

**Christian Wildner**

**Minimierung unerwünschter Durchsatzminderungen nach  
Ausfällen und späteren Wieder-Inbetriebnahmen von  
Regalbediengeräten in automatisierten Hochregallagern**



**Minimierung unerwünschter  
Durchsatzminderungen nach  
Ausfällen und späteren Wieder-  
Inbetriebnahmen von  
Regalbediengeräten in  
automatisierten Hochregallagern**

Christian Wildner



Universitätsverlag Ilmenau  
2017

# Impressum

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 24. Juni 2016

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolf-Michael Scheid  
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachterin: Prof. Dr.-Ing. Nina Vojdani  
(Universität Rostock)

3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schmidt  
(Technische Universität Dresden)

Tag der Verteidigung: 21. November 2016

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

### Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net>

**ISBN** 978-3-86360-156-0 (Druckausgabe)

**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000809

---

Titelgrafik: Veit Henkel | Fakultät für Maschinenbau, TU Ilmenau

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	13
1.1. Problemstellung und Ziel der Arbeit.....	13
1.2. Aufbau der Arbeit .....	14
2. Not-/Störfall-/Sicherheitsstrategien für automatisierte Hochregallager .....	16
2.1. Marktsituation für automatisierte Hochregallager und automatische Kleinteilelager .....	16
2.2. Verfügbarkeit und Instandhaltung von aHRL.....	17
2.3. Not-/Störfall-/Sicherheitsstrategien: Stand der Forschung .....	23
3. Hintergründe und aktuelle Relevanz der Geinitz'schen Untersuchung.....	27
3.1. Aspekte der aHRL-Dimensionierung.....	27
3.2. Begriffliche Klärung: Auslastung und Durchsatz im aHRL .....	30
3.3. Betrachtung der eingesetzten Betriebsstrategien .....	34
3.4. Priorisierung von Einlagerstrategien .....	38
3.5. Verfügbarkeit und Grenzdurchsatz des betrachteten Lagersystems .....	48
4. Simulationsexperimente zum Grenzdurchsatz eines aHRL bei RBG-Ausfall .....	50
4.1. Bestätigung der Geinitz'schen Ergebnisse .....	50
4.2. Modellbasierte Erklärungsansätze .....	55
4.3. Ergänzende Simulationsexperimente & Analysen .....	65

5.	Veränderungen im Artikelbestand und deren Auswirkungen in Folge des Ausfalls eines RBG.....	73
5.1.	Störstellenentstehung während des Ausfalls eines RBG .....	73
5.2.	Auswirkungen von Störstellen nach Behebung eines RBG-Ausfalls .....	88
5.3.	Störstellen-Entstehung im ungestörten Betrieb am Beispiel $BS > 0$ .....	94
6.	Minimierung des betrieblichen Risikos eines RBG-Ausfalls .....	101
6.1.	Relevante betriebliche Ziele der Lagersteuerung.....	101
6.2.	Schwaches FIFO – schwache Querverteilung .....	105
6.3.	Lagersteuerung nach RBG-Ausfall.....	109
6.4.	Anwendungsbeispiel .....	115
7.	Zusammenfassung und Ausblick .....	118
7.1.	Zusammenfassung.....	118
7.2.	Ausblick .....	119
8.	Literaturverzeichnis .....	121
9.	Anhang – Algorithmen zur Berechnung der Fahrtzeit .....	129

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: "Verlauf der Auslagerleistung bei Gassenausfall" [Geinitz, 1998] .....	25
Abbildung 2: Puffern unerfüllter Lageraufträge.....	31
Abbildung 3: Wahrscheinlichkeit für Auftragstyp in Abh. des aktuellen Artikelbestands .....	41
Abbildung 4: Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Auftreten von Bestandshöhen .....	43
Abbildung 5: Zonierung eines Lagerregals .....	44
Abbildung 6: Auslagerleistung & RBG-Verfügbarkeit nach [Geinitz, 1998] .....	49
Abbildung 7: Auswirkung eines 16h-Ausfalls auf den Grenzdurchsatz (3-gassiges aHRL).....	54
Abbildung 8: ams-Modell Auslagern.....	56
Abbildung 9: ams-Modell Einlagern.....	59
Abbildung 10: ams-Modell Ein- & Auslagern – nach Ausfall Auslagern.....	61
Abbildung 11: ams-Modell Ein- & Auslagern – nach Ausfall Einlagern.....	63
Abbildung 12: Grenzdurchsätze und Ausfälle variierender Dauer (3-gassiges aHRL).....	66
Abbildung 13: Grenzdurchsätze und Ausfälle variierender Dauer (5-gassiges aHRL).....	67
Abbildung 14: Grenzdurchsätze und Ausfälle variierender Dauer (10-gassiges aHRL).....	68
Abbildung 15: ams-Modell Ein- & Auslagern – fortgesetzte Betrachtung .....	72

Abbildung 16: Schichtmodell der Gassenbestände eines Artikels .....	73
Abbildung 17: während eines RBG-Ausfalls entstehende, als Positiv ausgeprägte Basisschichten-Störstelle .....	74
Abbildung 18: Beispiel einer während eines RBG-Ausfalls entstandenen, als Positiv ausgeprägten Basisschichten-Störstelle .....	76
Abbildung 19: Beispiel einer während eines RBG-Ausfalls entstandenen, als Positiv ausgeprägten Deckschichten-Störstelle.....	77
Abbildung 20: Beispiel einer während eines RBG-Ausfalls entstandenen, als Negativ ausgeprägten Deckschichten-Störstelle .....	79
Abbildung 21: mögliche Typen einer während eines RBG-Ausfalls entstehenden Deckschichten-Störstelle .....	82
Abbildung 22: während eines RBG-Ausfalls angelegte Störstelle .....	86
Abbildung 23: Entstehung von Störstellen während eines RBG-Ausfalls – Übersicht .....	87
Abbildung 24: Störstellenabbau erzeugt neue Störstellen – Übersicht .....	89
Abbildung 25: Beispiele für Kombinationen vorliegender Störstellen mit $DS = BS$ .....	91
Abbildung 26: Notation von Gassenbestandsunterschieden.....	97
Abbildung 27: Ablauf Einzelspiel/Doppelspiel .....	129
Abbildung 28: Algorithmus A zur Fahrzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung.....	131
Abbildung 29: Algorithmus B zur Fahrzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung.....	132
Abbildung 30: Bewegung mit Phase konstanter Geschwindigkeit $v_{k,max}$ ...	133
Abbildung 31: Bewegung ohne Phase konstanter Geschwindigkeit $v_{k,max}$	135



## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: RBG für Palettenlager – Leistungskenngrößen .....	28
Tabelle 2: LAM für Paletten – Leistungskenngrößen .....	29
Tabelle 3: Artikelstruktur.....	40
Tabelle 4: Simulationsergebnisse – Priorisierung von Einlagerstrategien.....	47
Tabelle 5: Wahrscheinlichkeiten für relative Gassenbestandshöhe.....	74
Tabelle 6: Umfang DS von Störstellen der Deckschichten in Folge eines RBG-Ausfalls .....	80
Tabelle 7: Verhältnisse zwischen Artikeln bzgl. des größten Gassenbestands.....	85
Tabelle 8: Umfang AS von angelegten Störstellen in Folge eines RBG-Ausfalls.....	85
Tabelle 9: Umfang BS von Störstellen der Basisschichten in Folge eines RBG-Ausfalls .....	86
Tabelle 10: ungestörtes Anlegen von Störstellen – Simulationsergebnisse.....	99
Tabelle 11: Vorgehen zur Bildung der Auslagerreihenfolge gemäß aFIFO bzgl. G&S .....	106
Tabelle 12: aFIFO/aQuerverteilung entspr. Störstelle.....	109
Tabelle 13: Anzahl und Typ von Lageraufträgen für den gezielten Störstellen-Abbau .....	112
Tabelle 14: entsprechende Größen .....	130

## Abkürzungsverzeichnis

$\lambda$	betrieblicher Durchsatz	$a_{x/y/z}$	Beschleunigung in x-, y-, z-Richtung
$\rho$	Auslastungsgrad	$B_{Bv}$	Bestand einer Gasse mit durchgängig verfügbarem RBG
$\gamma$	Grenzdurchsatz		
$\eta, A, V$	Verfügbarkeit	$B_G(t)$	gassenspezifischer Bestand in Abhängigkeit von t
$\Delta t_{10}, \Delta t_{21}, \Delta t_{32}$	Zeitdauer zwischen den Zeitpunkten 1 und 0 / 2 und 1 / 3 und 2	$B_{Ga}$	Bestand der Gasse, in der das RBG ausfällt
$a', b', c', d', e'$	Artikelgruppen & entspr. Zonen	BS	Schichtumfang einer Störstelle der Basisschichten
aFIFO bzgl. G&S	abgeschwächtes FIFO bzgl. G und S	DS	Schichtumfang einer Störstelle der Deckschichten
AG	Auftraggeber	FEM	Fédération Européenne de la Maintenance
aHRL	automatisierte(s) Hochregallager	FIFO	first in first out
AKL	automatische(s) Kleinteilelager	G	eine bestimmte Gasse oder mehrere bestimmte Gassen
ams	artikelspezifisch, maximale Auslastungsrate, standardisierte Spielzeit	g	Gassenanzahl, auf die sich aFIFO bzw. aQuerverteilung bezieht
AN	Auftragnehmer	$G_1, G_2, \dots, G_{m-1}$	Gassen Nr. 1, 2, ... m-1, deren RBG nicht ausgefallen ist bzw. war
aQuerverteilung bzgl. G&S	abgeschwächte Querverteilung bzgl. G und S		
AS	Schichtumfang einer angelegten Störstelle		

$G_a$	Gasse, deren RBG ausgefallen ist bzw. war	$Q_{EA}$	kombinierter Durchsatz
$G_{x1}, G_{x2}, \dots$	einzelne bestimmte Gassen, auf die sich aFIFO bzw. aQuerverteilung bezieht	RBG	Regalbediengerät
k.A.	keine Angaben	S	Schichtzahl, auf die sich aFIFO bzw. aQuerverteilung bezieht
KFZ	kürzeste Fahrzeit	$S_{10/21/32}$	während $\Delta t_{10}$ , $\Delta t_{21}$ , $\Delta t_{32}$ zurückgelegte Wegstrecken
LAM	Lastaufnahmemittel	$S_{x/y/z}$	Wegstrecke in x-, y-, z-Richtung
LE	Ladeeinheit	$t_0$	Schalt-/Totzeit
LP	Lagerplatz	$t_{1/2/3/4}$	Zeitpunkt 1, 2, 3, 4
m	Anzahl RBG im aHRL bzw. Gassenzahl	$t_A$	Zeit bzgl. aHRL-Modell-Verhalten bei Auslagerungen
MTBF	mean time between failures	$t_{DoSp}$	Zeitdauer Doppelspiel
MTTR	mean time to repair	$t_E$	Zeit bzgl. aHRL-Modell-Verhalten bei Einlagerungen
n	Anzahl verfügbarer RBG	$t_{EA}$	Zeit bzgl. aHRL-Modell-Verhalten bei Ein- und Auslagerungen
oG	obere Grenze	$t_{ESp}$	Zeitdauer Einzelspiel
$P(A)$	Wahrscheinlichkeit für Auslagerung	$t_{Fr Ab}$	Zeitdauer Freiheben/Absenken
$P(E)$	Wahrscheinlichkeit für Einlagerung	$t_{Schub}$	Zeitdauer Schubvorgang
$Q(n,t)$	Durchsatz in Abhängigkeit von n und t		
$Q_A$	Auslagerdurchsatz		
$Q_E$	Einlagerdurchsatz		

$t_{\text{Trsf}}$	Lasttransferzeit
$t_{\text{Trsf,R}}$	Reaktionszeiten in der Lasttransferzeit
$t_{x/y/z}$	Zeitdauer der Bewegung in x-, y-, z-Richtung
$t_{x/y/z,\text{ges}}$	gesamte Zeitdauer der Bewegung in x-, y-, z-Richtung
$t_{xy,\text{ges}}$	gesamte Zeitdauer der Bewegung in der x-y-Ebene
uG	untere Grenze
Ü-Punkt, Ü	Übergabepunkt
VWD	Verweildauer
$v_{x/y/z}$	Geschwindigkeit in x-, y-, z-Richtung
$v_{x/y/z,\text{max}}$	Maximalgeschwindigkeit in x-, y-, z-Richtung

# 1. Einleitung

## 1.1. Problemstellung und Ziel der Arbeit

Unter anderem als eine Folge der voranschreitenden Globalisierung lässt sich seit vielen Jahren beobachten, wie das allgemeine Marktgeschehen sich immer schwieriger vorhersehen lässt – was mit Begriffen wie zunehmende Dynamisierung, Turbulenz oder Volatilität zum Ausdruck gebracht wird. Lägern bzw. Lagerbeständen kommt eine besondere Bedeutung bei der Gestaltung und Realisierung von logistischen Prozessen in einem unsicheren Umfeld zu, da sie angesichts dessen die Funktion ‚Schutz vor Unsicherheit‘ ausüben können. Als ein verbreiteter Lagertyp gilt das automatisierte Hochregallager. Die in seiner Steuerung zur Anwendung kommenden Lagerbetriebsstrategien üben einen wesentlichen Einfluss auf das charakteristische Betriebsverhalten des Lagersystems aus.

In den zurückliegenden Jahren lag der Fokus der Forschung an entsprechenden Lagerbetriebsstrategien v.a. darin, das Betriebsverhalten von automatisierten Hochregallägern energieeffizienter zu machen und etwa mit Hilfe von weiterentwickelten Zonierungsstrategien den mittleren Grenzdurchsatz zu steigern.

Gestiegene Kundenforderung in Bezug auf Liefertreue bzw. Lieferzuverlässigkeit, verlängerte Betriebszeiten und die verringerte Ausübung geplanter Instandhaltung lassen jedoch auch andere drängende Fragen ins Blickfeld rücken:

Wie anfällig ist das Betriebsverhalten automatisierter Hochregalläger gegenüber Störungen? Welchen Beitrag können Lagerbetriebsstrategien leisten, wenn trotz hoher Verfügbarkeitszusagen seitens der Hersteller ein Regalbediengerät ausfällt?

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer neuen Lagerbetriebsstrategie, die geeignet ist, das Risiko des Ausfalls eines Regalbediengeräts zu reduzieren.

## 1.2. Aufbau der Arbeit

**Kapitel 2** liefert einige Anhaltspunkte zur näheren Bestimmung der aktuellen Relevanz automatisierter Regallager. Zudem wird Grundlegendes zu Verfügbarkeit und Instandhaltung von automatisierten Hochregallagern dargelegt. Ergänzt wird das Kapitel durch Ausführungen zum Stand der Forschung bzgl. Not-/Störfall- oder Sicherheitsstrategien für den Betrieb von automatisierten Hochregallagern und insbesondere durch die Wiedergabe der Geinitz'schen Untersuchungen zur Durchsatzreduktion nach Beendigung des Ausfalls eines Regalbediengeräts.

**Kapitel 3** geht auf weitere relevante technische Hintergrundinformationen zu automatisierten Hochregallägern und den Geinitz'schen Untersuchungen ein. Hierbei erfolgen Ausführungen zu ausgewählten Aspekten der Dimensionierung und den Begriffen Auslastung und Durchsatz. Die beiden im Geinitz'schen Modell implementierten Lagerbetriebsstrategien Querverteilung und FIFO werden näher betrachtet und anhand eines Simulationsexperiments eine Fragestellung zur Priorisierung von Einlagerstrategien aufgeworfen. Der sich im Geinitz'schen Modell ergebende Grenzdurchsatz im Vergleich zum modellierten Verfügbarkeitsverhalten eines Regalbediengeräts offenbart Verbesserungspotential in den zur Anwendung kommenden Lagerbetriebsstrategien.

In **Kapitel 4** werden die Ergebnisse einiger Simulationsexperimente vorgestellt, die die Geinitz'schen Beobachtungen bestätigen. Die Betrachtung vereinfachter Bestandsmodelle liefert hierzu erste Hinweise über die der Durchsatzreduktion zu Grunde liegenden Ursachen. In weiteren Simulationsexperimenten lassen sich zusätzliche, auf den Ausfall eines Regalbediengeräts folgende Durchsatzreduktionen beobachten. Auch für diese zusätzlichen Durchsatzreduktionen lassen sich in vereinfachten Bestandsmodellen Erklärungshinweise finden.

Die durch den Ausfall eines Regalbediengeräts verursachten Veränderungen im Bestand eines einzelnen Artikels werden in **Kapitel 5** näher betrachtet. Hierbei wird das Konzept der ‚Störstelle‘ eingeführt, auf das sich die be-

obachteten Veränderungen des Durchsatzverhaltens in Folge des Ausfalls eines Regalbediengeräts zurückführen lassen. Ein weiteres Simulationsexperiment verdeutlicht, dass derlei Störstellen auch in ungestörten Lagerbetrieb auftreten können.

In **Kapitel 6** werden die relevanten betrieblichen Ziele der Lagersteuerung diskutiert. Auf Basis sogenannter ‚schwacher‘ Varianten der Querverteilung und des FIFO-Prinzips lässt sich eine neue Lagerbetriebsstrategie in Form einer Reihe von Maßnahmen formulieren, deren Anwendung im Einzelfall die negativen Folgen eines eingetretenen RBG-Ausfalls minimiert. Zum Abschluss des Kapitels wird anhand eines einfachen Beispiels eine mögliche Anwendung dieser neuen Betriebsstrategie kurz skizziert.

**Kapitel 7** fasst die ermittelten Ergebnisse zusammen und weist auf noch offene weiterführende Fragen hin.

## **2. Not-/Störfall-/Sicherheitsstrategien für automatisierte Hochregallager**

### **2.1. Marktsituation für automatisierte Hochregallager und automatische Kleinteilelager**

Am Institut für rechnergestützte Produktion der Technischen Universität Ilmenau wurden bis 2005 Daten zu Hochregallagertechnik gesammelt, die Angaben zu in Deutschland erfolgten Inbetriebnahmen von automatisierten Hochregal- und Regallager umfassen (Scheid W.-M. , 2008). Für die Anzahl der jedes Jahr in Betrieb genommenen automatisierten Hochregallager [aHRL] lässt sich für den durch die Datensammlung abgedeckten Betrachtungszeitraum von 1962 bis 2005 ein linearer Trend ausmachen. Für das Jahr 2005 weist dieser Trend einen Wert von ca. 175 Inbetriebnahmen pro Jahr aus. Für die tatsächlichen Entwicklungen der Inbetriebnahmen liegen seit 2005 keine weiteren Informationen vor.

Für automatische Kleinteilelager [AKL] weist die Datensammlung einen Anteil von etwa 40% bzgl. sämtlicher Inbetriebnahmen mit leicht steigendem Trend für die Jahre vor 2005 aus. Darüber hinaus geben die Daten keinen Hinweis auf einen relevanten Einfluss alternativer automatisierter Lagersysteme. Man sah zudem bestätigt, dass der Anteil der Inbetriebnahmen von Palettenlagern auf hohem Niveau stagnieren und der Anteil der Inbetriebnahmen von AKL zunehmen würde (Scheid W.-M. , 2008).

Seit einigen Jahren werden allerdings Shuttle-Systeme von einzelnen Marktbeobachtern als potentielle Alternativen zu Lagersystemen mit RBG betrachtet. Inzwischen existiert ein breites Angebot an Shuttle-Systemen für Kleinteilelager. Begrenzt wird der Einsatz von Shuttle-Lösungen aus technischen Gründen beim Umgang mit hohen Stückgutgewichten und aus Gründen der Wirtschaftlichkeit bei hohen Artikelzahlen (Schmidt, 2012). Für RBG- und Shuttle-Systeme lassen sich darüber hinaus weitere spezifische Vor- und Nachteile (Markl, 2012, S. 130) benennen, vor deren Hintergrund man in absehbarer Zukunft von einem Nebeneinander beider Systemlösungen ausgehen kann (Schmidt, 2012).



In Paletten-Läger werden Shuttle-Lösungen bislang kaum eingesetzt. Hohe Durchsatzforderungen könnten in Zukunft den Einsatz von Shuttle-Systemen in diesem Anwendungsbereich unter Umständen begünstigen (Piazza, 2012).

## **2.2. Verfügbarkeit und Instandhaltung von aHRL**

Als Verfügbarkeit einer technischen Einheit wird ihre „Fähigkeit“ verstanden, „zu einem gegebenen Zeitpunkt oder während eines gegebenen Zeitintervalls eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen erfüllen zu können, vorausgesetzt, dass die erforderlichen äußeren Hilfsmittel bereitgestellt sind (DIN EN 60300-1, 2010).“

Der Ausgangspunkt zu dieser Formulierung besteht in der Möglichkeit zur fortschreitenden Prüfung einer Einheit auf Funktionserfüllung. Für einen verstrichenen Zeitraum, in dem von der betrachteten Einheit die Erfüllung ihrer Funktionen gefordert wurde, lassen sich nachträglich die einzelnen Zeitabschnitte, in der die Einheit zur Erfüllung ihrer Funktion nicht fähig war, aufaddieren. Auf diese Weise lässt sich für den entsprechenden in der Vergangenheit liegenden Zeitraum die Verfügbarkeit einer technischen Einheit empirisch ermitteln.

Vielfach begegnet man dem Versuch, eine auf diese Weise empirisch ermittelte Aussage über beobachtete Häufigkeiten im Sinne einer statistischen Wahrscheinlichkeitsauffassung in eine verallgemeinerbare Aussage über vorliegende Wahrscheinlichkeiten zu überführen. Empirisch ermittelte Werte sollen demzufolge prognostische Aussagekraft bzgl. anderer, zukünftiger Zeiträume und unter Umständen auch bzgl. anderer, ähnlicher technischer Einheiten besitzen.

Im Fall intralogistischer Anlagen erfolgen entsprechende Übertragungen in zwei wesentlichen Formen: Die zum Einsatz kommenden komplexen Anlagensysteme werden i.d.R. aus betrieblich erprobten und bewährten Standardkomponenten zusammensetzt (Bandow, Kohlmann, & Wenzel, 2008). Dies allein wird allerdings nicht als ausreichende Grundlage für eine belastbare Verfügbarkeitsaussage angesehen, da es sich bei diesen Anlagensysteme-

men häufig um Individuallösungen – d.h. die Komponenten werden stets in neuer Art und Weise miteinander kombiniert – handelt, welche unter hohem Personaleinsatz auf der Baustelle endmontiert werden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden für intralogistische Anlagen zusätzlich Abnahmetests durchgeführt, im Rahmen derer die Verfügbarkeit einer Anlage über die Abnahmedauer empirisch ermittelt wird. Die Praxis zeigt allerdings, dass die Verallgemeinerbarkeit bzw. die Übertragbarkeit der während einer erfolgreichen Abnahme ermittelten Verfügbarkeitswerte i.d.R. nicht ohne weiteres gegeben ist und die während der Abnahme erzielten Verfügbarkeitswerte anschließend im regulären Anlagenbetrieb erst nach deutlicher Verzögerung erzielt werden (Scheid W.-M. , 2006) (übernommen von: (Maier, 2012)).

Als zwei wesentliche mögliche Erklärungen hierfür können zum einen der Einfluss von Personal während Produktion, Abnahme und Betrieb der Anlage, zum anderen die Eigenheit intralogistischer Anlagen in besonderer Weise ‚offene Systeme‘ darzustellen, genannt werden. Mit der Bezeichnung ‚offene Systeme‘ ist die Tatsache gemeint, dass im Betrieb intralogistischer Anlagen ständig neue Ladeeinheiten [LE] mit neuen Lager- und Handling-Eigenschaften in das System gelangen. Die entsprechenden Eigenschaften einer LE werden dabei nicht nur durch das Ladungsgut und seine Verpackung, sondern auch durch die verwendeten Ladehilfsmittel und ggf. durch die eingesetzten Mittel der Ladungssicherung bestimmt.

Die im Fall von Palettenlagern als Ladehilfsmittel zum Einsatz kommenden hölzernen Euro-Paletten verbreiteten sich lange bevor heute gängige Automatisierungsmöglichkeiten entwickelt worden waren und gelten als im Grunde nur bedingt für den Einsatz in automatisierten Umgebungen geeignet. In der Praxis ist es zwar durchaus üblich, neue LE einschließlich ihrer Paletten vor der Einlagerung etwa auf grundlegende mechanische Eigenschaften automatisiert zu testen. Die Anwendung von in Frage kommenden automatisierten Testverfahren wird allerdings in der Praxissituation durch eine Reihe von Restriktionen erschwert: So muss die Palette i.d.R. im beladenen Zustand geprüft werden, da ein Ent- und Beladen zu zeitaufwändig wäre. Im Fall eines unzureichenden Testergebnisses wird üblicherweise die

gesamte LE auf eine neue, zusätzliche Palette gestellt (ten Hompel & Schmidt, 2008, S. 27). Dieses Vorgehen findet etwa dann seine Grenzen, wenn die resultierende Höhe der LE, die in den Regalen pro Lagerplatz zu Verfügung stehende lichte Höhe überschreitet. Bzgl. anderer Bestandteile einer LE ergeben sich ebenfalls Grenzen der automatisierten Prüfung vor der Einlagerung, wie an zwei Beispielen verdeutlicht werden soll:

Dass kleinteilige Produkte nicht durch die Spalten zwischen den Brettern einer Palette hindurch fallen, soll häufig durch eine oder mehrere Lagen Karton als Packmittel verhindert werden. Karton zeigt sich allerdings als anfällig gegenüber der hohen Luftfeuchtigkeit, die auf die LE etwa während eines Seetransports einwirkt. Sich über derlei Eigenschaften von Materialien im Inneren einer LE von außen durch automatisiertes Prüfen Aufschluss zu verschaffen, gestaltet sich als schwierig.

