheben. Jedoch gibt es, aufgrund der Erfahrungen, die im Laufe der Arbeit gemacht wurden, einige Verbesserungsvorschläge, die an dieser Stelle angeführt werden.

Es stellte sich heraus, dass die größte Problematik bei der Einlagerung die nicht vorhersehbare Reihenfolge, nach der die Rollen ins Lager kommen, darstellt. Das bedeutet, dass man zum Zeitpunkt der Einlagerung einer Rolle nicht die Information besitzt, welche Rolle(n) als nächstes zur Einlagerung bereit stehen werden. Da die Produktionszeiten der Aufträge sehr unter-

schiedlich sind (von circa 2 Tagen bis zu 3 Wochen), ist es schwierig, bei der Einlagerung einer Rolle entsprechende Abschätzungen zu machen, wann die restlichen Rollen des Auftrags ins Lager kommen werden. Dem könnte man entgegenwirken, indem man den zu Beginn erstellten Produktionsplan in das System einpflegt, und dadurch Informationen über die Reihenfolge, der ins Lager kommenden Rollen, erlangt. So kann bei der Einlagerung der Rollen berücksichtig werden, zu welchem Zeitpunkt die Rollen eines Auftrags eingelagert werden müssen. Beispielsweise könnte der Fall eintreten, dass ein Auftrag aus braunem und weißem Papier besteht, und es aufgrund der Trennung dieser beiden Sorten in der Produktion dazu kommt, dass die braunen Rollen am Monatsbeginn eingelagert werden müssen, das weiße Papier jedoch erst am Ende des Monats ins Lager kommt, und dieser Auftrag dann innerhalb weniger Tage verladen wird. In diesem Fall würde ein Verstellen der braunen Rollen durch Aufträge, die einen frühreres Verladedatum haben, überhaupt kein Problem darstellen. Da diese Information aber nicht zur Verfügung steht, wird der Platz in diesem Streifen freigehalten. Dadurch kommt es zu einem Verlust von potenziellen Einlagerungsmöglichkeiten.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Einlagerungsvorschläge stellt die Pflege der Daten dar. Dies bezieht sich hauptsächlich auf die Wartung der Verladedaten. Es kommt häufig vor, dass sich diese Daten, beispielsweise aufgrund von Terminverschiebungen von Seiten der Kunden, ändern und die entsprechende Information nicht im System nachgezogen wird. Daher wird bei den Berechnungen für die Einlagerungen oft ein überholtes Verladedatum verwendet, was unweigerlich zu Konflikten führt. Dies könnte jedoch mit einem entsprechenden neuen Eintrag in der Datenbank behoben werden.

Ein weiteres Beispiel soll verdeutlichen, wie wichtig es wäre das Informationssystem immer auf den aktuellsten Stand zu halten. Es kann vorkommen, dass Rollen in der Qualitätskontrolle ausscheiden. Das heißt, dass diese Rollen nicht der gewünschten Qualität entsprechen, und daher dem Kunden nicht ausgeliefert werden dürfen. Dieser Vermerk wird jedoch nicht in der Datenbank gemacht, sondern es kommt nachträglich zu einem händischen Markieren der Rolle. Dadurch werden alle Rollen eines Auftrags, auch jene die nicht der geforderten Qualität entsprechen, gemeinsam eingelagert, und somit müssen bei der Auslagerung dieses Auftrags zusätzliche Umstellungen dieser Rollen getätigt werden. Würde man diese Information im Zuge der Qualitätskontrolle in das System einpflegen, so könnte man bei der Einlagerung darauf entsprechend reagieren, beispielsweise durch Abstellen der Ausschussware in eigens dafür vorgesehene Streifen.

Literaturverzeichnis

[1] Amazon.com. http://www.amazon.com/. (zuletzt besucht: 25.11.2008).

[2] Dataphone GmbH. http://www.dataphone.at/. (zuletzt besucht: 25.11.2008).

[3] Rail Cargo Austria AG. http://www.railcargo.at/. (zuletzt besucht: 25.11.2008).

[4] W. Hamburger GmbH. http://www.hamburger-spremberg.com/index_2.php. (zuletzt besucht: 25.11.2008).

[5] Aarts, E. und J. K. Lenstra. *Local Search in Combinatorial Optimization*. John Wiley and Sons, 1997.

[6] Dittrich, M. und R. Boutellier. *Lagerlogistik. Neue Wege zur systematischen Planung*. Carl Hanser Verlag, 2001.

[7] Glover, F. und M. Laguna. *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 1997.

[8] Gottlieb, J., M. Puchta und C. Solnon. A study of greedy, local search, and ant colony optimization approaches for car sequencing problems. In *Proceedings of the Applications of Evolutionary Computing on EvoWorkshops 2003*, Seiten 246–257, 2003.

[9] Hansen, P. und N. Mladenović. A tutorial on variable neighborhood search. Technical Report G-2003-46, Les Cahiers du GERAD, HEC Montréal and GERAD, Canada, 2003.

[10] Hansen, P. und N. Mladenović. Variable neighborhood search. In Glover und Kochenberger, editors, *Handbook of Metaheuristics*, Seiten 145–184. Kluwer Academic Publisher, New York, 2003.

[11] Hu, B. und G. R. Raidl. Variable neighborhood descent with self-adaptive neighborhood-ordering. In *Proceedings of the 7th EU/MEeting*

on Adaptive, Self-Adaptive, and Multi-Level Metaheuristics, Malaga, Spain, 2006. In C. Cotta, A. J. Fernandez, and J. E. Gallardo, 2006.

[12] Inderwiedenstrasse, T., S. Lorenz, A. Möhwald, A. Schuff und M. Terhardt. Lagerlogistik. Technical report, Wirtschaftsinformatik, Berufsakademie Mannheim, 2000.

[13] Kirkpatrick, S., C. Gellat und M. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220:671–680, 1983.

[14] Lin, S. und B. W. Kernighan. An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem. *Operations Research*, 21(2):498–516, 1973.

[15] Lourenço, H. R., O. Martin und T. Stützle. Iterated local search. In Glover, F. und G. Kochenberger, editors, *Handbook of Metaheuristics*, volume 57 of *International Series in Operations Research & Management Science*, Seiten 321–353. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 2003.

[16] Martin, H., P. Römisch und A. Weidlich. *Materialflusstechnik*, Kapitel Lagertechnik. Vieweg, 2008.

[17] Peer, G. Optimierung von Lagerhaltung und Disposition eines Unternehmens im Bereich Sanitär und Heizung. Diplomarbeit, Institut für Optimierung und Diskrete Mathematik, TU Graz, 2005.

[18] Plümer, T. *Logistik und Produktion*, Kapitel Logistiksysteme. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2003.

[19] Puchinger, J. und G. R. Raidl. Bringing order into the neighborhoods: Relaxation guided variable neighborhood search. Technical Report TR 186-1-06-02, Institute of Computer Graphics and Algorithms, Vienna University of Technology, 2006.

[20] Stützle, T. G. *Local Search Algorithms for Combinatorial Problems*. Dissertation, Technischen Universität Darmstadt, 1998.

[21] Tempelmeier, H. Supply chain inventory optimization with two customer classes in discrete time. *European Journal of Operational Research*, 174:600–621, 2006.