Im Fördersystem eines Lagers kommen häufig optische Sensoren zum Einsatz, welche das lokale Vorhandensein von LE detektieren sollen. Zur seitlichen Sicherung der Ladung einer Palette kommen u.a. Folienstretch-Verfahren zum Einsatz. Lösen sich kleine Folienabschnitte vom Ende der Wicklung, können diese herunterhängen oder abreißen und umherfliegen. Auf diese Weise können sie die vorgesehene Betriebsweise vorhandener optischer Sensoren stören. Ein solches Ablösen kann u.U. beim Lagern und beim automatisierten Transport einer LE erfolgen, was v.a. durch den Einsatz optischer Prüfverfahren im Wareneingang verhindert werden soll. Möglich ist in diesem Zusammenhang auch, dass etwa in angrenzenden Lagerbereichen manuell ausgeführte Tätigkeiten des Handlings oder Umpackens die Ursache für Folienablösungen sein können.

Liegen Daten über Ausfall- und Betriebszeiten eines Systemelements vor, lässt sich die Verfügbarkeit  $\eta$  mittels *Formel 1* (FEM 9.222, 1989) (VDI 3581, 2004) berechnen. Zur Bezeichnung des Verfügbarkeitswertes kommen die Buchstaben  $\eta$  (FEM 9.222, 1989) (vgl. technischer Wirkungsgrad), A (VDI 3581, 2004) (eng. availability) und im deutschsprachigen Raum mitunter auch V (Verfügbarkeit) in Frage. MTBF steht für „mean time between failures“ und stellt die Dauer an Betriebszeit dar, die im Mittel zwischen

zwei aufeinander folgenden Ausfällen (FEM 9.222, 1989) oder Fehlern (VDI 3649, 1992) verstreicht. MTTR steht für „mean time to repair“ und stellt die mittlere Zeitdauer dar, für die eine instandsetzbare Einheit während der Betriebszeit vorübergehend nicht funktionsfähig ist. (Anstatt „repair“ wird zur Übersetzung auch „recover“ verwendet, um zu betonen, dass neben der Instandsetzung (DIN 31051, 2012) u.a. auch Zeitanteile auf die Fehlerdiagnose (DIN EN 13306, 2010) sowie auf technische und logistische Verzögerungen (DIN EN 13306, 2010) entfallen.)

$$\eta = A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad \text{Formel 1 (FEM 9.222, 1989) (VDI 3581, 2004)}$$

Während der Betriebsphase eines aHRL beeinflusst das jeweils umgesetzte Instandhaltungsmanagement die Verfügbarkeit der Systemkomponenten. Die im Rahmen eines Instandhaltungsmanagements möglicherweise zur Anwendung kommenden Instandhaltungsmaßnahmen lassen sich nach vielen Kategorien unterscheiden. Vereinfachend sollen an dieser Stelle zwei für intralogistische Anlagen gebräuchliche Typen (Bandow, Kohlmann, & Wenzel, 2008) einander gegenüber gestellt werden:

Wird vorbeugende Instandhaltung (VDI 3967, 1994) zeitorientiert/vorausbestimmt praktiziert, werden entsprechende Termine und Zeiten vorab eingeplant, während derer Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden. Im Zuge der Instandhaltung werden mit dem Ziel drohende Störungen vollständig abzuwenden einzelne Komponenten inspiziert, gewartet oder ausgetauscht (FEM 9.222, 1989). Werden diese Maßnahmen während der Betriebszeit durchgeführt, kommt es i.d.R. für die Dauer der Maßnahmen-durchführung zu einer Unterbrechung des regulären Anlagenbetriebs. Im Gegensatz zu einem Ausfall kann diese vorübergehende Außer-Betriebsetzung aber geplant erfolgen – d.h. es ist vorher bekannt, wann die Umsetzung der Maßnahme beginnt und wie lange sie planmäßig dauert. Gleiches kann auch für Fälle der Anlagenmodernisierung oder Anlagenerweiterung gelten, falls diese bei laufendem Anlagenbetrieb stattfinden soll (VDI 4403-1, 2011).

Kommt es während des Betriebs zum Ausfall einer relevanten Komponente oder des Gesamtsystems, hat sofortige korrektive Instandhaltung (DIN EN 13306, 2010) zur schnellen Behebung des Ausfalls (FEM 9.222, 1989) zu erfolgen. Die entsprechende Instandhaltungsorganisation (VDI 2895, 2012) muss somit darauf ausgerichtet sein, auch und insbesondere für *unvorhergesehene* Ausfälle die entstehenden Instandhaltungszeiten (DIN EN 13306, 2010) zu minimieren. Eine wesentliche Komponente der Instandhaltungszeit stellt hierbei die sog. logistische Verzögerung dar, welche sämtliche Zeiten umfasst, die bis zur Bereitstellung der jeweils notwendigen Instandhaltungshilfsmittel, einschließlich qualifizierten Personals und Ersatzteilen, vergeht (DIN EN 13306, 2010).

Eine Alternative zu den beiden vorgestellten Formen der Instandhaltung bildet die zustandsorientierte Instandhaltung, welche in der Praxis allerdings bislang in nur geringem Ausmaß Anwendung findet, da sich die Zustandsdetektion einzelner Teilsysteme häufig als unmöglich bzw. sehr aufwendig erweist. In Einzelfällen lässt sich allerdings etwa die Ausführung von Steuerungsbefehlen durch einzelne Aktoren fortwährend mittels bereits vorhandener oder solcher Sensoren, die sich ohne großen Aufwand ergänzen lassen, überwachen und Abweichungen vom Sollprozess detektieren (z.B. Motor mit Drehzahlmesser und Wärmefühler). Zudem sind eine Reihe aktueller Forschungsansätze darauf ausgerichtet, weitere Anwendungsmöglichkeiten der zustandsorientierten Instandhaltung zu entwickeln – etwa in Form einer Echtzeit-Berechnung statistischer Prozesskenngrößen komplexer intralogistischer Anlagen (Wustmann, Schmalzer, & Schmidt, 2011), zur Überwachung des Verschleißverhaltens von RBG-Zahnriemen (Schumann, Schmidt, & Zhakov, 2014) oder zur Überwachung des Verschleißverhaltens von Stückgutförderanlagen (Monecke, Schulz, & Zadek, 2010).

Kommen zu Fragen der Verantwortung bzgl. der Verfügbarkeit bei der Inbetriebnahme einer neuen, modernisierten oder erweiterten Anlage mit Regalbediengeräten die Regeln der Fédération Européenne de la Maintenance [FEM] 9.222 (FEM 9.222, 1989) uneingeschränkt zum Einsatz, geht

nach erfolgter Abnahme „die Verantwortung für Nutzen und Gefahr an den AG (Auftraggeber, Betreiber der Anlage; Anm. des Autors) über. Insbesondere ist der AG verantwortlich, dass Wartungs- und Servicearbeiten entsprechend den Richtlinien des AN (Auftragnehmer; Anm. des Autors) ausgeführt werden. Für die Ersatzteilhaltung ist der AG zuständig (FEM 9.222, 1989, S. 5).“ Dass die Betreiber einer entsprechenden Anlage unter den gegebenen Umständen sich stets der Notwendigkeit eines ausreichend ausgestalteten Instandhaltungsmanagements rechtzeitig vollends bewusst sind und dieser Notwendigkeit auch in angemessener Weise Rechnung tragen, darf bezweifelt werden.

Grundsätzlich ist seit einigen Jahren zu beobachten, dass die Betriebszeiten von Lagersystemen mehr und mehr ausgeweitet werden: Waren ursprünglich etwa zwei Schichten zwischen Montag und Freitag und eine Samstagsschicht vorgesehen, sind es heute häufig drei Schichten zwischen Montag und Freitag, zwei Samstagsschichten sowie ggf. eine Sonntagsschicht. Hieraus ergeben sich zwei Formen von erhöhter Anfälligkeit gegenüber technischen Störungen:

Geht man, wie im Rahmen der Verfügbarkeitstheorie üblich, von einer Korrelation zwischen Betriebszeit und der Häufigkeit auftretender Störungen aus, dann ergeben sich mit einer Ausweitung der wöchentlichen Betriebszeiten auch häufiger Störungen und Ausfälle pro Kalenderwoche, wodurch sich aus kalendarisch-zeitlicher Perspektive der Bedarf nach Instandhaltung pro Anlage grundsätzlich erhöht.

War es zuvor eher möglich, störungsbedingte Produktionsausfälle durch kurzfristig eingeplante Sonderschichten wieder aufzuholen, lässt die immer häufigere lückenlose Aufeinanderfolge von Betriebszeiten dies tendenziell nicht mehr zu. In dem Maße, in dem diese Möglichkeiten zur Eindämmung von auf das betriebliche Ergebnis wirkenden schädlichen Effekten also kaum mehr zur Verfügung stehen, gewinnt die Instandhaltung als weiterhin vorhandene Möglichkeit an Bedeutung.

Allerdings finden sich zur Durchführung geplanter Instandhaltung unter diesen Bedingungen auch kaum Möglichkeiten zur Maßnahmendurchführung außerhalb der Betriebszeiten.

Bzgl. der Marktsituation für Instandhaltung von Intralogistikanlagen hat es zudem den Anschein, dass in Zeiten schwacher Konjunktur das Interesse der Betreiber intralogistischer Anlagen geplante Instandhaltung durchzuführen, schwindet (Dönges, 2013).

In diesem Kontext darf allerdings ebenfalls bezweifelt werden, dass die Betreiber intralogistischer Anlagen im Gegenzug angesichts dessen der Ausgestaltung der zum Einsatz kommenden Instandhaltungsorganisation zur schnellen Reaktion auf unvorhersehbare Ausfälle mittels sofortiger korrekativer Instandhaltung in ausreichender Weise Rechnung tragen.

### **2.3. Not-/Störfall-/Sicherheitsstrategien: Stand der Forschung**

Für aHRL, welche in jeder Gasse mit einem gassengebundenen RBG ausgestattet sind und deren Regale jeweils nur von einer Regalgasse aus bedient werden, nennt die aktuelle Fachliteratur ausdrücklich eine Betriebsstrategie, die geeignet ist, die Auswirkungen von Störungen von aHRL-Komponenten zu reduzieren: die Querverteilung.

Die Querverteilung (ten Hompel & Schmidt, Warehouse Management. Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen, 2008, S. 32) bzw. Gleichverteilungsstrategie (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 599) sieht die „Lagerung mehrerer Einheiten eines Artikels verteilt über mehrere Lagergassen“ (ten Hompel & Schmidt, Warehouse Management. Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen, 2008, S. 32) vor. Ein hiermit angestrebter Effekt besteht in der „Verfügbarkeit des Artikels“ bei Ausfall eines RBG (ten Hompel & Schmidt, Warehouse Management. Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen, 2008, S. 32). Im Grunde handelt es sich hierbei um die gezielte Herstellung einer im Bedarfsfall nutzbaren Redundanz: zu einem Bedarfsfall kommt es dann, wenn ein einzelnes RBG vorübergehend nicht benutzt werden kann bzw. mehrere RBG vorübergehend nicht benutzt werden können und gleichzeitig LE eines in der/den betroffenen Gasse/-n lagernden Artikels auszulagern sind. Lagern LE des entsprechenden Artikels zudem auch in solchen Gassen, deren RBG weiter-

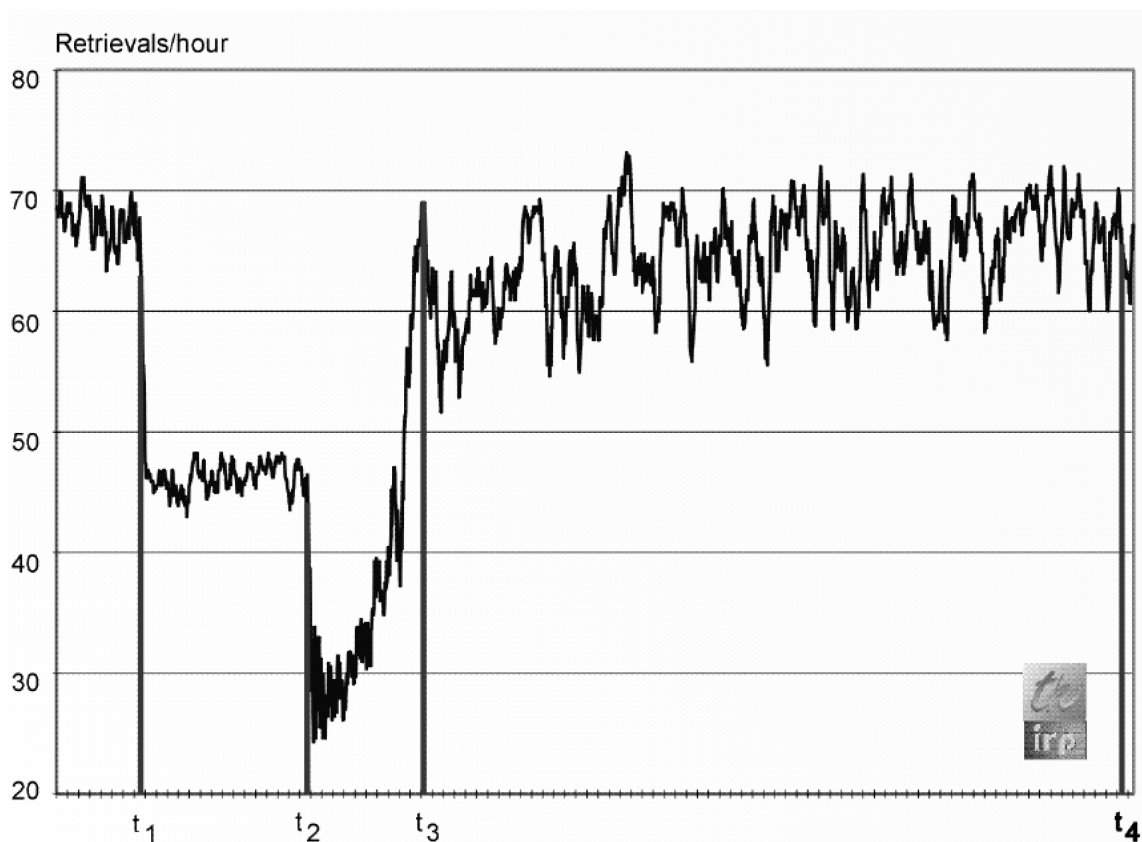
hin einsatzfähig sind, lassen sich die vorliegenden Auslageraufträge dennoch ausführen. Das zuvor erfolgte auf mehrere Gassen verteilte Einlagern von LE eines Artikels erzeugt somit grundsätzlich redundante Möglichkeiten zur Auslagerung von Einheiten dieses Artikels mittels verschiedener RBG.

Ein zweiter mitunter nützlicher Effekt ergibt sich durch die Möglichkeit, mit dieser Strategie die notwendige Zeit für das Auslagern von artikelspezifischen Einheitenpulks durch paralleles Abarbeiten mittels mehrerer RBG zu verkürzen. In diesem Zusammenhang nennt Gudehus als eine Variante der Querverteilungsstrategie die sog. zyklische Gangzuweisung (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 599).

Ein ursprünglich 1998 veröffentlichter Artikel (Geinitz, 1998) wirft allerdings eine Reihe von Fragen bzgl. des Praxiseinsatzes der Betriebsstrategie Querverteilung auf, welche bis heute nicht in befriedigender Weise beantwortet wurden. Ausgangspunkt der hierbei angestellten Betrachtungen (Geinitz, 1998) bildet das Simulationsmodell eines aHRL mit drei Gassen, dessen Steuerung neben der Betriebsstrategie Querverteilung auch das first-in-first-out [FIFO]-Prinzip bei freier Lagerplatzordnung umsetzt. (Potenzielle) Ein- und Auslageraufträge mit jeweils zufällig ermitteltem Artikelbezug werden kontinuierlich zur Ausführung bereitgestellt, so dass im aHRL ein ununterbrochener Durchsatz erzeugt wird.



Zu einem Zeitpunkt  $t_1$  wird nun eines der drei RBG im Modell deaktiviert und damit der Ausfall der entsprechenden Gasse simuliert. Hierdurch bedingt beobachtet Geinitz am aHRL-Modell ein Absinken des Auslagerdurchsatzes auf etwa zwei Drittel des ursprünglichen Wertes (siehe *Abbildung 1: "Verlauf der Auslagerleistung bei Gassenausfall"* [Geinitz, 1998]). Zu einem Zeitpunkt  $t_2$  wird nun angenommen, das betroffene RBG sei wieder in den Zustand vollständiger Funktionsfähigkeit überführt, woraufhin es wieder in Betrieb genommen wird. Trotz der Tatsache, dass ab diesem Zeitpunkt sämtliche RBG des aHRL verfügbar sind und damit die ursprüngliche Kapazität zur Bedienung der Regallager vollständig zur Verfügung steht, zeigt das von Geinitz veröffentlichte Diagramm zunächst ein erneutes Einbrechen des beobachteten Auslagerdurchsatzes: Die Kennlinie fällt vorübergehend auf etwa ein Drittel des Niveaus, welches zu Beginn der Modelllaufzeit beobachtet wurde. Mit einiger Verzögerung erholt sie sich in der Folge der Auslagerdurchsatz des Modells dann wieder und erreicht zum Zeitpunkt  $t_3$  erstmalig wieder sein ursprüngliches Niveau.



**Abbildung 1: "Verlauf der Auslagerleistung bei Gassenausfall" [Geinitz, 1998]**

Das von Geinitz modellierte aHRL weist insgesamt 6 Regale mit jeweils 100 x 20 Lagerplätzen auf. Das Lagersortiment umfasst 100 unterschiedliche Artikel. Laut Geinitz beträgt der durchschnittliche Lagerfüllungsgrad 80%. Die einzelnen Zeitspannen (siehe *Abbildung 1: "Verlauf der Auslagerleistung bei Gassenausfall"* [Geinitz, 1998]) betragen  $\Delta t_{21} = 4,2$  d (Tage),  $\Delta t_{31} = 5,6$  d und  $\Delta t_{43} = \text{ca. } 15$  d.

### **3. Hintergründe und aktuelle Relevanz der Geinitz'schen Untersuchung**

#### **3.1. Aspekte der aHRL-Dimensionierung**

Das im beschriebenen Zusammenhang zum Einsatz kommende Modell bildet ein aHRL mit drei RBG bzw. Gassen ab. Laut einer weiteren Auswertung von Daten zur Inbetriebnahme (Scheid W.-M. , 2008) verfügen die in den 1990er Jahren in Betrieb genommene aHRL im Mittel über drei RBG. In den Folgejahren waren Schwankungen bzgl. dieses Mittelwerts zu beobachten, wobei die überwiegende Mehrheit sämtlicher Anlagen stets zwischen 1 und 10 RBG verfügte.

Die technischen Leistungsgrößen der im Simulationsmodell verwendeten RBG weichen von jenen Werten zum Teil deutlich ab, die seitens der Hersteller heute über entsprechende Produktinformationen bzgl. gängiger RBG-Varianten für Palettenlager kommuniziert werden (siehe *Tabelle 1: RBG für Palettenlager – Leistungskenngrößen*; „k.A.“ steht hierbei für „keine Angaben“). Auffällig ist hierbei, dass Hersteller häufig nur die unter gewissen Bedingungen realisierbaren Maximalwerte nennen. Im Allgemeinen ist wohl davon auszugehen, dass diese Werte in der Praxis nur selten erreicht werden. Der Grund hierfür liegt weniger in der tatsächlichen technischen Leistungsfähigkeit der RBG, sondern beispielsweise in der Empfindlichkeit der transportierten Ladeeinheiten (einschließlich Palette, Ladungssicherung, Pack- und Stapelschemata, Verpackung, Ladegut, etc.) hinsichtlich solcher Belastungen, die während des Verfahrens der RBG beim Ein- und Ausladen dynamisch in Folge von Massenträgheit auftreten. Dementsprechend kommt der Einschätzung real umsetzbarer Beschleunigungswerte eine besondere Bedeutung zu.

	Geinitz (Geinitz, 1998)	Jungheinrich (Jungheinrich AG, 2014)	SSI Schäfer (SSI Schäfer)	Dematic <i>Rapidstore UL 1000/1200</i> (Dematic, 2014)	TGW <i>Magnus</i> (TGW, 2013)	Viastore <i>viapal</i> (Viastore)	Gudehus (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 589)	gewählte Ausprägung
$v_x$ [m/s]	2,0	$\leq 4,0$	$\leq 4,0$	$\leq 4,0$	$\leq 4$	$\leq 4,0$	5,0	4,0
$a_x$ [m/s <sup>2</sup> ]	0,4	k.A.	k.A.	0,78	$\leq 2$	$\leq 1,0$	1,0	0,75
$v_y$ [m/s]	0,5	$\leq 1,67$	$\leq 1,5$	1,4	$\leq 2$	$\leq 1,3$	2,0	1,5
$a_y$ [m/s <sup>2</sup> ]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	$\leq 2$	$\leq 1,5$	1,0	0,75

**Tabelle 1: RBG für Palettenlager – Leistungskenngrößen**

Daneben gibt Geinitz einen Zeitwert von 12,0 s für das Be- bzw. Entladen (Geinitz, 1998) des Lastaufnahmemittels [LAM] an, welcher ebenfalls mit heute üblichen Ladezeiten zu vergleichen ist. Ein solcher Vergleich wird erschwert durch den Umstand, dass die entsprechenden Hersteller nur sehr wenige Informationen über das Betriebsverhalten ihrer LAM veröffentlichten (siehe *Tabelle 2: LAM für Paletten – Leistungskenngrößen*).

	Geinitz (Geinitz, 1998)	Dematic <i>Rapidstore UL 1000/1200 – LAM</i> (Dematic, 2014)	TGW <i>Paletten-teleskop E</i> (TGW, 2013)	Gebhardt <i>RBG Typ 748</i> (Gebhardt Fördertechnik, 2010)	Gudehus Teleskopgabel (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 590, S. 627)	gewählte Ausprägung
$v_{z, leer}$ [m/s]	k.A.	1,5	$\leq 2,2$	1,3	0,5	$> 1,34$
$v_{z, beladen}$ [m/s]	k.A.	k.A.	k.A.	0,66	0,5	$> 1,06$
$a_{z, leer}$ [m/s <sup>2</sup> ]	k.A.	k.A.	k.A.	1,2	0,3	1,2
$a_{z, beladen}$ [m/s <sup>2</sup> ]	k.A.	k.A.	k.A.	0,6	0,3	0,75
$t_{z, ges=1340mm, leer}$ [s]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A. (2,11)	k.A. (4,23)	(2,67)
$t_{z, ges=1340mm, bel.}$ [s]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A. (2,99)	k.A. (4,23)	(2,11)
$t_0$ [s]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,5 bis 1,0	0,7
$t_{Trsf}$ [s]	12,0	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	(6,92)

**Tabelle 2: LAM für Paletten – Leistungskenngrößen**

Dem gegenüber macht Gudehus eine Reihe zusätzlicher Angaben zum Betriebsverhalten eines – seinen Worten nach – „gebräuchlichen“ LAM (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 590,627). Sowohl die Wertangaben von Gudehus als auch die des Herstellers Gebhardt lassen sich durch eigene Berechnungen (Werte in Klammern) mittels der im Anhang (Kapitel 9) beschriebenen Berechnungsverfahren ergänzen. Hierbei zeigt sich, dass die Gudehus'schen Werte deutlich geringer ausfallen als die des RBG Typ 748 des Herstellers Gebhardt, und im Fall von

$v_z$  auch deutlich geringer als die Produkte der Hersteller Dematic und TGW. Hierdurch drängt sich der Verdacht auf, dass Gudehus an dieser Stelle veraltete Werte nennt: Ein Vergleich mit den entsprechenden Angaben in der ersten Auflage seines Buches (Gudehus, 1999, S. 486) zeigt, dass die relevanten Werte von Gudehus unverändert in die 4. Auflage übernommen wurden. Entgegen entsprechender Formulierungen im Vorwort zur 4. Auflage wurden offensichtlich doch nicht sämtliche angegebenen Kennzahlen seines Buches aktualisiert (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. v).

Die vor diesem Hintergrund ausgewählten und entsprechend berechneten Werte führen u.a. zu einer geringeren Lasttransferzeit  $t_{Trsf}$ , als von Geinitz seinerzeit angenommen.

Geinitz geht offenbar davon aus, dass das Zu- und Abfördersystem, welches in Realität die einzulagernden LE zu den Ü-Punkten der RBGs hin transportiert und die ausgelagerten LE von den Ü-Punkten abtransportiert, zu keinem Zeitpunkt in irgendeiner Form die Einheitenströme behindert oder sonst aufgrund seiner spezifischen Ausprägung auf eine beobachtbare Weise beeinflusst. Das heißt, dass der Grenzdurchsatz sämtlicher RBG höchstens genauso hoch sein kann, wie jener des durchsatzschwächsten Elements des Zu- und Abfördersystems – wovon auch in allen weiteren betrachteten Fällen ausgegangen werden soll.

### **3.2. Begriffliche Klärung: Auslastung und Durchsatz im aHRL**

„Der Durchsatz ist definiert als mittlerer Stückgutstrom in das Lager hinein und/oder aus dem Lager heraus. Gemessen wird er in Transporteinheiten pro Stunde (VDI 4480-1, 1998)“. Der Durchsatz stellt somit eine Größe dar, deren Ausprägung im konkreten Anwendungsfall von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden kann:

- die Lager-Topologie (Transportwegstrecken, Pufferplätze – bestimmt durch die Lager-Dimensionierung);
- die in der Praxis für die eingesetzten Automatisierungskomponenten vorliegenden Ausprägungen der Leistungsgrößen bzw. ihre

### Ausprägungsgrenzen

((maximale) Geschwindigkeiten, Brems- und Anfahr-Beschleunigungen);

- die technische Verfügbarkeit der Systemkomponenten;
- die in der obersten HRL-Steuerungsebene zum Einsatz kommenden Steuerungsregeln bzw. die Betriebsstrategien;
- die IST-Lagerbelegung sowie die zur Ausführung jeweils vorliegenden bzw. gepufferten und auswählbaren E-/A-Aufträge und
- ggf. die prognostizierten Informationen über das Aufkommen zukünftiger E-/A-Aufträge bzw. über die zukünftige Bestandsentwicklung.

Von einer ‚Kenngröße Durchsatz‘ lässt sich genaugenommen nur dann sprechen, wenn man sich auf einen spezifischen Ausprägungssatz dieser genannten Einflussfaktoren bezieht bzw. wenn ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Durchsatz des betrachteten Systems zu einzelnen Einflussfaktoren vorliegt und bekannt ist. Der Durchsatz stellt im Zusammenhang mit dem Betrieb von technischen Materialflusssystemen selbstverständlich eine wichtige Zielgröße dar, d.h. es besteht i.A. das ausdrückliche Ziel seitens der Hersteller und Betreiber mit einem technischen System einen möglichst hohen Durchsatz realisieren zu können bzw. die Durchsatzanforderungen, die an das technische System gestellt werden, zu erfüllen.



**Abbildung 2: Puffern unerfüllter Lageraufträge**

Durchsatzanforderungen können sich im Fall eines aHRL u.a. durch das sich im Verlauf der Betriebszeit realisierende Aufkommen von E-/A-Aufträgen bzw. die erzeugte Folge von Lageraufträgen zur Ausführung im aHRL ergeben. Im Sinne der Warteschlangentheorie lässt sich dieses Auftragsaufkom-

men als ein Strom nacheinander ankommender artikelspezifischer E- und A-Aufträge beschreiben (Arnold & Furmans, 2009, S. 13). Im Weiteren soll der Strom der pro Zeiteinheit erzeugten Lageraufträge Durchsatzanforderung oder angeforderter Durchsatz, der Warteraum des auf diese Weise betrachteten Wartesystems Auftragspuffer genannt werden (siehe *Abbildung 2: Puffern unerfüllter Lageraufträge*).

Existiert im Auftragspuffer keine Warteschlange von Lageraufträgen und bildet sich im Verlauf der Abarbeitung der Durchsatzanforderung durch das Bediensystem in Form des aHRL auch keine neue Warteschlange, geht man davon aus, dass der realisierte betriebliche Durchsatz  $\lambda$  gleich dem angeforderten Durchsatz und der Auslastungsgrad  $\rho$  des Bediensystems kleiner oder gleich 1 ist bzw. dass der realisierte betriebliche Durchsatz  $\lambda$  kleiner oder gleich dem maximal realisierbaren Grenzdurchsatz  $\gamma$  ist (siehe *Formel 2* (Arnold & Furmans, 2009, S. 13)).

$$\rho = \frac{\lambda}{\gamma} \leq 1 \quad \text{Formel 2 (Arnold \& Furmans, 2009, S. 13)}$$

Übersteigt der angeforderte Durchsatz vorübergehend den maximal realisierbaren Grenzdurchsatz  $\gamma$ , bildet sich im Auftragspuffer eine sich vergrößernde Warteschlange von Lageraufträgen.

Die Durchsatzanforderung für ein Lager kann einer gewissen Rhythmik unterliegen oder in bestimmten Zyklen erfolgen: Im Verlauf eines Betriebstages könnten etwa im Lager eines Versandhändlers gemäß einer Tagesrhythmik in der ersten Tageshälfte vorrangig Einlagerungen (Nachschub), in der zweiten Tageshälfte vorrangig Auslagerungen (Kundenbestellungen) erfolgen. Für Online-Versandhändler (B2C) könnten sich nach Wochenenden (oder Feiertagen) besonders hohe Auftragsaufkommen im Vergleich zu anderen Betriebstagen ergeben. In ihrem Fall könnte man also von einer Wochen-Rhythmik sprechen. Immer wiederkehrende Schwankungen im Jahresverlauf, wie etwa besonders hohe Auftragsaufkommen in der Vorweihnachtszeit, werden als Saisonalitäten bezeichnet.

Des Weiteren kann es dazu kommen, dass sich für den kundigen Beobach-



ter der Marktsituation der Eintritt eines einzelnen Ereignisses oder einer Entwicklung in der isolierten Einzelbetrachtung gut vorhersagen lässt, welches bzw. welche in einem bekannten kausalen Zusammenhang mit dem Auftragsaufkommen steht bzw. stehen – d.h. über entsprechende Ereignisse und Entwicklungen ist bereits im Vorfeld bekannt, wann sie eintreten und dass bzw. in welchem ungefährem Ausmaß sie das Auftragsaufkommen verändern werden (z.B. Start einer Marketing-Kampagne, Verkaufsbeginn eines Konkurrenzprodukts).

Für das weitere Vorgehen im Rahmen dieser Arbeit soll für die Entstehung von Lageraufträgen von folgenden Annahmen ausgegangen werden: Bevor eine Einlagerung erfolgen kann, muss der einzulagernden LE ein freier Lagerplatz zugeordnet werden. Bevor die Auslagerung einer LE erfolgen kann, muss unter sämtlichen LE des fraglichen Artikels, die sich im Lager befinden, eine bestimmte LE für die Auslagerung bestimmt werden. Die Art und Weise der in beiden Fällen nötigen Datenverarbeitung umfasst somit das Identifizieren bzw. Auswählen gewisser informatorischer Bezugsobjekte. Sind die jeweils nötigen informatorischen Bezugsobjekte vollständig identifiziert bzw. ausgewählt, ergibt sich der entsprechende Ein- bzw. Auslagerauftrag. Ist ein Ein- bzw. ein Auslagerauftrag einmal erzeugt, soll er zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr verändert oder gelöscht werden können – es sei denn, eine für die entsprechende Auftragsausführung betroffene Systemkomponente (z.B. RBG) fällt aus.

Befinden sich Lageraufträge im Auftragspuffer und liegen über die bevorstehende Durchsatzanforderung keine ausreichend sicheren Informationen vor, die auf ein Anforderungsniveau unterhalb des maximal realisierbaren Grenzdurchsatzes  $\gamma$  schließen lassen, dann soll der realisierte betriebliche Durchsatz  $\lambda$  solange gleich dem maximal realisierbaren Grenzdurchsatz  $\gamma$  sein, bis die Warteschlange im Auftragspuffer vollständig abgebaut ist.

Liegen hingegen ausreichend sichere Informationen vor, die für die nahe Zukunft auf ein Anforderungsniveau unterhalb des maximal realisierbaren Grenzdurchsatzes  $\gamma$  schließen lassen, während sich Lageraufträge im Auftragspuffer befinden, so kann der realisierte betriebliche Durchsatz  $\lambda$  grö-

ßer als der im Weiteren geforderte Durchsatz, aber kleiner als der maximal realisierbare Grenzdurchsatz  $\gamma$  gewählt werden. Die genaue Ausprägung des realisierten Durchsatzes bestimmt unter diesen Umständen, wie schnell der Auftragspuffer geleert werden soll, was u.a. davon abhängt, wie lange die Ausführung der anstehenden Lageraufträge hinausgezögert werden kann und wie lange die Phase geminderter Durchsatzanforderung noch andauert.

### **3.3. Betrachtung der eingesetzten Betriebsstrategien**

Geinitz nennt zur Beschreibung der wesentlichen implementierten Strategien zur Steuerung seines aHRL-Modells Querverteilung („Querschnittseinlagerung“ (Geinitz, 1998)) und FIFO-Prinzip (Geinitz, 1998) bei chaotischer Lagerung.

Für Gudehus stellt FIFO (first-in-first-out) ein sog. Auslagerprinzip dar (und damit eine sog. Restriktion für ggf. zur Anwendung kommende sog. Bewegungsstrategien) (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 600). Er unterscheidet zwischen einem sog. strengen und einem sog. schwachen FIFO-Prinzip: „Beim strengen FIFO-Prinzip müssen die einzelnen Ladeeinheiten (eines Artikels, Anm. des Autors) in der Reihenfolge ihrer Einlagerung ausgelagert werden (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 600).“ Beim schwachen FIFO-Prinzip müssen hingegen „die Ladeeinheiten einer früheren vor den Ladeeinheiten einer späteren Einlagercharge ausgelagert werden (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 600).“ Nähere Ausführungen unter welchen Bedingungen im Einzelfall von einer zusammengehörigen Einlagercharge zu sprechen wäre und unter welchen nicht, finden sich bei Gudehus allerdings nicht.

Daneben findet sich in der Literatur auch das sog. gemilderte FIFO (ten Hompel & Heidenblut, 2006, S. 74). Hierbei werden mehrere LE eines Artikels als zu einer Gruppe gehörig angesehen – etwa weil sie alle dasselbe Mindesthaltbarkeitsdatum aufweisen. Gemildertes FIFO bestimmt unter mehreren vorhandenen Gruppen diejenige, deren LE als nächstes auszulagern sind. Zu einer näheren Bestimmung der Auslagerreihenfolge der LE,

die ein und derselben Gruppe angehören, kommt es im Rahmen dieser Strategie, so wie sie beschrieben wird, nicht.

Geinitz erwähnt mit keinem Wort, dass er die Einlagerung von mehreren LE eines Artikels als Charge oder als Gruppe betrachte – er bezieht sich offensichtlich auf das strenge FIFO-Prinzip nach Gudehus. (Soweit nicht durch ergänzende Bezeichnungen kenntlich gemacht ist unter FIFO-Prinzip im Rahmen dieser Arbeit das strenge FIFO-Prinzip nach Gudehus zu verstehen.)

Die intralogistische Fachliteratur bezeichnet das FIFO-Prinzip unter den für aHRL in Frage kommenden Betriebsstrategien als eines der ‚wichtigsten‘ (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 600). Es käme häufig (Günthner, Atz, & Ulbrich, 2011, S. 17) wenn nicht gar meist (Atz & Günthner, 2011, S. 66) zur Anwendung. Mangels entsprechender expliziter Nachweise wird allerdings zunächst nicht klar, auf welcher Informationsgrundlage diese Einschätzungen basieren.

An anderer Stelle finden sich darüber hinaus weitere Hinweise, die die Darstellung einer durchaus gebräuchlichen Anwendung stützen: Als einzige dem FIFO-Prinzip direkt entgegenstehende Alternative wird im Allgemeinen das LIFO-Prinzip (Last-In-First-Out) genannt, dass allerdings i.d.R. nur im Zusammenhang mit mehrfachtiefer Lagerung Beachtung erfährt (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 600) (ten Hompel & Schmidt, 2008, S. 33). Zudem erwecken entsprechende Bemerkungen für den Fall nichtverderblicher Güter den Eindruck, FIFO würde mitunter wie beispielsweise im Bereich der Automobil-Logistik als ein für jedes Glied übergreifender logistischer Ketten anzustrebendes Organisationsprinzip (Klug, 2010, S. 210) angesehen oder auch als eine Möglichkeit aufgefasst werden, ein aHRL in gewissem Sinne ordentlich zu führen, da die Entstehung von offensichtlich abschätzig bezeichneten Ladenhütern (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 600) wirksam verhindert werde.

Eine Erklärung für eine weite Verbreitung des FIFO-Prinzips findet sich im Zusammenhang mit den für Unternehmen bestehenden Pflichten der

Rechnungslegung: Zur Bilanzierung der Vorräte als Teil der Umlaufvermögen ist jedes Unternehmen gefordert, nach dem sog. Niederstwertprinzip den Stichtagswerts (Schierenbeck & Wöhle, 2012, S. 693) bzw. die Anschaffungs- oder Herstellkosten seiner Vorräte zu ermitteln. Im Allgemeinen muss dies nach dem Einzelwertfeststellungsverfahren erfolgen, d.h. für jeden einzelnen Vermögensgegenstand und für die Schulden gesondert (Schierenbeck & Wöhle, 2012, S. 692). Um den hierdurch entstehenden Aufwand zu begrenzen, ist unter bestimmten Bedingungen allerdings die Anwendung von Bewertungsvereinfachungsverfahren zugelassen, wobei die fiktiven Anschaffungskosten (Wöhe & Döring, 2013, S. 722) des zum Stichtag vorliegenden Bestands, dem Endbestand, ermittelt werden. Ein zugelassenes Bewertungsvereinfachungsverfahren stellt die sog. Sammelbewertung dar (Eisele, 2005, S. 536ff) (zur Bewertung von ‚gleichartigen‘ Vermögensgegenständen). Die Sammelbewertung erfolgt entweder in Kombination mit der sog. Durchschnittsmethode oder einem der zulässigen Verbrauchsfolgeverfahren (Eisele, 2005, S. 539). Die sog. FIFO-Methode stellt eines dieser Verbrauchsfolgeverfahren dar. Sie unterstellt, dass sich im Endbestand eines Artikels nur LE befinden, die sich aus Inhalten der zuletzt eingegangenen Beschaffungsmengen bzgl. dieses Artikels zusammensetzen: Nur die für diese Beschaffungsmengen entstandenen Kosten werden zur Ermittlung der (fiktiven) Anschaffungskosten berücksichtigt.

Zur Anwendung im Rahmen einer Steuerbilanz ist die Sammelbewertung unter Anwendung der FIFO-Methode allerdings nur dann zulässig, wenn die tatsächliche Verbrauchsfolge, d.h. die real praktizierte Reihenfolge, in der die LE des jeweiligen Artikels ausgelagert werden, auch wirklich nach dem FIFO-Prinzip erfolgt (Eisele, 2005, S. 539).

Im Zusammenhang mit der Querverteilungsstrategie führt die entsprechende Fachliteratur nicht explizit aus, wie viele Einheiten eines Artikels bzw. welche Anteile seines Bestands auf wie viele bzw. welche Lagergassen zu verteilen sind. Geht man allerdings davon aus, dass sämtliche RBG sich in ihren Verfügbarkeitseigenschaften ähneln, dann gibt es in diesem Zusammenhang keine Grundlage dafür, bei der Einheitenverteilung einzelne Gas-

sen anderen vorzuziehen – d.h. die zu verteilenden Einheiten eines Artikels sind über sämtliche Gassen gleichmäßig zu verteilen. Geht man des Weiteren davon aus, dass die Dauer eines RBG-Ausfalls bzw. die Menge der während des Ausfalls auszulagernden LE eines Artikels nicht mit Sicherheit vorherzusehen ist, dann lässt sich auch nicht diejenige Teilmenge des Artikelbestands mit Sicherheit bestimmen, welche auf die Regalgassen zu verteilen wäre, um eine gewisse Ausprägung der Artikelverfügbarkeit zu gewährleisten. Vielmehr lässt sich eine *größtmögliche Artikelverfügbarkeit* dadurch durchgängig erzielen, indem Einlagerungen stets so erfolgen, dass die Gassenbestände des jeweiligen Artikels möglichst gleich groß sind. Dies lässt sich dadurch erreichen, dass für jede neu einzulagernde LE ein freier Lagerplatz in jener Gasse ausgewählt wird, die im Vergleich mit den übrigen Gassen über den minimalen Bestand des betrachteten Artikels verfügt. Falls allerdings weitere Gassen ebenfalls genau diesen minimalen Bestand aufweisen, ist offen, in welcher der Gassen mit minimalen Einheitenbestand einzulagern ist. In solchen Fällen von Einlagerungen sind die im Betrieb des aHRL zu treffenden Steuerungsentscheidungen durch die Querverteilungsstrategie alleine nicht vollständig bestimmt. Naheliegend ist es in diesem Fall, die entsprechenden Entscheidungsfreiheiten dazu zu nutzen, die in Frage kommenden RBG möglichst gleichmäßig auszulasten (Scheid W.-M. , 2010) (Brandes, 1997, S. 151), d.h. die einzulagernde LE der Gasse zuzuweisen, deren RBG die geringste Auslastung aufweist bzw. als erstes sein vorheriges Lagerspiel abgeschlossen hat. Diese Strategie soll im Folgenden min-Auslastung genannt werden.

Nicht weiter geregelt ist zudem, welchen Lagerplätzen in den an einem mittels Querverteilung bestimmten Regalgang angrenzenden Regalen die einzulagernden Einheiten zugeordnet werden. Hierfür in Frage kämen jeweils sämtliche freien Lagerplätze, die vom entsprechenden RBG aus bedient werden können. Kommen andere entsprechende Betriebsstrategien (z.B. Zonierung, kürzeste Fahrzeit [KFZ]) nicht zum Einsatz, ist davon auszugehen, dass die Entscheidung, welcher konkrete Lagerplatz im Einzelfall hierbei ausgewählt wird, zufällig getroffen wird und dass dabei kein Lagerplatz einen Vorzug gegenüber einem anderen erhält.

### **3.4. Priorisierung von Einlagerstrategien**

Zieht man etwa für die Einlagerung von LE den Einsatz mehrerer unterschiedlicher Betriebsstrategien in Kombination in Betracht, ergeben sich unweigerlich einige Fragen bzgl. der Art und Weise, wie eine solche Kombination tatsächlich erfolgen könnte bzw. sollte, die seitens der entsprechenden Fachliteratur bisher noch nicht ausreichend adressiert wurden. Als Hinweisgeber auf diese offenen Fragen sollen in der Folge Simulationsexperimente anhand dreier unterschiedlicher Simulationsmodelle in Plant Simulation dienen. Mögliche Ausfälle von RBG sollen hierbei nicht betrachtet werden. Sämtliche drei Modelle bilden jeweils ein 5-gassiges aHRL ab. Jede der Gassen gewährt jeweils einem RBG Zugriff auf je zwei Regale. Jedes Regal verfügt über 100 x 20 Lagerplätze. Im Lager stehen also insgesamt 20000 Lagerplätze zur Verfügung. Der Höhenunterschied zweier übereinander liegender Lagerplätze beträgt 1360 mm (FEM 9.831, 1995). Zwischen zwei horizontal benachbarten Lagerplätzen muss ein RBG einen Fahrweg von 1087 mm zurücklegen (FEM 9.831, 1995).

Es kommen RBG zum Einsatz, deren kinematisches Verhalten den in Kapitel 3.1 gewählten Parametern entspricht. Hat die Lagersteuerung einem RBG einen Lagerauftrag erteilt, welcher nicht sofort seitens des entsprechenden RBG ausgeführt werden kann, weil dieses sein vorhergehendes Lagerspiel noch nicht abgeschlossen hat, wird der Lagerauftrag in einem RBG-spezifischen Auftragspuffer bereitgestellt. Pro RBG können auf diese Weise maximal ein Einlagerauftrag und maximal ein Auslagerauftrag gepuffert werden. Hat ein RBG ein Lagerspiel abgeschlossen und befindet sich ein einzelner Lagerauftrag im RBG-spezifischen Auftragspuffer, wird ein entsprechendes Einzelspiel initiiert: Handelt es sich bei dem vorliegenden Lagerauftrag um einen Einlagerauftrag, erfolgt ein Einzelspiel mit Einlagerung. Handelt es sich beim entsprechenden Lagerauftrag um einen Auslagerauftrag, erfolgt ein Einzelspiel mit Auslagerung. Befindet sich nach Abschluss des vorhergehenden Lagerspiels kein Lagerauftrag im RBG-spezifischen Auftragspuffer, wartet das RBG und initiiert dann erst ein neues Lagerspiel, wenn ihm ein neuer Lagerauftrag seitens der Lagersteuerung

zugewiesen wird. Als Warteposition dient dem RBG hierbei diejenige Position, welche es zur Bedienung des Ü-Punkts einnimmt. Befinden sich nach dem Abschluss des vorhergehenden Lagerspiels sowohl ein Einlager- als auch ein Auslagerauftrag im RBG-spezifischen Auftragspuffer, initiiert das RBG ein Doppelspiel.

Nach FEM 9.851 (FEM 9.851, 1978) ergeben sich unter diesen Bedingungen als Parameter  $a$  0,63 und als Zeit für ein mittleres kombiniertes Spiel 143,22 Sekunden. Würden im abgebildeten Lager ausschließlich und ununterbrochen mittlere kombinierte Spiele nach FEM 9.851 erfolgen, dann ergäbe sich ein mittlerer kombinierter Durchsatz in Höhe von 25,14 1/h. (Im Übrigen hat Schumann (Schumann M. , 2008, S. 43ff) diese und alternative Methoden der sog. statischen Spielzeitberechnung näher betrachtet.)

Für Auslagerungen kommt in jedem der drei Simulationsmodelle FIFO zum Einsatz. Immer dann, wenn eine LE einzulagern und zu diesem Zweck ein freier Lagerplatz (LP) auszuwählen ist, erfolgt die entsprechende Auswahl unter allen freien LP des Lagers in drei aufeinander folgenden Schritten, im Folgenden ‚Entscheidungsschritte‘ genannt. Für jeden dieser drei Entscheidungsschritte kommt dabei stets eine der folgenden Betriebsstrategien zu Anwendung: Querverteilung (siehe Kapitel 3.3), min-Auslastung (siehe Kapitel 3.3) und Zonierung. Allerdings erfolgt die Anwendung jeder dieser Betriebsstrategien in jedem der drei Modelle in einem anderen Entscheidungsschritt, d.h. die Anwendungsreihenfolge der Betriebsstrategien variiert von Modell zu Modell.

Unter Zonierung soll eine Ausprägung derjenigen Betriebsstrategie verstanden werden, die auch unter dem Namen Schnellläuferkonzentration (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 598), Zonung (ten Hompel & Schmidt, Warehouse Management. Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen, 2008, S. 32) oder Schnellläuferstrategie (Glass, 2008, S. 29) bekannt ist. Die Artikel des Lager-sortiments werden nach ihren Umschlagsraten in Gruppen eingeteilt. Die Einteilung der LP des Lagers in Zonen erfolgt aufgrund der gruppenspezifischen Umschlagsraten. In der hier zur Anwendung kommenden Variante

der Betriebsstrategie teilen sich die Artikel einer Artikelgruppe die LP der entsprechenden Zone. Die Auswahl eines LP innerhalb einer Zone erfolgt zufällig. Ist die ihrem Artikel entsprechende Zone bereits vollständig befüllt, wenn eine LE einzulagern ist, wird die LE in eine benachbarte Zone eingelagert.

Es existieren 100 unterschiedliche lagerhaltige Artikel, welche (siehe Spalte 1 in *Tabelle 3: Artikelstruktur*) fünf Artikelgruppen a', b', c', d' und e' bilden. Jeder Artikel lässt sich anhand seiner Artikel-Nr. (1; 2; 3; ...100) identifizieren. Artikelgruppe a' wird gebildet aus den Artikeln 1 und 2 (siehe Spalte 2 von *Tabelle 3*), Artikelgruppe b' besteht aus den Artikeln 3 bis 7, usw. Somit umfasst Artikelgruppe a' 2 Artikel (siehe Spalte 3 in *Tabelle 3*), Artikelgruppe b' 5 Artikel, usw. Zudem soll der Durchsatz, der durch Ein- und Auslagerung von LE der Artikel der Artikelgruppe a' entsteht, einen Anteil von 20% am gesamten Lagerdurchsatz haben (siehe Spalte 4 in *Tabelle 3*). Der Durchsatz der Artikelgruppe b' soll ebenfalls einem Anteil von 20% entsprechen, etc.

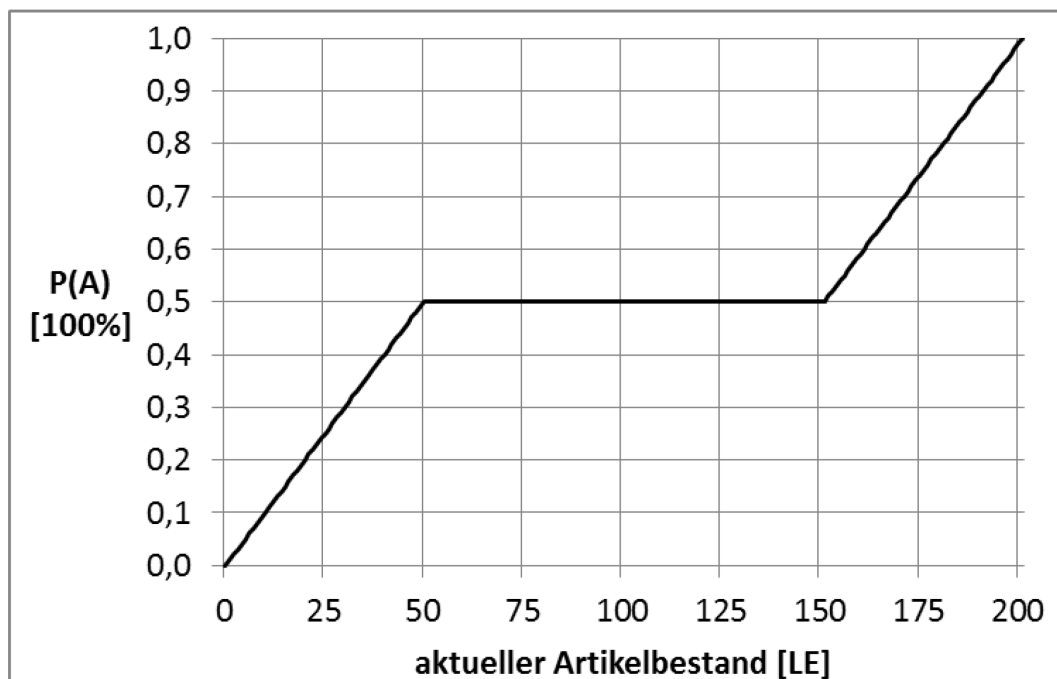
Art.-Gruppe	Art. in Gruppe	Anzahl Art. in Gruppe	anteiliger Durchsatz
a'	1-2	2	20%
b'	3-7	5	20%
c'	8-20	13	40%
d'	21-46	26	15%
e'	47-100	54	5%

**Tabelle 3: Artikelstruktur**

Immer dann, wenn der vorhergehende Lagerauftrag entweder an das RBG oder den RBG-Auftragspuffer übergeben werden konnte, für den er gemäß den geltenden Betriebsstrategien bestimmt ist, wird ein neuer Lagerauftrag generiert. Um einen neuen Lagerauftrag zu erzeugen, wird zunächst der Artikel bestimmt, auf den sich der neue Lagerauftrag beziehen soll. Diese Bestimmung erfolgt entsprechend einer Zufallsverteilung, welche auf der Anzahl von Artikeln in der entspr. Artikelgruppe (siehe Spalte 3 in *Tabelle 3*)



und dem Durchsatz-Anteil pro Artikelgruppe (siehe Spalte 4 in *Tabelle 3*) basiert. Es wird hierbei angenommen, dass auf sämtliche Artikel einer Artikelgruppe derselbe Durchsatz-Anteil entfällt. Der Durchsatz-Anteil pro Artikel einer Artikelgruppe lässt sich somit ermitteln, in dem man den anteiligen Durchsatz der Artikelgruppe (siehe Spalte 4 in *Tabelle 3*) durch die entspr. Anzahl von Artikeln pro Gruppe (siehe Spalte 3 in *Tabelle 3*) dividiert. Der Durchsatz-Anteil pro Artikel für jeden einzelnen Artikel der Gruppe a' beläuft sich also auf 10%, der Durchsatz-Anteil pro Artikel für jeden einzelnen Artikel der Gruppe b' ist demnach 4%, etc. Diese Durchsatz-Anteile pro Artikel werden beim Erzeugen eines neuen Lagerauftrags als Wahrscheinlichkeit dafür interpretiert, dass sich der neue Lagerauftrag auf den entsprechenden Artikel bezieht.



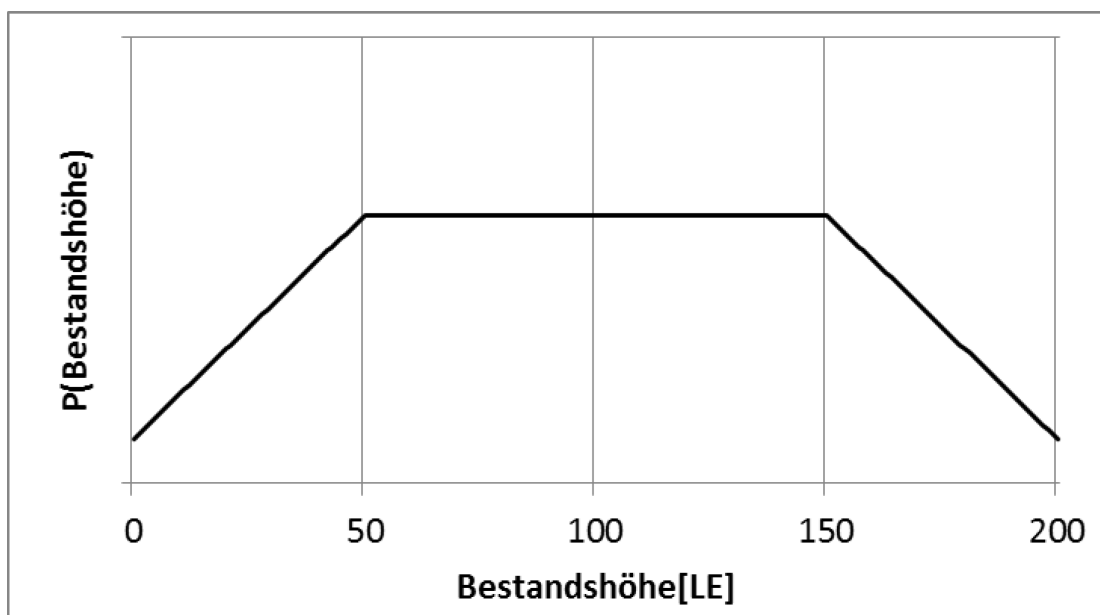
**Abbildung 3: Wahrscheinlichkeit für Auftragstyp in Abh. des aktuellen Artikelbestands**

Ob der neu entstehende Lagerauftrag ein potentieller Ein- oder ein Auslagerauftrag ist, wird ebenfalls zufällig ermittelt. Der jeweils zur Anwendung kommende Wahrscheinlichkeitswert hängt vom aktuellen Lagerbestand des jeweiligen Artikels ab. *Abbildung 3: Wahrscheinlichkeit für Auftragstyp in Abh. des aktuellen Artikelbestands* gibt für Werte des aktuellen Artikelbestands von 0 bis 200 (Ordinate) den resultierenden Wahr-

scheinlichkeitswert  $P(A)$  wieder. (Der abgebildete Graph hat zwar die Form einer durchgezogenen Linie, er wird allerdings aus einer Vielzahl von Einzelpunkten gebildet, da der aktuelle Bestand ausschließlich natürliche Zahlenwerte einschließlich 0 annehmen kann.)  $P(A)$  steht hierbei für die Wahrscheinlichkeit, mit der der neu zu generierende Lagerauftrag ein Auslagerauftrag wird. Immer dann, wenn die Realisation der entsprechenden Zufallsvariablen nicht dem Auftragsstyp eines Auslagerauftrags entspricht, wird der neu zu generierende Lagerauftrag ein Einlagerauftrag. Wenn  $P(A)$  die Wahrscheinlichkeit für Auftragsstyp gleich Auslagerauftrag ist, dann ist  $P(E)$  die Wahrscheinlichkeit für Auftragsstyp gleich Einlagerauftrag mit  $P(A) = 1 - P(E)$ . Ist der aktuelle Artikelbestand 0, ist  $P(A)$  ebenfalls 0. Mit dem von 0 bis 50 LE ansteigendem Artikelbestandswert wächst auch  $P(A)$  bis auf 50% an. Diesen Wert behält  $P(A)$  für sämtliche Bestandswerte von 50 bis 151 bei. Für Bestandswerte von 152 ( $P(A) = 51\%$ ) bis 201 wächst  $P(A)$  erneut bis zu einem Wert von 100%.

Gestützt auf diese Festlegungen kann man qualitativ auf die Wahrscheinlichkeiten schließen, mit denen einzelne Bestandswerte eines Artikels im Verlauf der Simulation auftreten (siehe *Abbildung 4: Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Auftreten von Bestandshöhen*).

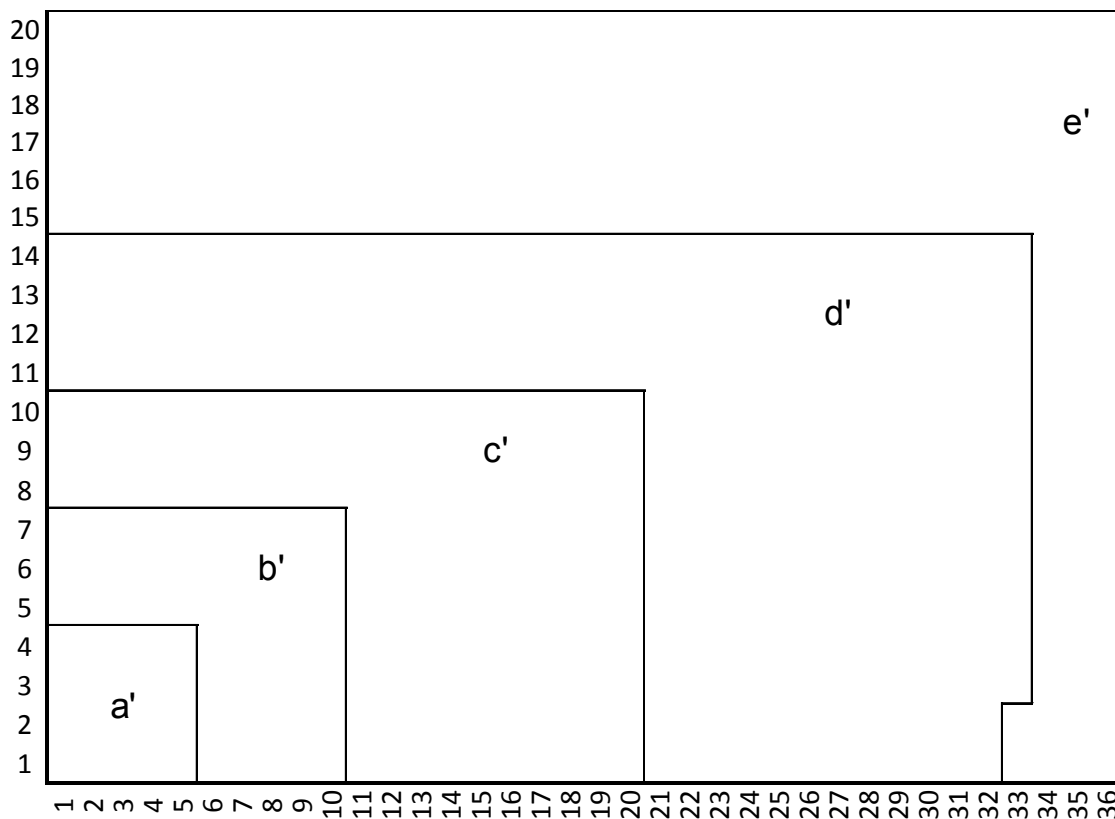
(Die Datengrundlage einer artikelspezifisch-quantitativen Darstellung lässt sich mittels der Modellierung der möglichen Bestandswerte als Zustände einer ergodischen Markov-Kette in Form der entsprechenden stationären Verteilung bestimmen. Die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Zuständen ergeben sich hierbei aus der Wahrscheinlichkeit für den Auftritt des entsprechenden Artikels sowie aus  $P(A)$  und  $P(E)$ . Die Übergangsmatrix hat eine Größe von  $202 \times 202$  Elementen.) Von der Symmetrie der vorliegenden diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilung kann man auf den Erwartungswert von 100 LE schließen.



**Abbildung 4: Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Auftreten von Bestandshöhen**

Dementsprechend ist davon auszugehen, dass bei ausreichend langer Betrachtung sich unter diesen Umständen für jeden einzelnen Artikel ein mittlerer Bestand von 100 LE ergibt. Ist der mittlere Bestand eines jeden Artikels gleich groß, verhält sich die Umschlagsrate einer Artikelgruppe/eines Artikels zu der einer/eines anderen wie deren jeweilige Durchsätze (siehe Spalte 4 in *Tabelle 3*) zueinander. Im Übrigen verhalten sich Umschlagsraten der Artikelgruppen in der oben gewählten Ausprägung so,

dass 80% sämtlicher Artikel (Artikelgruppen d und e) 20% des Gesamtumschlags erzeugen (zur sog. 80/20-Regel siehe: (Schumann M. , 2008, S. 87)).



**Abbildung 5: Zonierung eines Lagerregals**

Die LP eines jeden Lagerregals werden entsprechend der Artikelgruppen in 5 Zonen eingeteilt. *Abbildung 5: Zonierung eines Lagerregals* zeigt die entsprechende Einteilung, wobei nur die näher am jeweiligen Ü-Punkt befindlichen 36 x 20 LP dargestellt sind. Die restlichen nicht dargestellten 64 x 20 LP zählen zur Zone der Artikelgruppe e'. Jede Zone ist nach der ihr entsprechenden Artikelgruppe benannt. Die Größen der Zonen a', b', c' und d' entsprechen hierbei den mittleren Beständen sämtlicher Artikel der jeweiligen Artikelgruppe: Artikelgruppe a' beispielsweise umfasst 2 Artikel. Der mittlere Bestand zweier Artikel beträgt insgesamt 200 LE. Liegen 10 Regale vor, entfallen pro Regal 20 LE. Die Zonen sind zudem so gewählt, dass das RBG für Fahrten zwischen dem Ü-Punkt, welcher am Gasseneingang in der Darstellung horizontal links neben dem LP mit den Koordinaten (1,1) angenommen wird, und den LP der Zone a' die kürzesten Fahrzeiten benötigt. Die entsprechenden Fahrzeitdauern der Zone b' sind durchweg

größer als die der Zone a', die der Zone c' sind größer als die der b', usw. Bei den Fahrzeitdauern von/nach den LP der Zone e' handelt es sich um die größten aller bzgl. des Regals auftretenden.

Im ersten der drei Simulationsmodelle (Quer-minAus-Zone) kommt im **ersten Entscheidungsschritt** die **Querverteilung** zur Anwendung. Immer dann, wenn eine einzelne Gasse oder mehrere Gassen über den minimalen Gassenbestand des entsprechenden Artikels verfügt/verfügen, hat dieser erste Entscheidungsschritt eine oder mehrere in Frage kommende Gasse/Gassen zum Ergebnis. Besteht das Ergebnis aus mehreren Gassen, findet unter diesen im **zweiten Entscheidungsschritt** eine Auswahl unter Anwendung der Betriebsstrategie **min-Auslastung** statt. Im **dritten Entscheidungsschritt** wird ein freier LP in der dem Artikel entsprechenden Zone gemäß der **Zonierungsstrategie** in einem der beiden Regale der ausgewählten Gasse bestimmt. Stehen nach dem vorherigen Entscheidungsschritt mehrere Gassen zu Auswahl, erfolgt die Suche nach einem freien LP in sämtlichen Zonen dieser Gassen. Verfügen zwei oder mehr Gassen über mindestens einen freien LP in der entsprechenden Zone, dann wird unter diesen eine (gleichverteilt-)zufällig ausgewählt. Sollten sämtliche LP der fraglichen Zone in den Regalen sämtlicher in Frage kommender Gassen belegt sein, wird die Suche in der nächsten benachbarten Zone fortgesetzt. Existieren zwei benachbarte Zonen, wird von diesen eine (gleichverteilt-)zufällig ausgewählt und für die Suche nach einem freien LP der jeweils anderen vorgezogen.

Im zweiten der drei Simulationsmodelle (minAus-Zone-Quer) erfolgt der **erste Entscheidungsschritt** unter Anwendung der **min-Auslastungsstrategie**. Im **zweiten Entscheidungsschritt** wird ein freier LP anhand der **Zonierungsstrategie** bestimmt. Sollte der Fall auftreten, dass mehrere RBG über die minimale Auslastung verfügen, und dass mehrere unter den entsprechenden Gassen in der jeweiligen Zone mindestens einen freien LP aufweisen, dann kommt in einem **dritten Entscheidungsschritt** die **Querverteilungsstrategie** zu Anwendung, was die Auswahl der in Frage kommenden Gassen ggf. einschränkt. Sollten nach dem dritten Entscheidungsschritt

noch mehrere Gassen zur Auswahl stehen, kommt es zu einer (gleichverteilten) Zufallsentscheidung zwischen diesen.

Im dritten der drei Simulationsmodelle (Zone-Quer-minAus) wird im **ersten Entscheidungsschritt** die Betriebsstrategie **Zonierung** angewandt. Ergebnis dieses Entscheidungsschrittes sind alle diejenigen Gassen, die über mindestens einen freien LP in der artikelspezifischen Zone aufweisen sowie die jeweils pro entsprechender Gasse ermittelten LP. Unter diesen Gassen findet im **zweiten Entscheidungsschritt** eine Auswahl anhand der **Querverteilungsstrategie** statt. Sollten nach diesem Entscheidungsschritt mehrere Gassen zu Auswahl stehen, wird unter diesen im **dritten Entscheidungsschritt** anhand der Betriebsstrategie **min-Auslastung** ein Ergebnis bestimmt. Sollten nach dem dritten Entscheidungsschritt noch mehrere Gassen zur Auswahl stehen, kommt es zu einer (gleichverteilten) Zufallsentscheidung zwischen diesen.

In jedem Simulationsmodell wird während des Verstreichens der Simulationszeit nach je 24 Minuten der innerhalb dieses Zeitraums erfolgte kombinierte Durchsatz ermittelt. Dieses Vorgehen erlaubt es, auf entsprechenden Diagrammen mögliche Veränderungen des Durchsatzverhaltens zu erkennen.

Zudem werden in identischen Zeitabständen zwei weitere Kennwerte ermittelt, welche sich jeweils aus den für jeden einzelnen Artikel bestimmten Kennwert „Artikelverfügbarkeit“ errechnen. Zur Bestimmung des Kennwertes „Artikelverfügbarkeit“ eines Artikels wird zunächst dessen minimaler Gassenbestand durch den Wert seines mittleren Gassenbestands (arithmetisches Mittel) dividiert und das Ergebnis mit 100% multipliziert. Das arithmetische Mittel aus den auf diese Weise ermittelten Werten sämtlicher Artikel soll die „mittlere Artikelverfügbarkeit“ sein. Der Kennwert „Artikelverfügbarkeit-Standardabweichung“ soll gleich der unter den Werten „Artikelverfügbarkeit“ sämtlicher Artikel vorliegenden Standardabweichung sein.

Modell	99%-Ko-uG	Durchsatz [1/h]	99%-Ko-oG	99%-Ko-uG	mittlere Artikelverfügbarkeit [%]	99%-Ko-oG	99%-Ko-uG	Artikelverfügbarkeit - Standardabweichung [ ]	99%-Ko-oG
Quer- 1 -minAus- -Zone	473,039	<b>473,077</b>	473,115	98,879	<b>98,917</b>	98,956	2,375	<b>2,413</b>	2,451
minAus- 2 -Zone- Quer	501,475	<b>501,513</b>	501,552	81,298	<b>81,336</b>	81,375	10,569	<b>10,607</b>	10,646
Zone- 3 -Quer- -minAus	488,125	<b>488,163</b>	488,201	86,546	<b>86,584</b>	86,622	8,449	<b>8,487</b>	8,525

**Tabelle 4: Simulationsergebnisse – Priorisierung von Einlagerstrategien**

Pro Modell werden 5 Simulationsläufe durchgeführt. Vor dem Beginn eines jeden Simulationslaufs werden die Zonen des modellierten Lagers mit den mittleren Artikelbeständen der entsprechenden Artikel zufällig befüllt. Jeder Lauf wird über eine Simulationszeit von 15 Tagen durchgeführt. Für jeden Lauf werden die drei Kennwerte Durchsatz, mittlere Artikelverfügbarkeit und Artikelverfügbarkeit-Standardabweichung separat ermittelt. Während keiner der Läufe kam es zu einem signifikanten temporären, auf- oder abwärts gerichteten Trendverhalten unter den ermittelten Kennwerten. Pro Lauf kam es 900-mal zur Ermittlung jeweils aktueller Kennwertaussprägungen. In *Tabelle 4: Simulationsergebnisse – Priorisierung von Einlagerstrategien* sind für jedes Modell und jeden Kennwert jeweils der Mittelwert aus den sich ergebenden 4500 Einzelwerten pro Kennwert sowie die obere (oG) und untere Grenze (uG) des resultierenden 99%-Konfidenzintervalls.

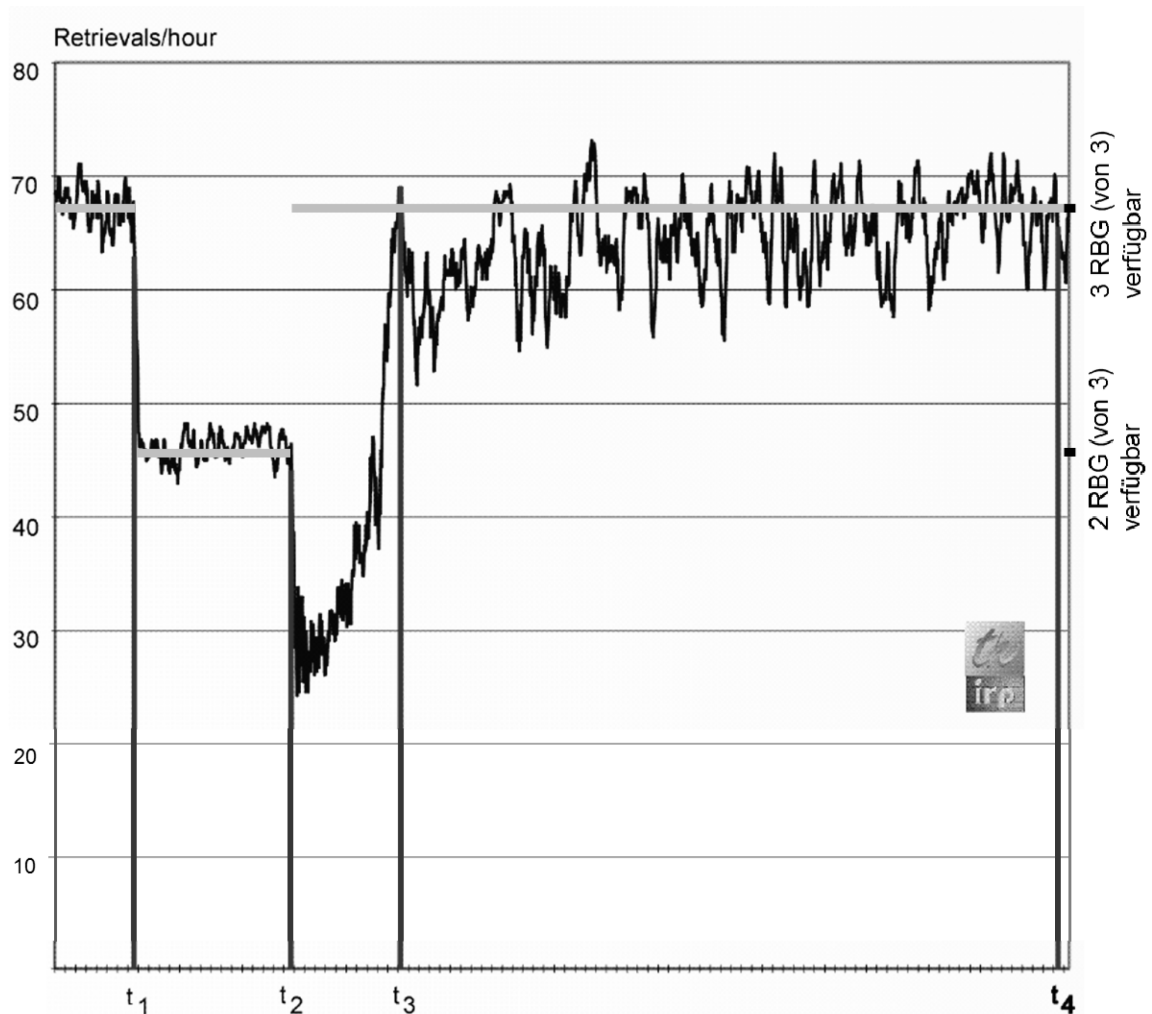
### **3.5. Verfügbarkeit und Grenzdurchsatz des betrachteten Lagersystems**

Im Geinitz'schen Simulationsmodell stellt die unablässige Bereitstellung potenzieller Ein- und Auslageraufträge eine ununterbrochene Anforderung an das modellierte aHRL dar, Durchsatz kontinuierlich zu generieren. Beim hierbei generierten Durchsatz handelt es sich genauer gesagt um den unter den gegebenen Bedingungen realisierbaren Grenzdurchsatz.

Zu erwarten wäre eine zeitlich unveränderliche Korrelationsbeziehung zwischen dem erzielten Grenzdurchsatz und der Verfügbarkeit des technischen Systems bzw. seiner Teilsysteme.



Die Geinitz'schen Simulationsergebnisse (siehe *Abbildung 6: Auslagerleistung & RBG-Verfügbarkeit nach [Geinitz, 1998]*) stehen insbesondere für den Zeitraum zwischen  $t_2$  und  $t_4$  allerdings im Widerspruch zu dieser Annahme:



**Abbildung 6: Auslagerleistung & RBG-Verfügbarkeit nach [Geinitz, 1998]**

Hierzu wurden für die Phasen  $t < t_1$  und  $t_1 < t < t_2$  das erzielte Durchschnittsniveau bzw. der mittlere Durchschnitt mit hellgrauen Linien markiert. Für  $t_2 < t$  wurde das Niveau der Markierung aus Phase  $t < t_1$  übernommen und fortgesetzt. Hierbei zeigt sich, dass der zwischen  $t_2$  und  $t_3$  erzielte Durchschnitt deutlich niedriger ist, als er es zu Beginn der Beobachtungen vor  $t_1$  war, obwohl alle drei RBG verfügbar sind.

## 4. Simulationsexperimente zum Grenzdurchsatz eines aHRL bei RBG-Ausfall

### 4.1. Bestätigung der Geinitz'schen Ergebnisse

Zur Überprüfung der von Geinitz (Geinitz, 1998) aufgezeigten Zusammenhänge, wurden neue Simulationsmodelle in Plant Simulation 8.1 erzeugt. Mit diesen Modellen lassen sich aHRL mit unterschiedlichen Gassenzahlen abbilden, in denen neu eintreffende LE querverteilt eingelagert und auszulagernde LE gemäß dem FIFO-Prinzip entnommen werden. In jeder Gasse verfährt jeweils ein RBG, welches die beiden einfach tiefen Regale, die an die jeweilige Gasse angrenzen, bedient. Für die RBG wurden aktuelle Leistungskennwerte gewählt (siehe Spalte „gewählte Ausprägung“ in *Tabelle 1: RBG für Palettenlager – Leistungskenngrößen* und *Tabelle 2: LAM für Paletten – Leistungskenngrößen*).

Jedes der Regale verfügt über 100 x 20 Stellplätze. Wie in den in Kapitel 3.4 betrachteten Simulationsmodellen beträgt der Höhenunterschied zweier übereinander liegender Lagerplätze 1360 mm (FEM 9.831, 1995). Ebenfalls muss das RBG zwischen zwei horizontal benachbarten Lagerplätzen einen Fahrweg von 1087 mm zurücklegen (FEM 9.831, 1995).

Erlaubt die Querverteilung eine Einlagerung in mehr als nur einer Gasse, wird unter den in Frage kommenden gemäß der Betriebsstrategie min-Auslastung diejenige ausgewählt, deren RBG sein aktuelles Lagerspiel zum frühesten Zeitpunkt beendet. Das Lagersortiment umfasst 100 Artikel. Unabhängig voneinander erzeugt eine Quelle potentielle Ein- und eine andere Quelle potentielle Auslageraufträge bzgl. dieser 100 Artikel. Die Artikelwahl erfolgt sowohl für potentielle Ein- wie auch für potentielle Auslageraufträge diskret gleichverteilt.

Jedes RBG verfügt über die Möglichkeit, maximal einen Ein- sowie maximal einen Auslagerauftrag vor der Ausführung zu puffern. Sobald ein Einlagerauftrag nach den beschriebenen Betriebsstrategien einem RBG direkt oder auf dessen Pufferplatz zugewiesen wurde, wird ein neuer potentieller Einlagerauftrag erzeugt und dessen mögliche RBG-Zuweisung geprüft. Diese Überprüfung wiederholt sich, sobald ein RBG ein Lagerspiel beendet hat.

Gleiches geschieht bei Auslageraufträgen. Bzgl. der Verarbeitung von Ein- und Auslageraufträgen gelten bedingt durch den modellierten Zusammenhang folgende Restriktionen: Immer wenn ein Artikelbestand auf 0 fällt, werden für diesen Artikel anstehende Auslageraufträge gelöscht. Ebenfalls unmöglich ist das Einlagern von Einheiten in eine Gasse, wenn diese vollständig gefüllt ist.

Findet ein RBG nach Beendigung eines Spiels einen einzelnen Lagerauftrag auf seinem Pufferplatz vor, führt es ein Einzelspiel aus. Liegen hingegen sowohl ein Ein- als auch ein Auslagerauftrag vor, führt das RBG ein Doppelspiel aus. Zur Ausführung von Einlageraufträgen erfolgt die Auswahl unter allen freien Lagerplätzen einer Lagergasse zufällig, d.h. die Auswahl-Wahrscheinlichkeit ist für jeden freien Lagerplatz gleich groß. Zu Beginn des durchgeführten Simulationsexperiments liegt der Füllungsgrad des Lagers bei 65 %. Es werden 30 Simulationsläufe durchgeführt.

Das Verhalten des Durchsatzes des betrachteten aHRL über mehrere Simulationsläufe hinweg stellt die wesentliche zu beobachtende bzw. zu dokumentierende Größe dar. Übertragen auf das vorliegende Modell, wäre der Durchsatz aus der mittleren Anzahl der pro Stunde ein- und ausgelagerten LE (vgl. (VDI 4480-1, 1998)) zu berechnen. Diese Vorgabe direkt umzusetzen, hieße, Durchsatzwerte stundenweise zu generieren – d.h., nach immer 60 Minuten verstrichener Simulationszeit, die währenddessen erfolgten Ein- und Auslagerungen aufzusummieren. Hierdurch ergäbe sich in einer entsprechenden Darstellung in einem Diagramm über die Zeitachse eine relativ grobe Auflösung des Modellverhaltens, da nur ein einzelner entsprechend gemittelter Wert pro Stunde Simulationszeit zur Verfügung stünde. Würde man hingegen für jedes einzelne absolvierte Lagerspiel auf den Durchsatz pro Stunde hochrechnen, (der sich einstellte, wenn das entspr. RBG in der Folge ausschließlich genau identische Lagerspiele ausüben würde,) dann ergäbe sich im Diagramm ein Band stark variierender Ergebnispunkte, aus dem wiederum ein konkretes Durchsatzniveau bzw. ein zeitlich-abhängiger Mittelwert nur schwierig ablesbar wäre. Als Kompromiss zwischen diesen Umsetzungsmöglichkeiten erfolgt die Ermittlung des Durchsatzes in 24-Minuten-Zeitschritten: Nach immer 24 Minuten

werden sämtliche Ein- und Auslagerungen, die in dem soeben abgeschlossenen Zeitschritt vollständig realisiert wurden, aufsummiert. Die auf diese Weise generierte Anzahl von Ein- und Auslagerungen eines 24-Minuten-Zeitraums wird auf eine Anzahl von Ein- und Auslagerungen pro Stunde hochgerechnet, indem das vorliegende Zwischenergebnis mit 2,5 multipliziert wird. Dieses Vorgehen führt zu einer Diagramm-Darstellung, deren Auflösung fein genug ist, um Veränderungen des Durchsatzverhaltens ohne allzu große Verzögerungen wiederzugeben und die gleichzeitig stets ein konkretes Durchsatzniveau abbildet.

Es wurden Ausfälle unterschiedlicher Dauer simuliert. Zur Beschreibung einer Reihe relevanter Effekte wird zunächst die Simulation eines 16h-Ausfalls in einem 3-gassigen aHRL dargestellt:

Jeder der in *Abbildung 7: Auswirkung eines 16h-Ausfalls auf den Grenzdurchsatz (3-gassiges aHRL)* abgebildeten dunkelgrauen Punkte entspricht einem auf die oben beschriebene Weise ermittelten und entsprechend der durchgeführten 30 Simulationsläufe gemittelten Durchsatzwert. Dementsprechend wurde in 24-Minuten-Schritten zudem die obere und die untere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls unter der Annahme berechnet, dass die für jeden einzelnen Zeitpunkt grundsätzlich möglichen Durchsatzwerte in ihren Ausprägungen normal verteilt sind (Bleymüller, Gehlert, & Gülicher, 2008, S. 87f.). Diese Intervallgrenzen variieren von einem Zeitschritt zum nächsten und wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht punktweise, sondern durch zwei, die Augen des Betrachters führende, die einzelnen Ausprägungspunkte verbindende, gezackte, hellgraue Linien in das Diagramm eingetragen.

Hierbei wird deutlich, dass die ermittelten Konfidenzintervalle im Zeitraum  $00:16:00 < t < 01:08:00$  der möglichen Vermutung entgegenstehen, bei dem ermittelten Durchsatzeinbruch im Anschluss an die Ausfallphase handele es sich um die Wirkung Modell-interner stochastischer Ausreißer. Zudem wurde mit dunkelgrauen horizontalen Linien die Mittelwerte der folgenden drei Zeitabschnitte in das Diagramm übernommen:

$-00:12:00 < t < 00:00:00$ ,  $00:00:00 < t < 00:16:00$  und  $01:11:12 < t < 02:20:24$ . (Es handelt sich jeweils um den Mittelwert aus sämtlichen im jeweiligen Zeitintervall auftretenden Durchsatzwerte.)

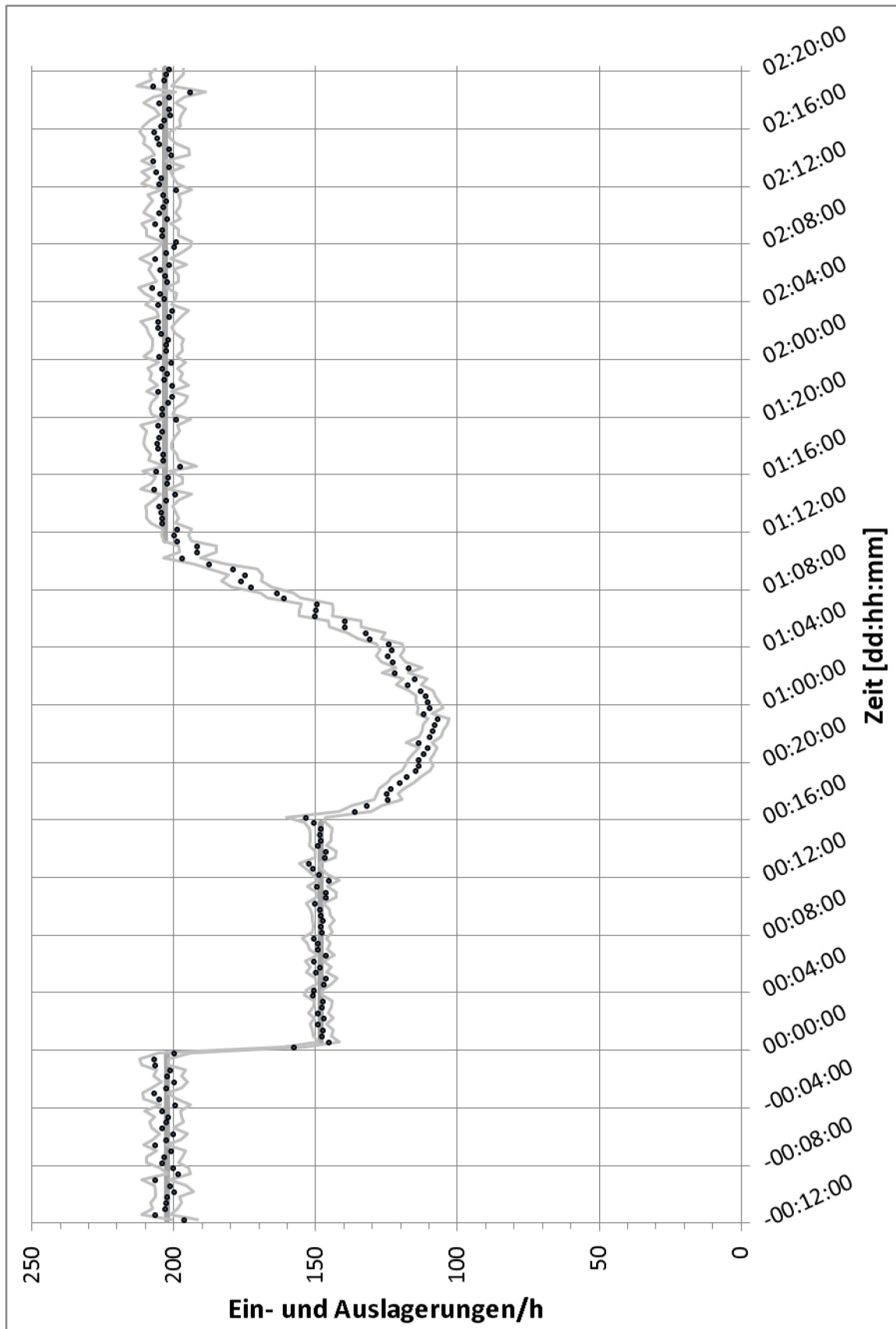


Abbildung 7: Auswirkung eines 16h-Ausfalls auf den Grenzdurchsatz (3-gassiges aHRL)

## 4.2. Modellbasierte Erklärungsansätze

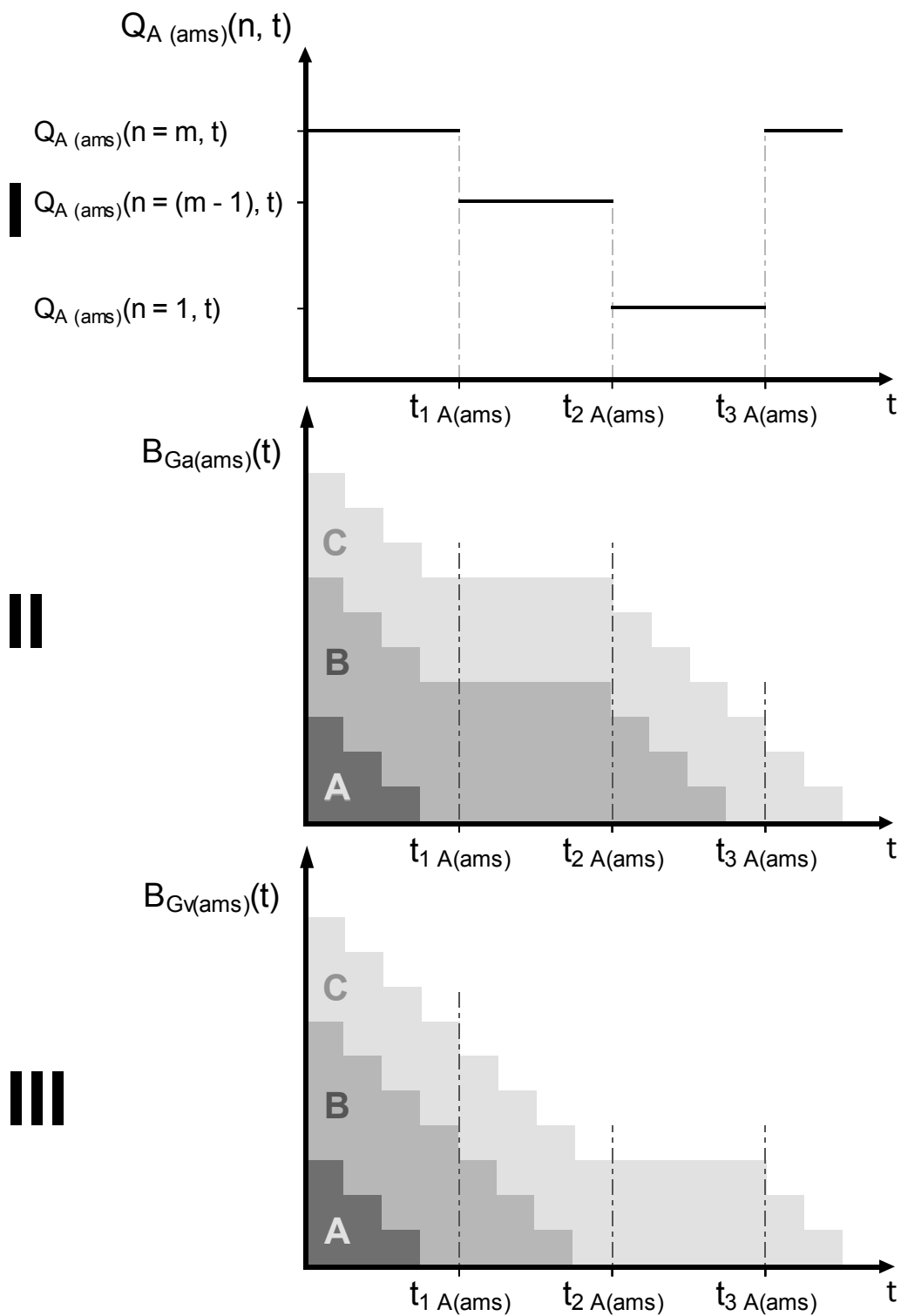
Das Verhalten des Simulationsmodells lässt sich z.T. auf stochastische Einflüsse, z.T. auf deterministische Wirkzusammenhänge zurückführen. Um letztere etwas klarer zu fassen, werden im Folgenden drei formal dargestellte, gedankliche aHRL-Modelle genutzt. Diesen Modellen gemein ist, dass das Sortiment aus einem einzelnen Artikel besteht. Die Auslastungsrate der in diesem aHRL verfügbaren RBG soll durchgehend 100% betragen. Anstelle stochastisch variierender Spielzeiten soll eine konstante Spielzeit angenommen werden. Das modellierte aHRL verfüge über  $m$  RBG (mit  $m$  einer natürlichen Zahl größer 1). Um den Bezug der verwendeten und betrachteten Größen klarzustellen, wird der Index „ams“ verwendet: „a“ für artikelspezifisch, „m“ für maximale Auslastungsrate und „s“ für standardisierte Spielzeit.

Das Modellverhalten wird vor ( $0 < t_{(ams)} < t_{1(ams)}$ ), während ( $t_{1(ams)} < t_{(ams)} < t_{2(ams)}$ ) und nach ( $t_{2(ams)} < t_{(ams)}$ ) dem Ausfall eines RBG betrachtet. Die Lagerspiele konstanter Dauer der verfügbaren RBG sollen zu Beginn der Betrachtungen zeitgleich starten. Dem zu Folge entwickelt sich das Modellverhalten aus immer nach äquidistanten Zeitschritten vollziehenden Zustandsänderungen. Wesentliche dargestellte Größen sind einerseits die gassenspezifischen Bestandsentwicklungen  $B_{G(ams)}(t)$ :

Hierbei steht  $B_{Ga(ams)}(t)$  für den Bestand der Gasse, deren RBG im Zeitraum  $t_{1(ams)} < t_{(ams)} < t_{2(ams)}$  ausfällt und  $B_{Gv(ams)}(t)$  für den Bestand der Gassen, deren RBG durchgängig verfügbar sind. Darüber hinaus ist der von der Anzahl  $n$  der verfügbaren RBG abhängige Durchsatz über die Zeit  $Q_{(ams)}(n, t)$  dargestellt.

Für das erste Modell liege zu Beginn des Betrachtungszeitraums ein hoher Lagerfüllungsgrad vor, und es sollen *ausschließlich Auslageraufträge* in Einzelspielen nach dem FIFO-Prinzip durchgeführt werden. Im Zeitraum  $0 < t_{A(ams)} < t_{1A(ams)}$  seien sämtliche  $m$  RBG verfügbar. Es ergibt sich somit ein Auslagerdurchsatz von  $Q_{A(ams)}(n = m, t)$  (siehe Diagramm I in *Abbildung 8: ams-Modell Auslagern*). Im Zeitraum  $t_{1A(ams)} < t_{A(ams)} < t_{2A(ams)}$  fällt eines der RBG aus. Es verbleiben  $m - 1$  RBG in Betrieb. Der resultierende Auslager-

durchsatz verringert sich entsprechend auf  $Q_{A(ams)}(n = (m-1), t)$  (siehe Diagramm I in: *Abbildung 8: ams-Modell Auslagern*).



**Abbildung 8: ams-Modell Auslagern**



Um das Modellverhalten für den Zeitraum  $t_{2 A(ams)} < t_{A(ams)}$  nach Wiederinbetriebnahme des ausgefallenen RBG zu ermitteln, bedarf es der eingehenderen Betrachtung der gassenspezifischen Bestandsentwicklungen (siehe Diagramm II und III in *Abbildung 8: ams-Modell Auslagern*). Vereinfachend soll hierbei angenommen werden, dass die LE der einzelnen gassenspezifischen Bestände nach den Zeitpunkten ihrer Einlagerung in drei Gruppen unterschieden werden können: Gruppe A wird aus den Einheiten gebildet, deren Einlagerungszeitpunkte am längsten zurückliegen. Gruppe C besteht aus Einheiten, die vor vergleichsweise kurzer Zeit eingelagert wurden. Die Einheiten der Gruppe B wurden nach denen der Gruppe A und vor denen der Gruppe C eingelagert.

Im Zeitraum  $0 < t_{A(ams)} < t_{1 A(ams)}$  reduzieren sich die Bestände der betrachteten Gassen gleichmäßig. Genauer gesagt werden die Einheiten der Gruppe A schrittweise vollständig abgebaut. Ab dem Zeitpunkt des RBG-Ausfalls  $t_{1 A(ams)}$  kann aus der entsprechenden Gasse nicht weiter ausgelagert werden: für die Ausfalldauer  $t_{1 A(ams)} < t_{A(ams)} < t_{2 A(ams)}$  ist  $B_{Ga(ams)}(t) = \text{konst.}$  In den Gassen mit verfügbarem RBG wird allerdings weiter ausgelagert: Die Bestände  $B_{Gv(ams)}(t)$  verringern sich im Zeitraum  $t_{1 A(ams)} < t_{A(ams)} < t_{2 A(ams)}$  weiterhin sukzessive. Hierbei werden die Einheiten der Gruppe B vollständig ausgelagert.

Folglich befinden sich zum Zeitpunkt der Wiederinbetriebnahme  $t_{2 A(ams)}$  Einheiten der Gruppe B ausschließlich noch in der Gasse, deren RBG zuvor ausgefallen war (siehe  $B_{Ga(ams)}(t_{2 A(ams)})$  in Diagramm II in *Abbildung 8: ams-Modell Auslagern*). Das FIFO-Prinzip erzwingt in dieser Situation, dass zunächst sämtliche im Lager verbleibenden Einheiten der Gruppe B ausgelagert werden: Sie bilden die LE mit den höchsten Verweildauern. *Somit werden sämtliche Auslageraufträge, welche direkt nach dem Zeitpunkt der Wiederinbetriebnahme  $t_{2 A(ams)}$  auszuführen sind, alleine dem wieder in Betrieb genommenen RBG zugewiesen.*

Zum Zeitpunkt  $t_{3 A(ams)}$  ist die letzte Einheit der Gruppe B aus besagter Gasse ausgelagert. Übrig sind ausschließlich Einheiten der Gruppe, welche über Vertreter in jeder der vorhandenen Lagergassen verfügt. Dementsprechend

können die vorliegenden Auslageraufträge wieder durch sämtliche RBG ausgeführt werden.

Für den Zeitraum  $t_{2 A(ams)} < t_{A(ams)} < t_{3 A(ams)}$  ergibt sich somit  $Q_{A(ams)}(n = 1, t)$  und für  $t_{3 A(ams)} < t_{A(ams)}$  stellt sich wieder  $Q_{A(ams)}(n = m, t)$  ein. (Aus dem Zusammenhang lässt sich ersehen, dass  $\Delta t_{21 A(ams)} = t_{2 A(ams)} - t_{1 A(ams)}$  gleich  $\Delta t_{32 A(ams)} = t_{3 A(ams)} - t_{2 A(ams)}$  ist.)

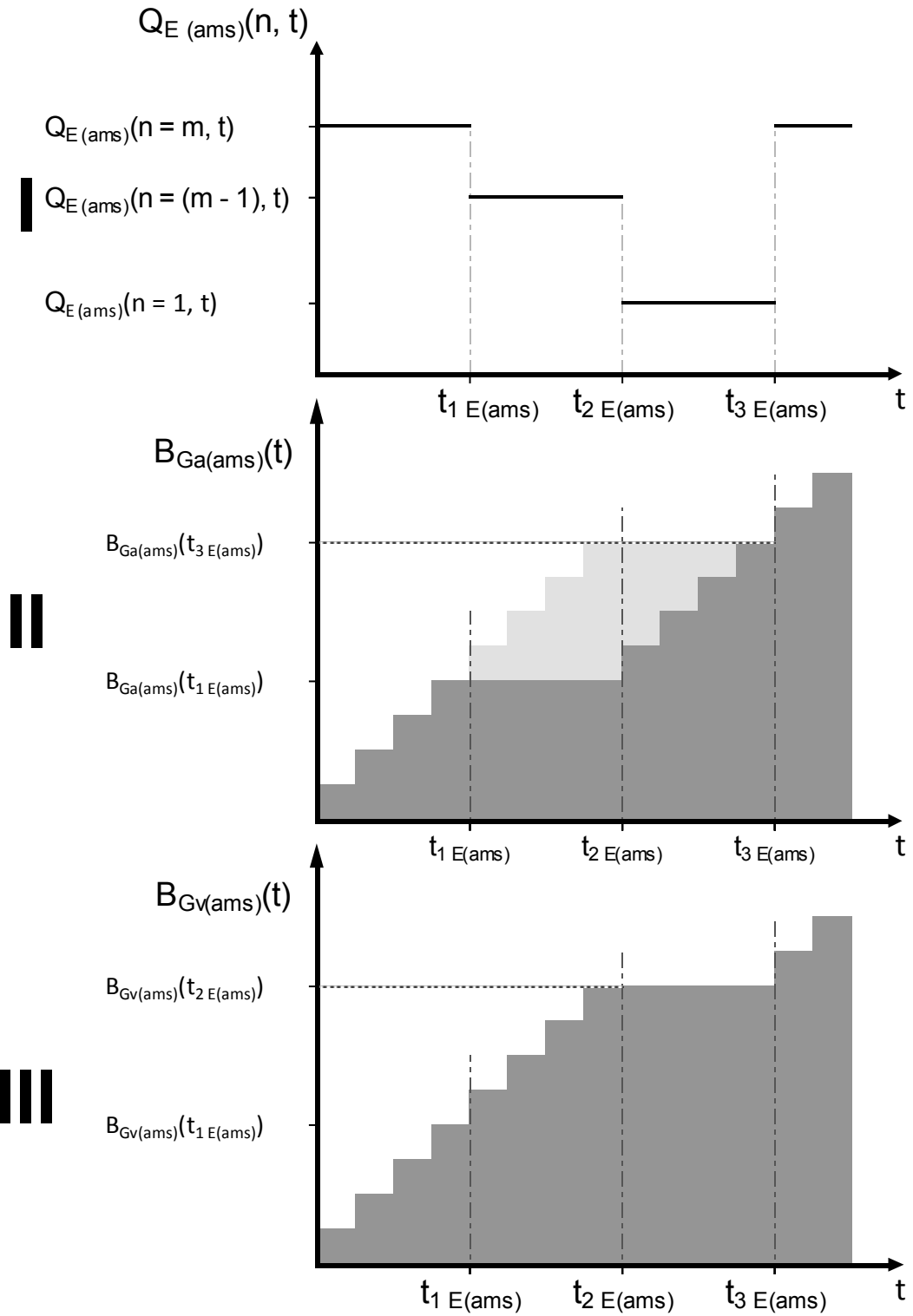


Abbildung 9: ams-Modell Einlagern

Für ein zweites Modell liege zu Beginn des Betrachtungszeitraums ein niedriger Lagerfüllungsgrad vor, und es sollen *ausschließlich Einlageraufträge*

in Einzelspielen gemäß der Querverteilungsstrategie durchgeführt werden. Im Zeitraum  $0 < t_{E(ams)} < t_{1 E(ams)}$  seien sämtliche  $m$  RBG verfügbar. Es ergibt sich somit ein Einlagerdurchsatz von  $Q_{E(ams)}(n = m, t)$  (siehe Diagramm I in *Abbildung 9: ams-Modell Einlagern*). Im Zeitraum  $t_{1 E(ams)} < t_{E(ams)} < t_{2 E(ams)}$  fällt eines der RBG aus. Es verbleiben  $m - 1$  RBG in Betrieb. Der resultierende Einlagerdurchsatz verringert sich entsprechend auf  $Q_{E(ams)}(n = (m-1), t)$  (siehe Diagramm I in: *Abbildung 9: ams-Modell Einlagern*).

Um das Modellverhalten für den Zeitraum  $t_{2 E(ams)} < t_{E(ams)}$  nach Wiederinbetriebnahme des ausgefallenen RBG zu ermitteln, bedarf es wiederum der eingehenderen Betrachtung der gassenspezifischen Bestandsentwicklungen (siehe Diagramm II und III in *Abbildung 9: ams-Modell Einlagern*). Im Zeitraum  $0 < t_{E(ams)} < t_{1 E(ams)}$  bauen die RBG die Bestände der einzelnen Gassen gleichmäßig auf. Ab dem Zeitpunkt des RBG-Ausfalls  $t_{1 E(ams)}$  kann der Bestand der entsprechenden Gasse allerdings nicht weiter vergrößert werden:

er bleibt für den Zeitraum  $t_{1 E(ams)} < t_{E(ams)} < t_{2 E(ams)}$  konstant, während die RBG der übrigen Gassen weiterhin Einlagerungen vornehmen und somit die Bestände dieser Gassen weiter vergrößern (siehe Diagramm III in *Abbildung 9: ams-Modell Einlagern*).

Zum Zeitpunkt der Wiederinbetriebnahme  $t_2$  liegt in den ununterbrochen bedienten Gassen ein Bestand  $B_{Gv(ams)}(t_{2 E(ams)})$  vor, während der Bestand der Gassen des ausgefallenen RBG noch das niedrigere Niveau  $B_{Ga(ams)}(t_{2 E(ams)}) = B_{Ga(ams)}(t_{1 E(ams)}) = B_{Gv(ams)}(t_{1 E(ams)})$  aufweist. (Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in Diagramm II in *Abbildung 9: ams-Modell Einlagern* die Bestandsentwicklung der Gassen mit ununterbrochen verfügbaren RBG  $B_{Gv(ams)}(t)$  für  $t_{1 E(ams)} < t_{E(ams)} < t_{2 E(ams)}$  in hellgrau eingetragen). Die Querverteilungsstrategie erzwingt in dieser Situation, dass sämtliche Einlageraufträge, welche direkt nach dem Zeitpunkt der Wiederinbetriebnahme  $t_2$  auszuführen sind, der wieder in Betrieb genommenen Gasse zugewiesen werden.

Zum Zeitpunkt  $t_{3 E(ams)}$  erreicht der Bestand dieser Gasse dieselbe Höhe  $B_{Ga(ams)}(t_{3 E(ams)})$  der Bestände der übrigen Gassen  $B_{Gv(ams)}(t_{2 E(ams)}) = B_{Gv(ams)}(t_{3 E(ams)})$ . Folglich werden anschließend wieder sämtlichen Gassen Einlagerauf-

träge zugewiesen. (Aus dem Zusammenhang lässt sich ersehen, dass  $\Delta t_{21}^{E(ams)} = t_{2 E(ams)} - t_{1 E(ams)}$  gleich  $\Delta t_{32}^{E(ams)} = t_{3 E(ams)} - t_{2 E(ams)}$  ist.)

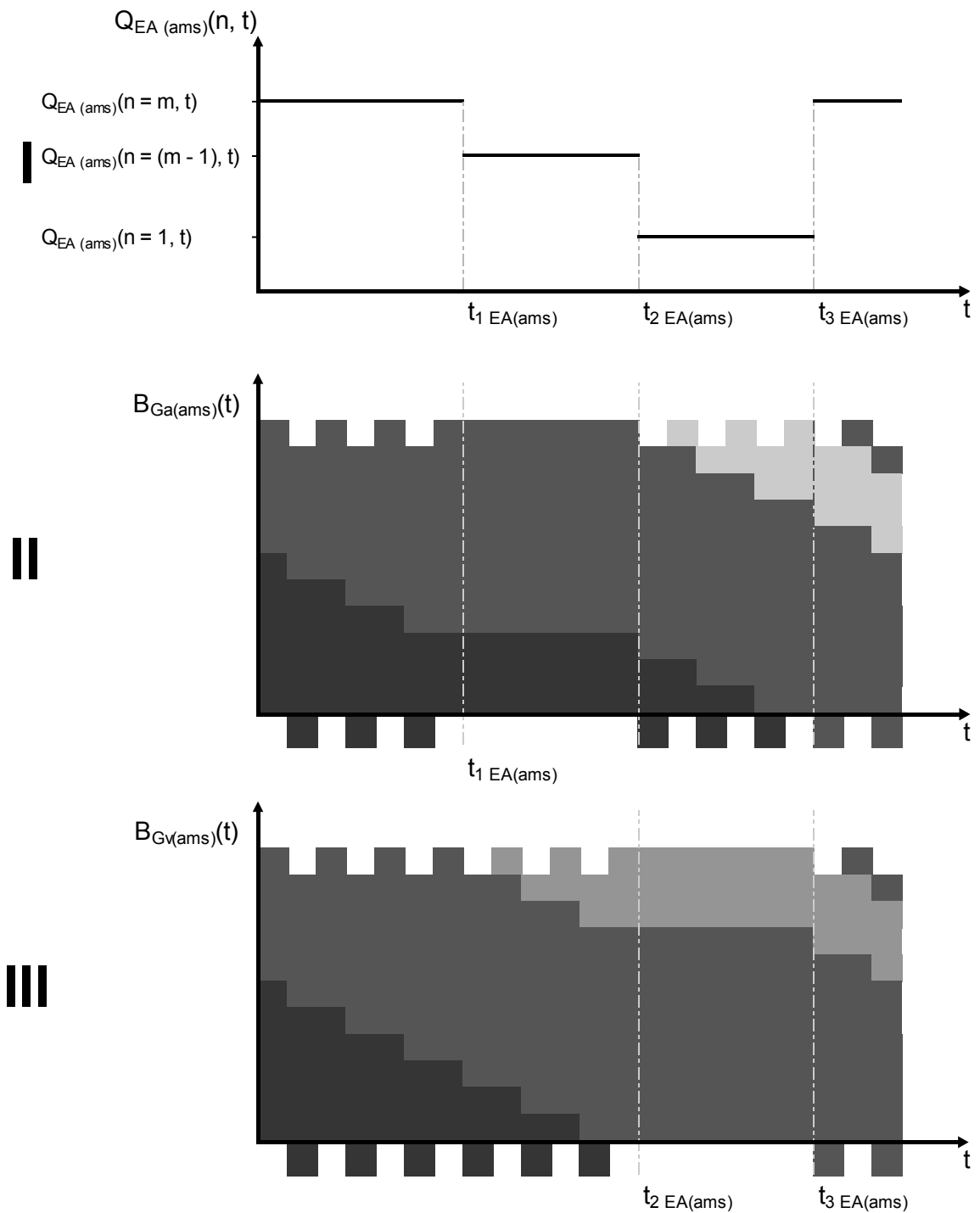


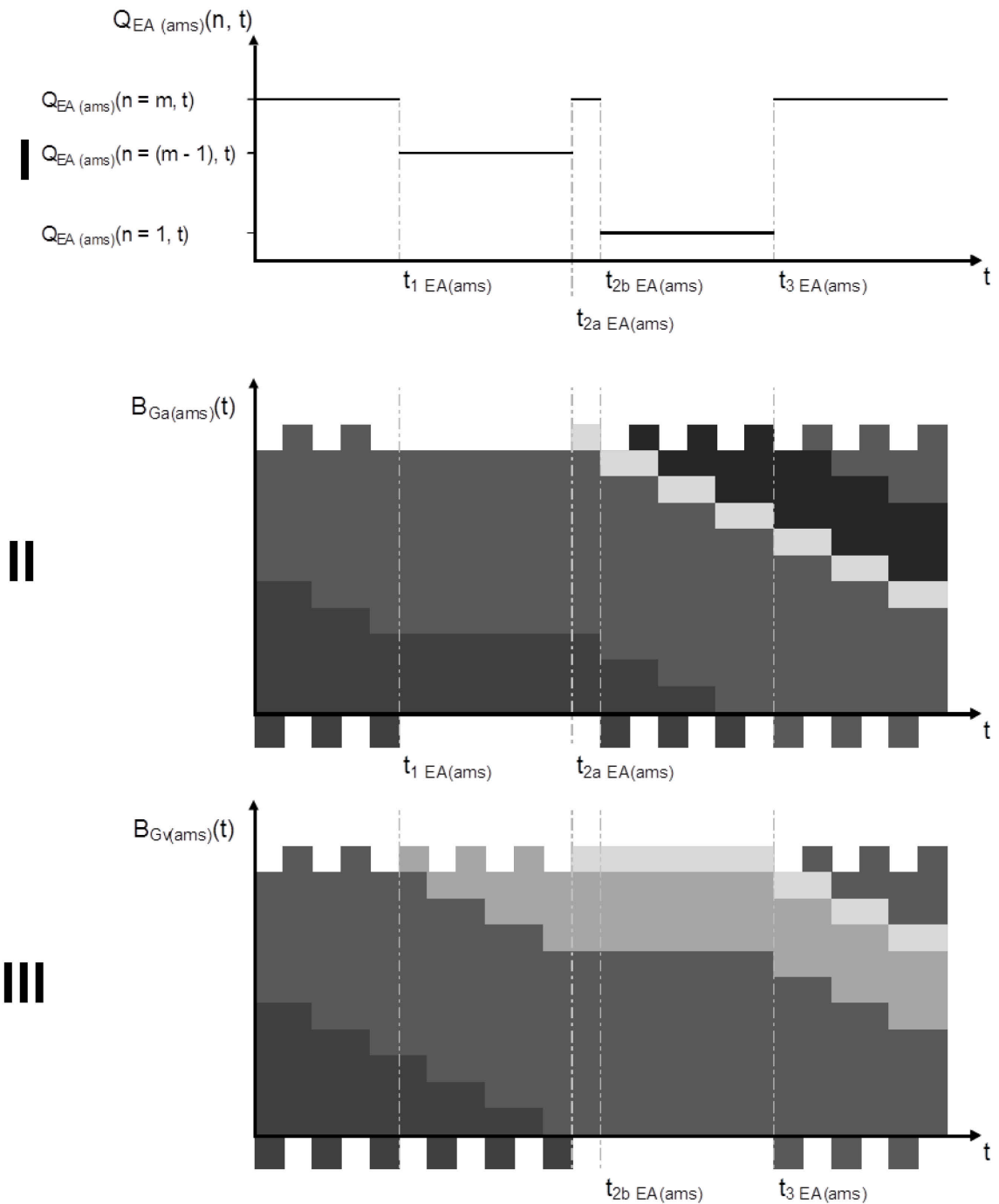
Abbildung 10: ams-Modell Ein- & Auslagern – nach Ausfall Auslagern

Für ein drittes Modell sollen kontinuierlich sowohl Ein- als auch Auslagerungen erfolgen und dabei sowohl FIFO als auch Querverteilung gelten. Hierfür werden Doppelspiele betrachtet, d.h. die erfolgenden Ein- und Auslagerungen werden im Wechsel ausgeführt. Bei dem sich ergebenden Durchsatz  $Q_{EA(ams)}(n,t)$  handelt es sich somit um den kombinierten Durchsatz (VDI 4480-1, 1998).

In den Diagrammen II und III von *Abbildung 10: ams-Modell Ein- & Auslagern* werden ausgelagerte LE durch Kästchen repräsentiert, die sich unterhalb der t-Achse befinden. Neu eingelagerte LE hingegen werden durch Kästchen dargestellt, die den jeweiligen Gassenbestand in Richtung der  $B_{G(ams)}$ -Achse vergrößern und graphisch damit sozusagen die ‚Zinnen der Bestandsmauer‘ bilden. In besagten Diagrammen werden wie in *Abbildung 8: ams-Modell Auslagern* die betrachteten LE gruppenweise ihren Einlagerungszeitpunkten entsprechend in variierenden Grautönen dargestellt.

Für dieses Modell ergeben sich zwei leicht unterschiedliche Durchsatzverläufe – je nachdem, ob direkt im Anschluss an die Aufhebung des betrachteten RBG-Ausfalls eine Auslagerung (siehe *Abbildung 10: ams-Modell Ein- & Auslagern – nach Ausfall Auslagern*) oder eine Einlagerung (siehe *Abbildung 11: ams-Modell Ein- & Auslagern – nach Ausfall Einlagern*) stattfindet.

Betrachtet man den Fall, in dem nach dem Ausfall als erstes eine Auslagerung (siehe *Abbildung 10: ams-Modell Ein- & Auslagern – nach Ausfall Auslagern*) erfolgt, ergibt sich zum Zeitpunkt  $t_{2 EA(ams)}$  ein reduzierter Durchsatz  $Q_{EA(ams)}(n = 1, t)$ . Grund hierfür ist die sich in Folge des RBG-Ausfalls einstellende Gassenverteilung von LE der Gruppe, deren Einlagerungszeitpunkte am längsten zurückliegen: Nach der RBG-Wiederinbetriebnahme befinden sich noch LE dieser Gruppe in der entsprechenden Gasse. (Aus dem Zusammenhang wird deutlich, dass  $\Delta t_{21 EA(ams)} = t_{2 EA(ams)} - t_{1 EA(ams)}$  gleich  $\Delta t_{32 EA(ams)} = t_{3 EA(ams)} - t_{2 EA(ams)}$  ist.)



**Abbildung 11: ams-Modell Ein- & Auslagern – nach Ausfall Einlagern**

Betrachtet man hingegen den Fall, dass sofort nach dem Ausfall eine Einlagerung (siehe *Abbildung 11: ams-Modell Ein- & Auslagern – nach Ausfall Einlagern*) erfolgt, stellt sich für dieses Lagerspiel zum Zeitpunkt  $t_{2a}$   $EA(ams)$  zwar kurzzeitig das ursprünglich hohe Durchsatzniveau  $Q_{EA(ams)}(n, t)$  ein – welches im Anschluss zum Zeitpunkt  $t_{2b}$   $EA(ams)$  allerdings sofort auf ein

deutlich reduziertes Niveau , nämlich auf  $Q_{EA(ams)}(n = 1, t)$  absinkt. (Aus dem Zusammenhang wird deutlich, dass  $\Delta t_{2a1 EA(ams)} = t_{2a EA(ams)} - t_{1 EA(ams)}$  gleich  $\Delta t_{32b EA(ams)} = t_{3 EA(ams)} - t_{2b EA(ams)}$  ist.)



### 4.3. Ergänzende Simulationsexperimente & Analysen

In den drei Diagrammen von *Abbildung 12: Grenzdurchsätze und Ausfälle variierender Dauer (3-gassiges aHRL)*, *Abbildung 13: Grenzdurchsätze und Ausfälle variierender Dauer (5-gassiges aHRL)* und *Abbildung 14: Grenzdurchsätze und Ausfälle variierender Dauer (10-gassiges aHRL)* ist das Durchsatzverhalten von drei aHRL-Modellen dargestellt, die sich nach ihrer Gassenanzahl (3, 5 und 10) unterscheiden. Jede einzelne Gasse verfüge hierbei über ein gassengebundenes RBG. Für jedes dieser Modelle wurden die Auswirkungen des Ausfalls eines einzelnen RBG auf den Grenzdurchsatz ermittelt. Hierbei wurden Ausfälle mit einer Dauer von 4, 8, 16, 32 und 64 Stunden betrachtet. Pro Modell und Ausfalldauer wurden 30 Simulationsläufe durchgeführt. Der RBG-Ausfall setzt jeweils zum Zeitpunkt 00:00:00 ein. (Sämtliche der in diesem Kapitel nicht näher beschriebenen Modelleigenschaften entsprechen denen, die in Kapitel 4.1 ausgeführt sind.) Da in sämtlichen Modellen die Lagervorzone nicht mit betrachtet wird, wird der resultierende Lagerdurchsatz stets aus der Summe der Durchsätze sämtlicher RBG gebildet, welche sich im jeweiligen Modell zum entsprechenden Betrachtungszeitpunkt im Betrieb befinden.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die sich ergebenden Durchsatzverläufe vor und nach dem simulierten RBG-Ausfall in der Regel dann als horizontale Linie dargestellt, wenn sie nicht signifikant vom langfristigen Durchsatzverhalten des jeweiligen Modells bei ungestörtem Betrieb abweichen.

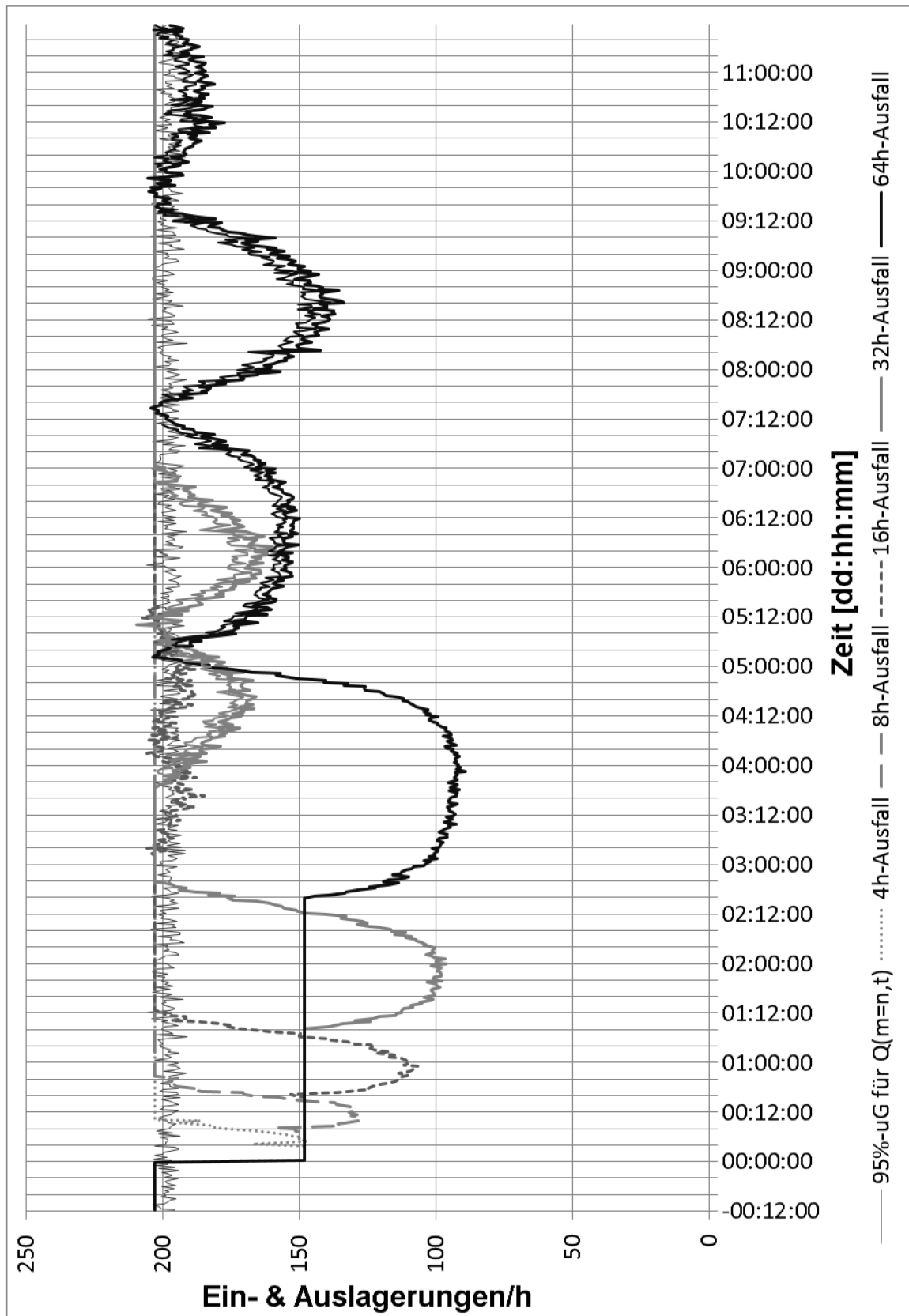


Abbildung 12: Grenzdurchsätze und Ausfälle variierender Dauer (3-gassiges aHRL)

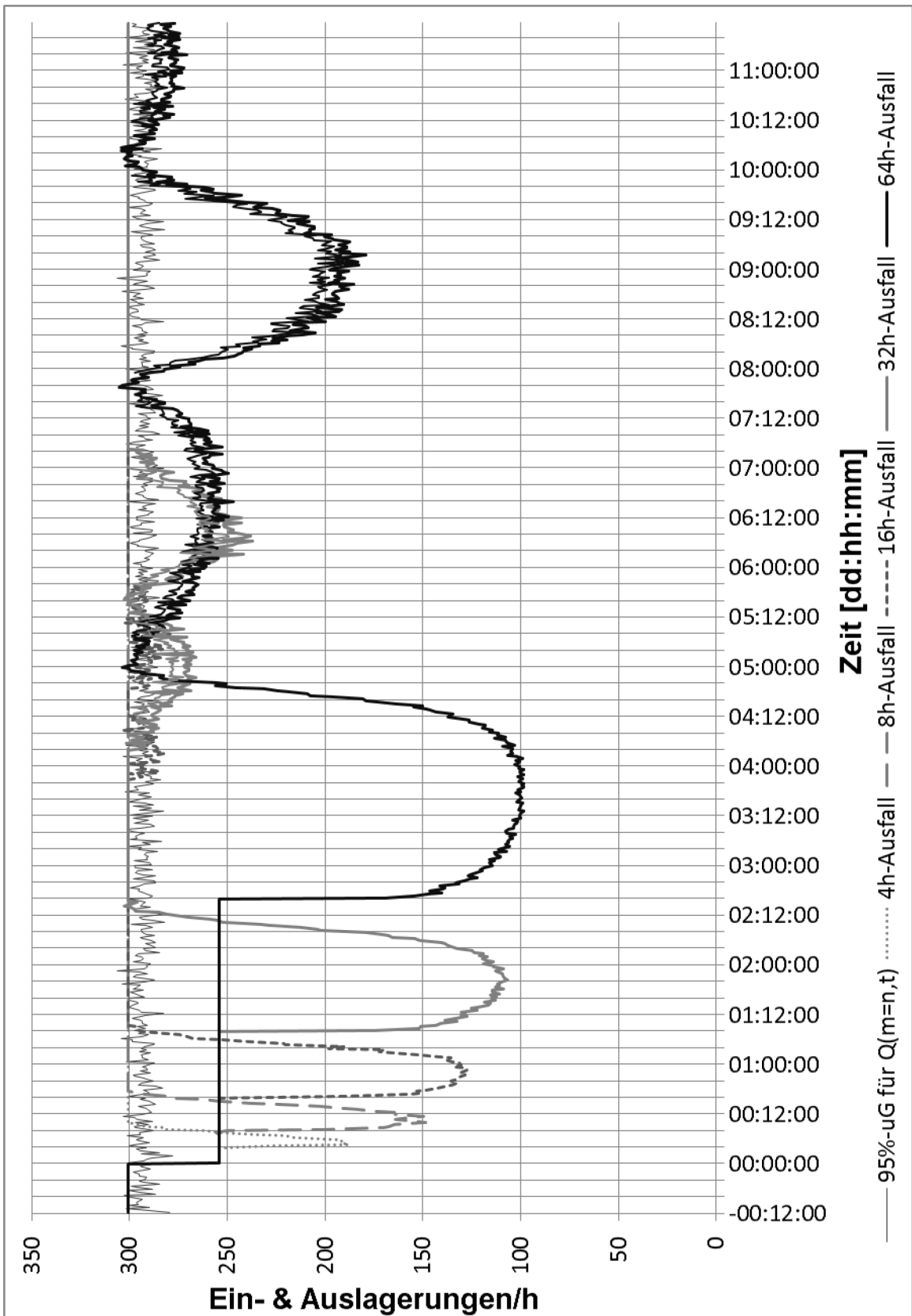


Abbildung 13: Grenzdurchsätze und Ausfälle variierender Dauer (5-gassiges aHRL)

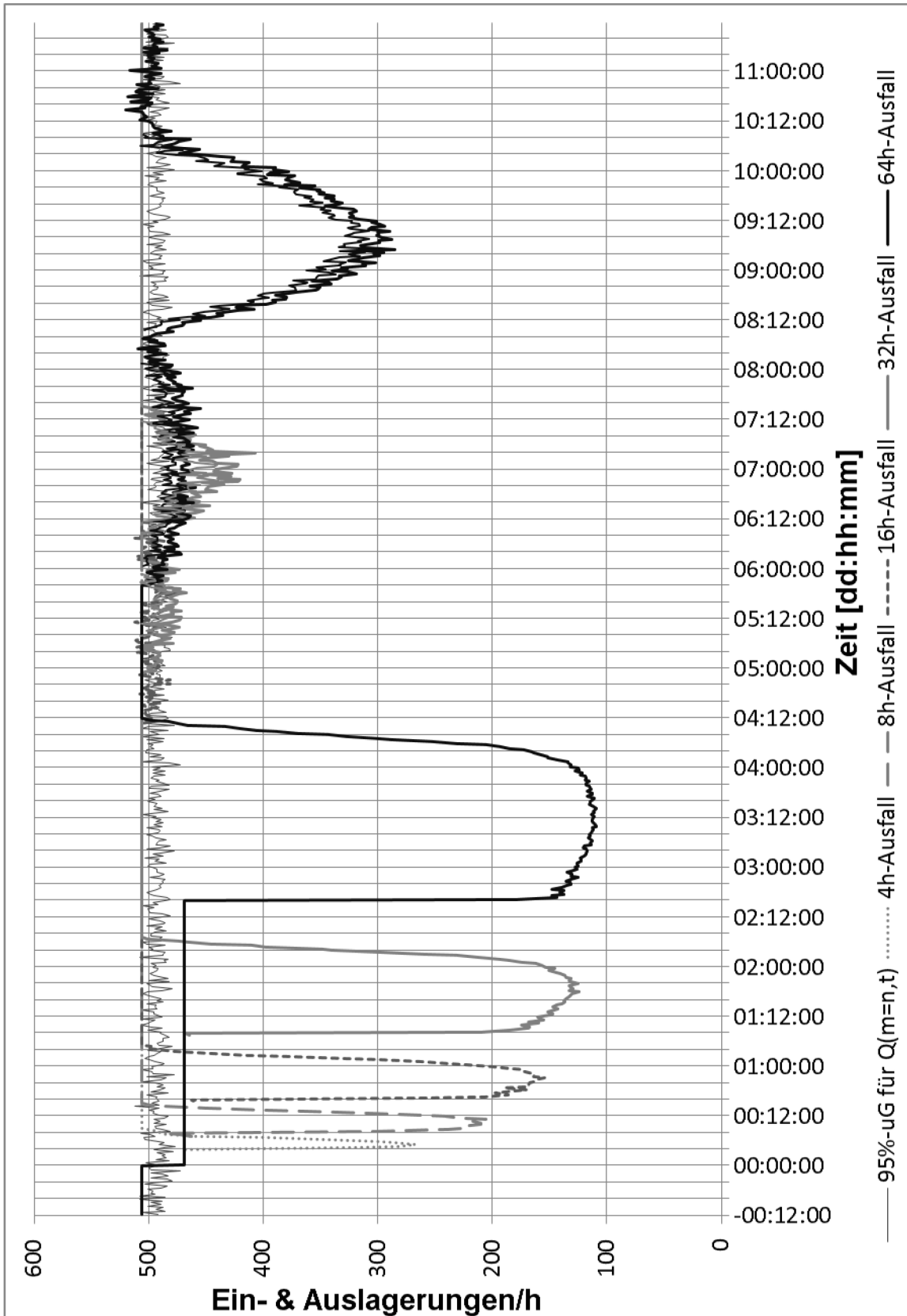


Abbildung 14: Grenzdurchsätze und Ausfälle variierender Dauer (10-gassiges aHRL)

Dies ist immer dann der Fall, wenn die obere 95%-Grenzlinie des ermittelten Durchsatzes nicht unterhalb der unteren 95%-Grenzlinie des langfristigen Durchsatzmittels bei ungestörtem Betrieb (95%-uG für  $Q(m = n, t)$ ; durchgezogene, horizontalverlaufende, graue Zickzacklinie) verläuft. Unterschreitet obere 95%-Grenzlinie des ermittelten Durchsatzes die untere 95%-Grenzlinie des langfristigen Durchsatzmittels bei ungestörtem Betrieb, dann weist das Diagramm sowohl den jeweils gemittelten Durchsatzverlauf (durchgezogene dicke Linie, hellgrau: 32h-Ausfall, schwarz: 64h-Ausfall) als auch die entsprechende obere 95%-Grenzlinie (durchgezogene dünne Linie, hellgrau: 32h-Ausfall, schwarz: 64h-Ausfall) auf.

Eine Ausnahme hierzu bildet die Eintragung des Graphs der gemittelten Durchsätze bzgl. des 16-Stunden-Ausfalls (grau-gestrichelt), zu dem aus Gründen der Übersichtlichkeit keine obere 95%-Grenzlinie eingetragen wurde. Im Fall des 3-gassigen Modells verläuft dieser Graph zwischen den Zeitpunkten 03:12:00 und 04:00:00 sowie zwischen 04:12:00 und 05:04:00 deutlich unterhalb der 95%-Grenzlinie des Durchsatzes bei ungestörtem Betrieb. Im Fall des 5-gassigen Modells sind die entsprechenden Unterschreitungen in den Zeitabschnitten 04:00:00 bis 04:08:00 sowie 05:00:00 bis 05:12:00 geringer ausgeprägt. Für das 10-gassige Modell fallen die Verlaufsunterschiede noch geringer aus: Entsprechende graphische Schnittpunkte lassen sich optisch kaum noch ausmachen (siehe Zeitpunkt 04:20:00 sowie zwischen 05:16:00 und 05:20:00).

Das langfristige Durchsatzmittel bei ungestörtem Betrieb wurde anhand von 30 Simulationsläufen ermittelt und beträgt für das 3-gassige aHRL-Modell 202,91, für das 5-gassige aHRL-Modell 300,70 und für das 10-gassige aHRL-Modell 505,66 Ein-/Auslagerungen pro Stunde.

Ebenfalls aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Durchsatzverläufe während eines RBG-Ausfalls ebenfalls als horizontale Linie dargestellt. Diese repräsentiert das Durchsatzniveau, das sich immer dann einstellt, wenn sich im laufenden Betrieb die Anzahl der verfügbaren RBG um eines vermindert. Es wurde jeweils aus den Werten des 64h-Ausfalls ermittelt und beläuft sich im Fall des 3-gassigen aHRL-Modells auf 147,98, im Fall des 5-

gassigen aHRL-Modells auf 254,14 und im Fall des 10-gassigen aHRL-Modells auf 468,90 Ein-/Auslagerungen pro Stunde.

Das Durchsatzverhalten, das sich in Folge der Ausfälle mit 4, 8, 16 und 32 Stunden ergibt, umfasst einen mehr oder weniger stark ausgeprägten Einbruch des Durchsatzes nach dem Ausfallzeitpunkt und anschließend einen Anstieg zurück auf das ursprüngliche Niveau. Für die Betrachtungsfälle 4h-, 8h-, 16h und 32h-Ausfall verhält sich die Zeitspanne, die nach der Beendigung des Ausfalls verstreicht, bis das ursprüngliche Grenzleistungsniveau wieder erreicht wird, in etwa wie die jeweilige Ausfalldauer – was den oben ausgeführten Erklärungsmustern (siehe Kapitel 4.2) entspricht und diese bestätigt: So erreicht etwa die 16h-Ausfall-Linie des 3-gassigen Modells zum Zeitpunkt 01:12:00, also 16 Stunden nach dem Ende des Ausfalls, wieder das 202,91-Niveau.

Die Durchsatzlinien zum 64-Stunden-Ausfall weichen von diesem Zusammenhang allerdings deutlich ab. Eine Überschlagsrechnung liefert einen Hinweis darauf, warum für diese Betrachtungsfälle die Zeit, die im Anschluss an den Ausfall bis zum erstmalig-erneuten Erreichen des ursprünglichen Durchsatzniveaus vergeht, nicht mit der jeweiligen Ausfalldauer übereinstimmt:

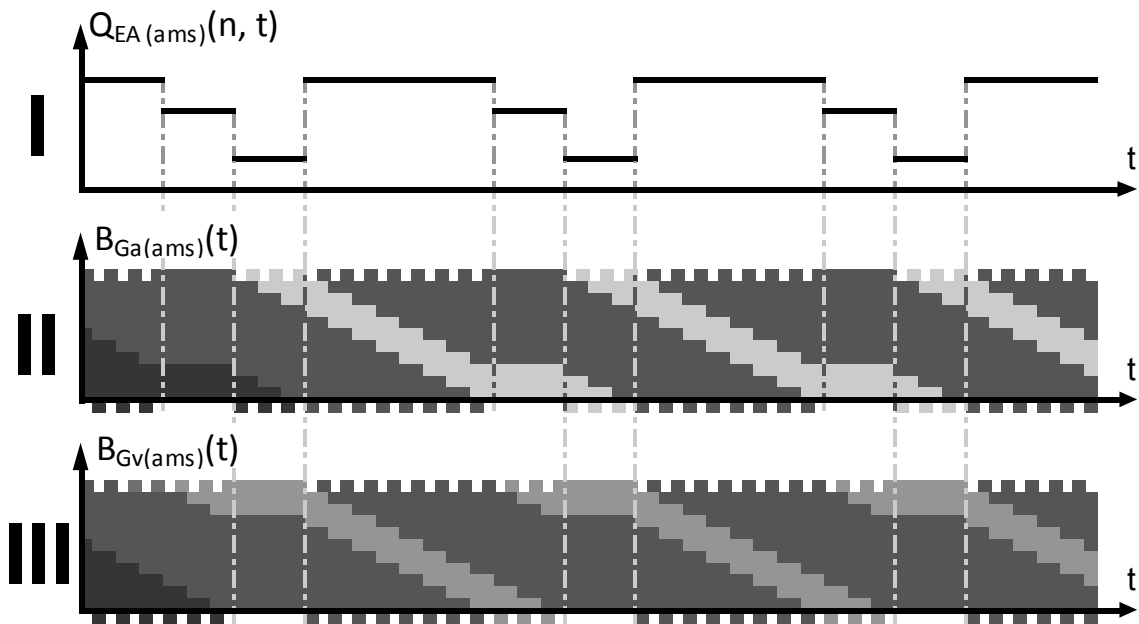
Jede Gasse der modellierten aHRL verfügt über zwei Regale à 2000 Lagerplätzen. Die drei Modelle weisen also insgesamt 12000 (3-gassig), 20000 (5-gassig) und 40000 (10-gassig) Lagerplätze auf. Angesichts eines anfänglichen Lagerfüllungsgrads von 65% befinden sich dementsprechend 7800 (3-gassig), 13000 (5-gassig) oder 26000 (10-gassig) LE zu Beginn eines jeden Simulationslaufs im Lager. Somit liegt pro Artikel im Mittel ein Bestand von **78** (3-gassig), **130** (5-gassig) oder **260** (10-gassig) Einheiten vor. Während eines RBG-Ausfalls von 64 h Dauer werden pro Stunde im Mittel rund 148 (3-gassig), 254 (5-gassig) oder 469 (10-gassig) Einheiten umgeschlagen, insgesamt also etwa 9472 (3-gassig), 16256 (5-gassig) oder 30016 (10-gassig). Bezogen auf den einzelnen Artikel sind das im Mittel ca. **95** (3-gassig), **163** (5-gassig) oder **300** (10-gassig). Hierbei ist davon auszugehen, dass auf Grund der gleichverteilt-modellierten stochastischen Einflüsse die

tatsächlichen Artikelbestände stark um diesen Mittelwert streuen. Ebenfalls streuen die während des RBG-Ausfalls umzusetzenden Aufträge bzgl. Ein- und Auslagerung sowie bzgl. des jeweils betroffenen Artikels.

Die Zeitdauer zwischen Ausfallende und dem Erreichen des ursprünglichen Grenzleistungsniveaus im Fall des 64h-Ausfalls ist kürzer als die entsprechende Ausfallzeit. Diese Beobachtung lässt sich mittels folgender beiden Umstände erklären: Einerseits werden die Bestände einzelner Artikel in den Gassen, deren RBG nicht ausfällt, vollständig abgebaut. Andererseits werden Artikelbestände während des RBG-Ausfalls mehrfach vollständig umgeschlagen, wodurch zwar Durchsatz erzeugt wird, sich allerdings die bereits vorhandenen Ungleich-Verteilungen der Artikelbestände zwischen der Gasse des ausgefallenen RBG und den übrigen nicht weiter verstärken.

Bzgl. des Durchsatzverhaltens, das sich im Zusammenhang mit Ausfällen ausgeprägter Ausfalldauer und insbesondere im Zusammenhang mit den Ausfalldauern 32h und 64h ergibt, ist zudem auffällig, dass die entsprechenden Linienverläufe, nachdem sie erstmalig nach dem Ausfall wieder das Niveau des langfristigen Durchsatzmittels bei ungestörtem Betrieb erreichen, dieses Niveau nicht etwa dauerhaft halten, sondern mit Verzögerung (32h-Ausfall) bzw. sofort (64h-Ausfall) erneut abfallen, um sich unter negativem Krümmungsverhalten wieder dem Niveau des langfristigen Durchsatzmittels bei ungestörtem Betrieb anzunähern und anschließend ein weiteres Mal (32h-Ausfall) bzw. weitere Male (64h-Ausfall) abfallen und wieder bis auf das Niveau des langfristigen Durchsatzmittels bei ungestörtem Betrieb ansteigen.

Einen ersten Erklärungshinweis auf die möglichen Ursachen dieser, nach dem erstmaligen Erreichen des Durchsatzniveaus, welches sich im ungestörten Betrieb langfristig einstellt, erneut auftretenden Durchsatzminderung, kann das oben betrachtete *ams* Modell Ein- & Auslagern (siehe *Abbildung 10: ams-Modell Ein- & Auslagern – nach Ausfall Auslagern*) liefern. Erweitert man den betrachteten Zeitraum, werden wiederholt auftretende Effekte deutlich (siehe *Abbildung 15: ams-Modell Ein- & Auslagern – fortgesetzte Betrachtung*).



**Abbildung 15: ams-Modell Ein- & Auslagern – fortgesetzte Betrachtung**

Die während des Ausfalls in den Gassen mit durchgängig verfügbaren RBG eingelagerten LE (siehe Diagramm III: Eintragungen in hellem Grau; in *Abbildung 15: ams-Modell Ein- & Auslagern – fortgesetzte Betrachtung*) erhalten Vorrang bei der FIFO-Auslagerung gegenüber jenen, die in die Gasse mit dem erneut in Betrieb genommenen RBG direkt nach der Ausfallphase eingelagert werden (siehe Diagramm II: Eintragungen in sehr hellem Grau; in *Abbildung 15: ams-Modell Ein- & Auslagern – fortgesetzte Betrachtung*). Letztere LE erhalten wiederum Vorrang bei der Auslagerung gegenüber der Gruppe jener LE, die gleichzeitig in alle Gassen eingelagert wurden. Aus diesem zweimaligen Gewähren von Auslagerungsvorrang erfolgen zwangsläufig wiederum in zeitlicher Hinsicht voneinander abweichende gassenspezifische Einlagerungen, welche wiederum unterschiedlichen Auslagerungsvorrang nach sich ziehen, usw. Die Phasen mit reduzierten Durchsätzen stellen sich somit im betrachteten ams-Modell immer wieder aufs Neue ein.



## 5. Veränderungen im Artikelbestand und deren Auswirkungen in Folge des Ausfalls eines RBG

### 5.1. Störstellenentstehung während des Ausfalls eines RBG

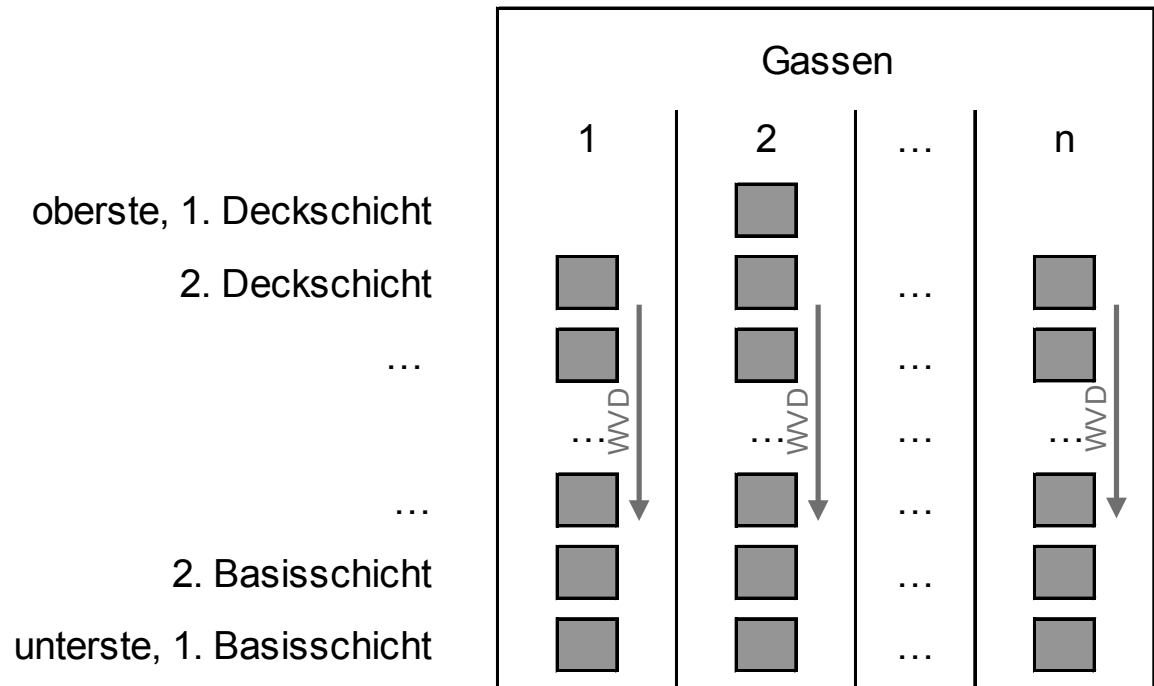


Abbildung 16: Schichtmodell der Gassenbestände eines Artikels

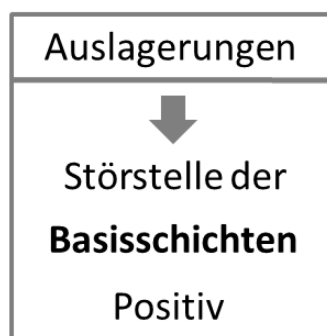
In *Abbildung 16: Schichtmodell der Gassenbestände eines Artikels* sind die LE eines Artikels sowohl nach der Gasse, in der sie lagern, gruppiert als auch innerhalb ihrer jeweiligen Gruppe nach ihrer VWD aufsteigend geordnet. Ausgehend von dem hierbei angewandten Ordnungsprinzip sollen die Einheiten mit maximaler VWD pro Gasse zusammen die sog. unterste oder erste Basisschicht oder Basisschicht Nummer 1 des Artikelbestands bilden. Die Einheiten, die in ihrer Gasse jeweils die zweitlängste VWD aufweisen, sollen die zweite Basisschicht des Artikelbestands bilden – etc. Immer dann, wenn unterschiedlich große Gassenbestände vorliegen, wird hierbei keine vollständige letzte Basisschicht ausgebildet - d.h., dass der letzten Basisschicht nicht aus jeder Gasse Einheiten angehören. Diese letzte, möglicherweise unvollständige Basisschicht soll oberste oder erste Deckschicht heißen. Die vorletzte Basisschicht soll zweite Deckschicht heißen – etc.

Zu Ausfallbeginn können die Bestände eines Artikels in sämtlichen Gassen gleich groß sein. Sind die Gassenbestände nicht gleich groß, dann kann man im Allgemeinen davon ausgehen, dass der Bestand einer bestimmten Gasse mit derselben Wahrscheinlichkeit der größte aller Gassenbestände ist, wie der Bestand einer anderen Gasse (siehe *Tabelle 5: Wahrscheinlichkeiten für relative Gassenbestandshöhe*).

Gassenanzahl mit Bestand gleich größtem Gassenbestand	1	2	...	m-1
P(„best. Gassenbestand ist gleich größtem Gassenbestand“)	1/m	2/m	...	(m-1)/m

**Tabelle 5: Wahrscheinlichkeiten für relative Gassenbestandshöhe**

Geht man davon aus, dass zu Beginn der Ausfalldauer eines RBG jede einzelne Basisschicht aus nacheinander eingelagerten LE besteht und erfolgen während des Ausfalls hinsichtlich der mittels der ungestörten RBG auslagerbaren LE dieses Artikels Auslagerungen nach dem FIFO-Prinzip, verändern diese die vorherige Zusammensetzung der Schichten, in dem sie im entspr. Schichtmodell des Artikelbestands eine Relativverschiebung zwischen den Gassenbeständen erzeugen.



**Abbildung 17: während eines RBG-Ausfalls entstehende, als Positiv ausgeprägte Basisschichten-Störstelle**

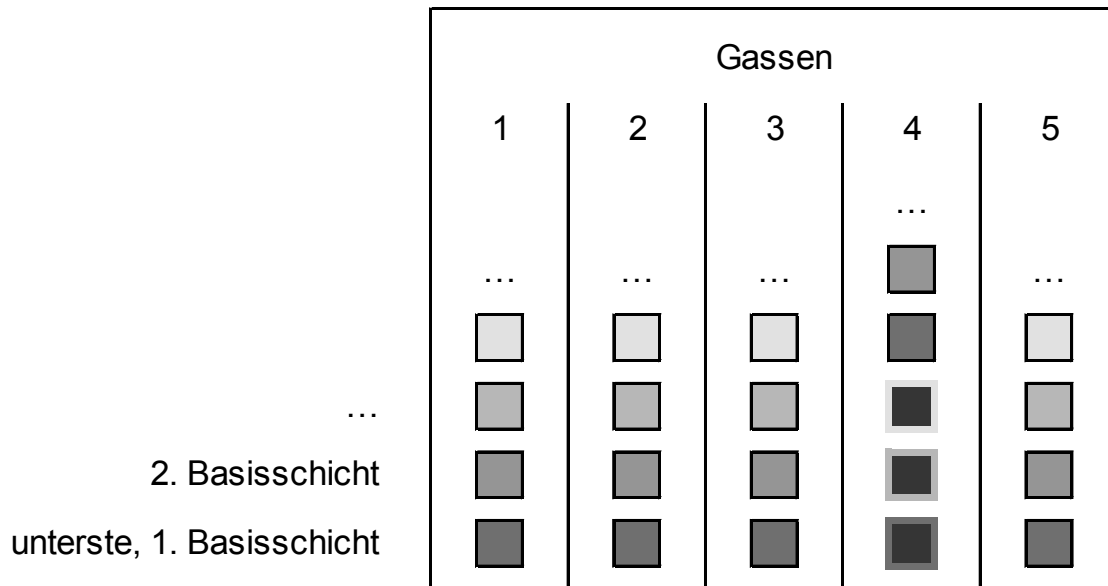
In diesem Zusammenhang soll weiterhin von einer *während eines RBG-Ausfalls entstandenen, als Positiv ausgeprägten Störstelle der Basisschichten* dann gesprochen werden (siehe *Abbildung 17: während eines RBG-Ausfalls entstehende, als Positiv ausgeprägte Basisschichten-Störstelle*), wenn während des Ausfalls mindestens eine LE des Artikels ausgelagert wurde, wel-

che eine kürzere VWD als diejenige LE des Artikels mit der größten VWD aller LE der Gasse des ausgefallenen RBG aufweist. Anders ausgedrückt soll im Weiteren dann von der Entstehung einer entsprechenden Störstelle ausgegangen werden, wenn die übliche FIFO-Auslager-Reihenfolge nicht eingehalten werden kann, weil sich die eigentlich auszulagernde LE in einer Gasse befindet, die wegen eines RBG-Ausfalls nicht bedient wird, und stattdessen die LE desselben Artikels mit der nächst größten VWD ausgelagert wird, welche in einer anderen Gasse lagert.

Je nach Anzahl der während eines RBG-Ausfalls erfolgenden Auslagerungen kann sich eine entspr. Störstelle der Basisschichten unterschiedlich stark ausprägen. Das Maß für die Ausprägung der Störstelle soll *Umfang der Störstelle* genannt werden. Der Umfang einer während des RBG-Ausfalls entstandenen, als Positiv ausgeprägten Störstelle der Basisschichten (BS) soll gleich der Anzahl der LE des Artikels sein, die, hätte die übliche FIFO-Reihenfolge aufrechterhalten werden können, eigentlich aus der Gasse des betroffenen RBG ( $G_a$ ) im Zuge der Ausfalldauer hätten ausgelagert werden müssen. Alle fraglichen LE weisen sämtliche folgenden Merkmale auf: Sie befinden sich in  $G_a$ , sie weisen die größten VWD unter den LE ihres Artikels auf, und während des Ausfalls wurde mindestens eine LE des Artikels mit geringerer VWD ausgelagert.

In *Abbildung 18: Beispiel einer während eines RBG-Ausfalls entstandenen, als Positiv ausgeprägten Basisschichten-Störstelle* ist das Schichtmodell eines Artikels in einem 5-gassigen aHRL in Folge eines RBG-Ausfalls dargestellt. Gleichfarbige Kästchen repräsentieren LE, die vor dem RBG-Ausfall eingelagert wurden und derselben Basisschicht angehörten. Die drei dunkelgrau gefüllten, dick umrandeten Kästchen der Gasse 4 stellen LE dar, die während des Ausfalls des RBG der Gasse 4 nicht ausgelagert wurden und die zum Endzeitpunkt des Ausfalls die größten VWD sämtlicher lagerhaltiger LE des Artikels aufweisen. Während des Ausfalls sei mindestens eine LE mit geringerer VWD als die der drei LE mit maximaler VWD ausgelagert worden. Der Umfang der hiermit dargestellten als Positiv aus-

geprägten Störstelle der Basisschichten in Folge eines RBG-Ausfalls beträgt dementsprechend 3.



**Abbildung 18: Beispiel einer während eines RBG-Ausfalls entstandenen, als Positiv ausgeprägten Basisschichten-Störstelle**

Wie viele Auslagerungen während des Ausfalls eines RBG sind mindestens nötig, um eine entspr. Störstelle mit  $BS = 1$  zu erzeugen?

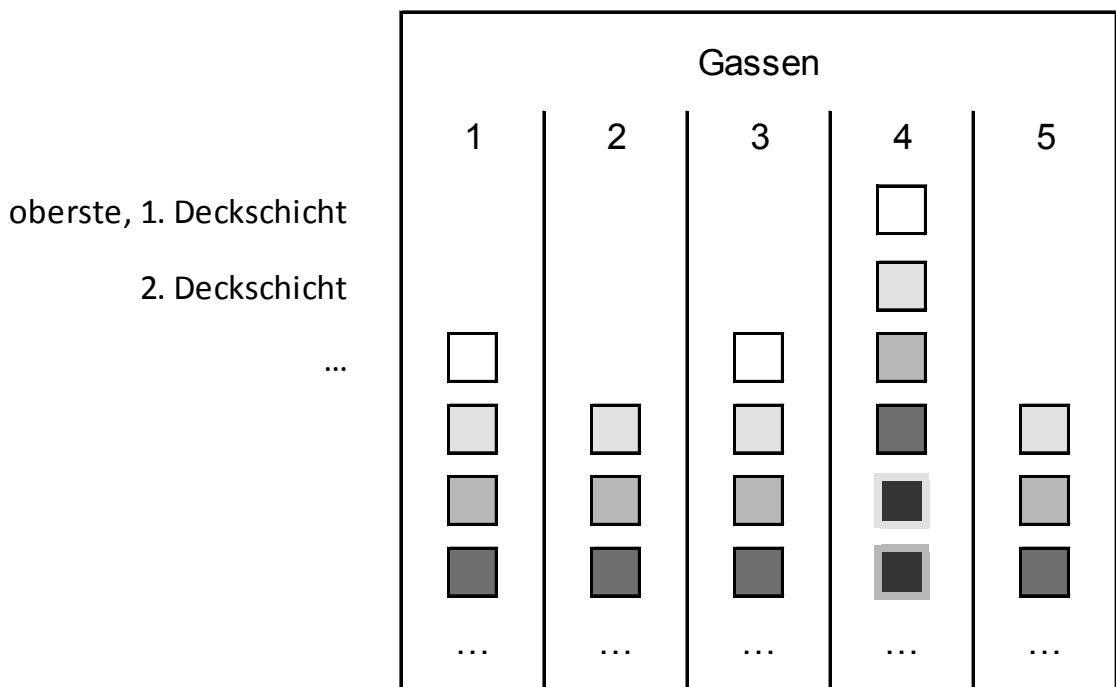
Bereits die erste während eines RBG-Ausfalls erfolgende Auslagerung kann eine Basisschichten-Störstelle dann erzeugen, wenn die LE des Artikelbestands mit größter VWD sich in  $G_a$  befindet. Befinden sich die LE mit den größten VWD in der untersten Basisschicht und weisen die LE der untersten Basisschichten sämtlicher Gassen mit ungestörten RBG ( $G_1, G_2, \dots, G_{m-1}$ ) größere VWD als die entsprechende LE der Gasse mit ausgefallenen RBG, dann erzeugt erst die  $m$ -te Auslagerung eine Basisschichten-Störstelle mit Umfang 1.

Nach je  $m-1$  weiteren Auslagerungen, die im Anschluss an diejenige Auslagerung, die die Basisschichten-Störstelle eines Artikels während eines RBG-Ausfalls erzeugt, inkrementiert der Umfang der Basisschichten-Störstelle  $BS$ .

Der sich durch Auslagerungen während der Ausfallzeit maximal ausprägbare Umfang der Basisschichtenstörstelle ist gleich der Anzahl der LE, die sich während des Ausfalls in  $G_a$  befinden. Dieser Zusammenhang begrenzt die während eines RBG-Ausfalls maximal mögliche Ausprägung von  $BS$ .

Finden während des Ausfalls ausschließlich Auslagerungen statt, dann verändert sich nicht nur die Zusammensetzung der untersten Basischichten im Schichtmodell des Artikelbestands, sondern auch die der obersten Deckschichten, da sich durch die erfolgenden Auslagerungen nur die Bestände der  $G_1, G_2, \dots, G_{m-1}$  verringern, der Bestand von  $G_a$  hiervon allerdings unverändert bleibt.

In diesem Zusammenhang soll weiterhin von einer *während eines RBG-Ausfalls entstandenen, als Positiv ausgeprägten Störstelle der Deckschichten* dann gesprochen werden, wenn ein einzelner größter Gassenbestand des betrachteten Artikels existiert, der sich in  $G_a$  befindet und welcher über mindestens 2 LE mehr als der kleinste Gassenbestand des betrachteten Artikels verfügt. Der Umfang einer während eines RBG-Ausfalls entstandenen, als Positiv ausgeprägten Störstelle der Deckschichten (DS) soll gleich der um 1 reduzierten Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Gassenbestand des betrachteten Artikels sein.



**Abbildung 19: Beispiel einer während eines RBG-Ausfalls entstandenen, als Positiv ausgeprägten Deckschichten-Störstelle**

*Abbildung 19: Beispiel einer während eines RBG-Ausfalls entstandenen, als Positiv ausgeprägten Deckschichten-Störstelle zeigt eine entspr. Störstelle*

mit  $DS = 2$ , wie sie in Folge von Auslagerungen während eines Ausfalls des RBGs der Gasse 4 entstehen könnte.

Wie viele erfolgreiche Auslagerungen eine entspr. Deckschichten-Störstelle mit  $DS = 1$  erzeugen hängt davon ab, welche Form die obersten Deckschichten zu Ausfallbeginn hatten und in welcher Reihenfolge die Auslagerungen aus  $G_1, G_2, \dots, G_{m-1}$  erfolgen. Die beiden im Folgenden beschriebenen Fälle repräsentieren Extremsituationen. Die sich artikelspezifisch realisierende Situation weist Merkmalsausprägungen auf, die entweder zwischen denen der hier beschriebenen Extremsituationen liegen, oder die einer von beiden entsprechen.

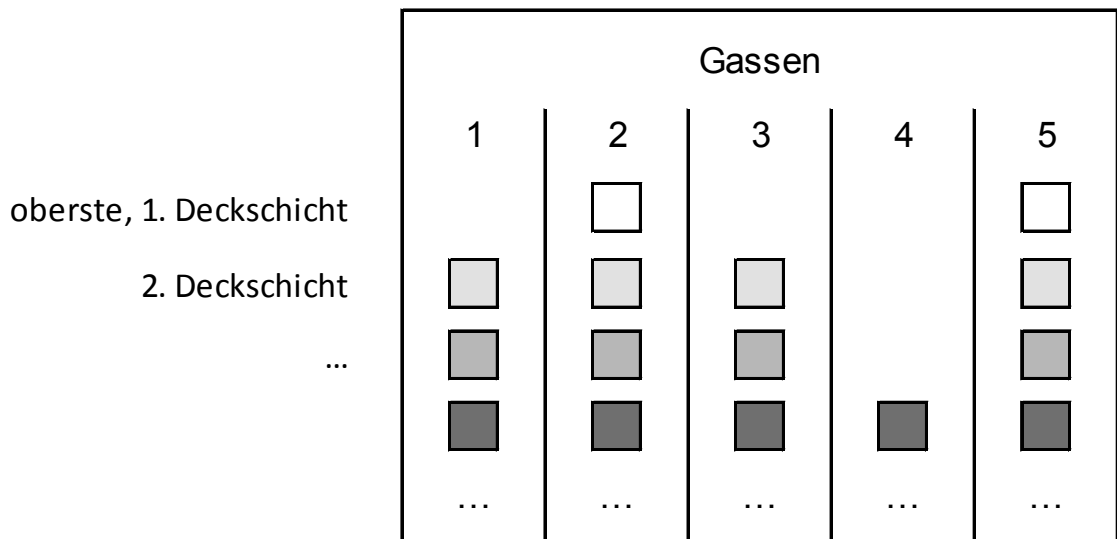
- a) Zu Ausfallbeginn verfügt alleine  $G_a$  über einen Bestand, der geringer als das arithmetische Mittel sämtlicher Gassenbestände ist. Nach  $2(m-1)$  erfolgten Auslagerungen ist dieser Gassenbestand als einziger größer als der mittlere Gassenbestand. Die nächste erfolgreiche Auslagerung erzeugt eine Deckschichten-Störstelle.
- b) Zu Ausfallbeginn verfügt alleine  $G_a$  über einen Bestand der größer als der mittlere Gassenbestand ist. Die erste erfolgreiche Auslagerung erzeugt eine Deckschichten-Störstelle.

Finden während eines Ausfalls ausschließlich Auslagerungen statt, erzeugt also möglicherweise schon die erste, spätestens aber die  $2(m-1)+1$ -te Auslagerung eine Deckschichten-Störstelle mit  $DS = 1$ .

Nach je  $m-1$  weiteren Auslagerungen, die im Anschluss an diejenige Auslagerung, die eine Deckschichten-Störstelle eines Artikels während eines RBG-Ausfalls mit  $DS = 1$  erzeugt, stattfinden, inkrementiert der Schichtumfang der Deckschichten-Störstelle  $DS$ , wenn während des Ausfalls ausschließlich Auslagerungen erfolgen.

Von einer als *während eines RBG-Ausfalls entstandenen als Negativ ausgeprägten Störstelle der Deckschichten* soll gesprochen werden, wenn bei Beendigung des RBG-Ausfalls ein einzelner kleinster Gassenbestand des betrachteten Artikels existiert, dieser sich in  $G_a$  befindet, und ein Bestandsunterschied zwischen größtem und kleinstem Gassenbestand von mindes-

tens 2 LE besteht. Der Umfang einer während eines RBG-Ausfalls entstandenen, als Negativ ausgeprägten Störstelle der Deckschichten (DS) soll betragsgleich der um 1 reduzierten Differenz zwischen größtem und kleinstem Gassenbestand des betrachteten Artikels sein und ein negatives Vorzeichen haben.



**Abbildung 20: Beispiel einer während eines RBG-Ausfalls entstandenen, als Negativ ausgeprägten Deckschichten-Störstelle**

Abbildung 20: Beispiel einer während eines RBG-Ausfalls entstandenen, als Negativ ausgeprägten Deckschichten-Störstelle zeigt eine entspr. Störstelle mit  $DS = -2$ , wie sie in Folge von Einlagerungen während eines Ausfalls des RBGs der Gasse 4 entstehen könnte.

Wie viele Einlagerungen erzeugen eine entspr. Deckschichten-Störstelle mit  $DS = -1$ , wenn während eines RBG-Ausfalls ausschließlich Einlagerungen erfolgen?

Die Anzahl nötiger Einlagerungen hängt davon ab, welche Form die obersten Deckschichten zu Ausfallbeginn hatten. Die beiden im Folgenden beschriebenen Fälle repräsentieren Extremsituationen. Die sich artikelspezifisch realisierende Situation weist Merkmalsausprägungen auf, die entweder zwischen denen der hier beschriebenen Extremsituationen liegen, oder die einer von beiden entsprechen.

- a) Zu Ausfallbeginn verfügt alleine  $G_a$  über einen Bestand, der kleiner als das arithmetische Mittel sämtlicher Gassenbestände ist. Die nächste erfolgende Einlagerung erzeugt eine Deckschichten-Störstelle.
- b) Zu Ausfallbeginn verfügt alleine  $G_a$  über einen Bestand der größer als der mittlere Gassenbestand ist. Nach  $2(m-1)$  erfolgten Einlagerungen ist dieser Gassenbestand als einziger kleiner als der mittlere Gassenbestand. Die erste weitere Einlagerung erzeugt eine Deckschichten-Störstelle.

Finden während eines Ausfalls ausschließlich Einlagerungen statt, erzeugt also möglicherweise schon die erste, spätestens aber die  $2(m-1)+1$ -te Einlagerung eine Deckschichten-Störstelle mit  $DS = -1$ .

Nach je  $m-1$  weiteren Einlagerungen, die im Anschluss an diejenige Einlagerung, die eine Deckschichten-Störstelle eines Artikels während eines RBG-Ausfalls mit  $DS = -1$  erzeugt, stattfinden, dekrementiert der Schichtumfang der Deckschichten-Störstelle  $DS$ , wenn während des Ausfalls ausschließlich Einlagerungen erfolgen.

DS	Umfang einer Störstelle der Deckschichten in Folge eines RBG-Ausfalls
$DS < 0$	Ausprägung der Störstelle als Negativ
$DS = 0$	keine Störstelle vorliegend
$DS > 0$	Ausprägung der Störstelle als Positiv

**Tabelle 6: Umfang  $DS$  von Störstellen der Deckschichten in Folge eines RBG-Ausfalls**

Erfolgen während eines RBG-Ausfalls sowohl Ein- als auch Auslagerungen, wirken diese unterschiedlichen Lagerauftragstypen in antagonistischer Weise auf die resultierende Deckschichten-Störstelle: ausreichend viele Auslagerungen erhöhen  $DS$  während ausreichend viele Einlagerungen sich verringernd auf  $DS$  auswirken (siehe *Tabelle 6: Umfang  $DS$  von Störstellen der Deckschichten in Folge eines RBG-Ausfalls*). Resultieren ausreichend mehr Ein- als Auslageraufträge, ergibt sich das Negativ einer Deckschichten-Störstelle. Resultieren ausreichend weniger Ein- als Auslageraufträge,



ergibt sich das Positiv einer Deckschichten-Störstelle. In beiden Fällen gilt: Je geringer der Unterschied zwischen den Summen der Auftragstypen ist, desto geringer ist der Schichtumfang der resultierenden Störstelle. Erfolgen genau gleich viele Aus- wie Einlageraufträge, resultiert keine Störstelle der Deckschichten.

Die beiden im Folgenden beschriebenen Fälle repräsentieren Extremsituationen. Die sich artikelspezifisch realisierende Situation weist Merkmalsausprägungen auf, die entweder zwischen denen der hier beschriebenen Extremsituationen liegen, oder denen einer von beiden entsprechen.

- a) Verfügt zu Ausfallbeginn alleine  $G_a$  über einen Bestand, der geringer als das arithmetische Mittel sämtlicher Gassenbestände ist und erfolgen sowohl Ein- als auch Auslagerungen, dann wird eine als Negativ ausgeprägte Störstelle der Deckschichten mit  $DS = -1$  in dem Moment erzeugt, indem die Summe der seit Ausfallbeginn erfolgten Einlageraufträge die Summe der erfolgten Auslageraufträge um 1 übersteigt. (In dem Moment, in dem sich diese Ungleichheit verringert, inkrementiert  $DS$  und die entspr. Störstelle löst sich wieder auf:  $DS = 0$ .)

Eine als Positiv ausgeprägte Störstelle der Deckschichten mit  $DS = 1$  wird in dem Moment erzeugt, in dem die Summe der erfolgten Auslageraufträge die der Einlageraufträge um  $2(m-1)+1$  übersteigt. (In dem Moment, in dem sich diese Ungleichheit verringert, dekrementiert  $DS$  und die entspr. Störstelle löst sich wieder auf:  $DS = 0$ .)

- b) Ist zu Ausfallbeginn alleine der Bestand von  $G_a$  größer als der mittlere Gassenbestand und erfolgen sowohl Ein- als auch Auslagerungen, dann wird eine als Negativ ausgeprägte Störstelle der Deckschichten mit  $DS = -1$  in dem Momenten erzeugt, indem die Summe der seit Ausfallbeginn erfolgten Einlageraufträge die Summe der erfolgten Auslageraufträge um  $2(m-1)+1$  übersteigt. (In dem Moment, in dem sich diese Ungleichheit verringert, inkrementiert  $DS$  und die entspr. Störstelle löst sich wieder auf:  $DS = 0$ .)



Eine als Positiv ausgeprägte Störstelle der Deckschichten mit  $DS = 1$

wird in dem Moment erzeugt, in dem die Summe der erfolgten Auslageraufträge die der Einlageraufträge um 1 übersteigt. (In dem Moment, in dem sich diese Ungleichheit verringert, dekrementiert DS und die entspr. Störstelle löst sich wieder auf:  $DS = 0$ .)

Kommt es während des Ausfalls eines RBG zur Entstehung einer Störstelle der Deckschichten mit  $|DS| = 1$ , dann dekrementiert/inkrementiert DS in der Folge immer, wenn folgende Bedingung erfüllt wird: Ist die Summe derjenigen Einlagerungen, die zeitlich nach der *letzten relevanten Einlagerung* erfolgten, um  $m-1$  größer/kleiner als die Summe der seit der *letzten relevanten Auslagerung* erfolgten Auslagerungen.

Wurde DS seit Beginn des Ausfalls mindestens einmal dekrementiert, dann stellt diejenige Einlagerung die sog. *letzte relevante Einlagerung* dar, welche das zuletzt erfolgte Dekrement auslöste. Andernfalls handelt es sich bei der letzten relevanten Einlagerung um diejenige, welche zuletzt vor Beginn des Ausfalls erfolgte. Wurde DS seit Beginn des Ausfalls mindestens einmal inkrementiert, stellt diejenige Auslagerung die sog. *letzte relevante Auslagerung* dar, welche das zuletzt erfolgte Inkrement auslöste. Andernfalls handelt es sich bei der letzten relevanten Auslagerung um diejenige, welche zuletzt vor Beginn des Ausfalls erfolgt.

Resultiert  $DS \neq 0$  zum Endzeitpunkt des Ausfalls, wurde während des Ausfalls eine Störstelle der Deckschichten erzeugt (siehe *Abbildung 21: mögliche Typen einer während eines RBG-Ausfalls entstehenden Deckschichten-Störstelle*).

Auslagerungen > Einlagerungen	Auslagerungen < Einlagerungen
 <b>Störstelle der Deckschichten</b> Positiv	 <b>Störstelle der Deckschichten</b> Negativ

**Abbildung 21: mögliche Typen einer während eines RBG-Ausfalls entstehenden Deckschichten-Störstelle**

Neben der oben beschriebenen Entstehung von Störstellen kann in Folge des Ausfalls eines RBG auch noch ein anderes Phänomen bzgl. des Aufbaus der Deckschichten eines Artikels beobachtet werden: Erfolgen während eines RBG-Ausfalls bzgl. eines Artikels ausschließlich Einlagerungen in die Gassen  $G_1, G_2, \dots, G_{m-1}$ , und ist die Anzahl der erfolgenden Einlagerungen kleiner, als zur Erzeugung einer als Negativ ausgeprägten Störstelle der Deckschichten nötig, dann verringern die während des RBG-Ausfalls erfolgenden Einlagerungen die Anzahl der nach dem Ende des Ausfalls vorliegenden Gassenbestände, die kleiner als das Gassenbestandsmittel sind. Kommen neben der Querverteilungsstrategie keine weiteren Einlagerstrategien zum Einsatz, dann ergibt sich hierdurch im Anschluss an die Beendigung des RBG-Ausfalls eine erhöhte Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine der nächsten Einlagerungen  $G_a$  zugewiesen wird. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, sollten zum Endzeitpunkt des RBG-Ausfalls für verhältnismäßig viele Artikelbestände DS ein- bis zweifach inkrementiert werden. (Unter Anwendung der in den Kapiteln 6.2 und 6.3 beschriebenen Methodik, wird hiermit ein Ausgleich für besagte Wahrscheinlichkeitserhöhung geschaffen.) Das Inkrementieren von DS in diesem Zusammenhang erfolgt nach Beendigung des Ausfalls und im Anschluss an die endgültige Ermittlung der während des Ausfalls entstandenen Störstellen der Deckschichten.

Die Artikel, für die DS inkrementiert werden soll, werden hierbei wie folgt ermittelt: Sämtliche Artikel werden zunächst nach der Anzahl ihrer größten Gassenbestände sortiert sowie danach, ob sie einen ihrer größten Gassenbestände in  $G_a$  aufweisen oder nicht.

Ergeben sich für jeden Artikel, der über einen einzelnen größten Gassenbestand verfügt und in  $G_a$  vorliegt, mehr als  $m-1$  Artikel, die über einen einzelnen größten Gassenbestand verfügen, welcher sich nicht in  $G_a$  befindet, dann ist wie folgt zu verfahren: Von den Artikeln mit gleich großen Gassenbeständen sind so viele auszuwählen, dass deren Anzahl zur Summe der Artikel mit individuellem größtem Gassenbestand in  $G_a$  gezählt zur Summe der Artikel mit individuellem größtem Gassenbestand nicht in  $G_a$  im Verhältnis von

1 zu  $m-1$  stehen. Für die auf diese Weise ausgewählten Artikel mit gleich großen Gassenbeständen ist DS jeweils einfach zu inkrementieren.

Falls die Menge der Artikel mit gleich großen Gassenbeständen hierfür nicht ausreicht, dann können auch Artikel verwendet werden, die über  $m-1$  größte Gassenbestände verfügen, von denen sich keiner in  $G_a$  befindet. Für diese Artikel wäre DS allerdings zweifach zu inkrementieren. Die Bestände der Gasse  $G_a$  der Artikel, für die DS in diesem Zusammenhang ein- bzw. zweifach inkrementiert wird, werden in Bezug auf die oben erstellte Eingruppierung als ein- bzw. zweifach inkrementiert angesehen, d.h. sie wechseln ihre Gruppenzugehörigkeit. Wird DS für einzelne Artikel, die über  $m-1$  größte Gassenbestände verfügen, von denen sich keiner in  $G_a$  befindet, zweifach inkrementiert, dann vergrößert sich dadurch die Anzahl der Artikel, die über einen einzelnen größten Gassenbestand verfügen, welcher sich in  $G_a$  befindet – gleichzeitig verringert sich die Gruppe der Artikel, die über  $m-1$  größte Gassenbestände verfügen, von denen sich keiner in  $G_a$  befindet.

Ergeben sich mehr als  $m-2$  Artikel, die über zwei größte Gassenbestände verfügen, von denen sich keiner in  $G_a$  befindet, für jeden Artikel, der ebenfalls über zwei größte Gassenbestände verfügt, von denen aber einer in  $G_a$  vorliegt, dann ist die Anzahl letzterer Artikel durch Inkrementieren von DS entsprechend vieler Artikel der Gruppe zu erhöhen, die über einen einzelnen größten Gassenbestand verfügt, welcher nicht in  $G_a$  vorliegt. Die Artikel, für die DS hierbei erhöht wurde, scheiden in der Folge aus der Gruppe der Artikel mit einem einzelnen größten Gassenbestand, welcher sich nicht in  $G_a$  befindet aus. Dieses Vergleichen und Inkrementieren bzw. Umgruppieren ist für sämtliche Artikelgruppen mit 1 bis  $m-1$  größten Gassenbeständen durchzuführen, bis die in *Tabelle 7: Verhältnisse zwischen Artikeln bzgl. des größten Gassenbestands* aufgeführten Verhältnisse (wiewestgehend) erreicht sind. Sämtliche Artikelbestände, für welche sich  $DS \neq 0$  als Resultat dieses Vorgehens einschließlich der vorhergehenden Analyse der Deckschichten ergibt, werden in der Folge gemäß *Tabelle 6: Umfang DS von Störstellen der Deckschichten in Folge eines RBG-Ausfalls* als Artikelbestand betrachtet, der eine Störstelle der Deckschichten aufweist.

Gassenanzahl mit Bestand gleich größtem Gassenbestand		1	2	...	m-1
Verhältnis von Anzahl Artikel mit größtem Gassenbestand ... zu Anzahl Artikel mit größtem Gassenbestand ...	... in $G_a$	1	2	...	m-1
	... <b>nicht</b> in $G_a$	m-1	m-2	...	1

**Tabelle 7: Verhältnisse zwischen Artikeln bzgl. des größten Gassenbestands**

*Tabelle 7: Verhältnisse zwischen Artikeln bzgl. des größten Gassenbestands* basiert auf *Tabelle 5: Wahrscheinlichkeiten für relative Gassenbestands-höhe* zeigt die sich langfristig im ungestörten Betrieb einstellenden Verhältnisse zwischen der Anzahl von Artikeln, die einen der größten Gassenbestände in  $G_a$  aufweisen, und der Anzahl von Artikeln, die in  $G_a$  keinen der größten Gassenbestände aufweisen – in Abhängigkeit der jeweils vorliegenden Anzahl größter Gassenbestände unter den Gassenbeständen eines Artikels.

Finden während des Ausfalls eines RBG Einlagerungen statt, so beeinflussen diese nicht nur die mögliche Entstehung einer Störstelle der Deckschichten: Wenn die Gesamtzahl sämtlicher während des RBG-Ausfalls durchgeführten Einlagerungen größer oder gleich  $m$  ist, dann resultiert nach dem Ausfallende eine *während eines RBG-Ausfalls angelegte Störstelle*. Ist die Gesamtzahl der Einlagerungen gleich  $m$ , beträgt der Umfang der Störstelle  $AS - 1$  (siehe *Tabelle 8: Umfang AS von angelegten Störstellen in Folge eines RBG-Ausfalls*). Für je  $m-1$  Einlagerungen, für die die Gesamtzahl der Einlagerungen  $m$  übersteigt, dekrementiert  $AS$ .

AS	Umfang einer angelegten Störstelle in Folge eines RBG-Ausfalls
$AS < 0$	Ausprägung als Negativ
$AS = 0$	keine Störstelle
$AS > 0$	Ausprägung als Positiv

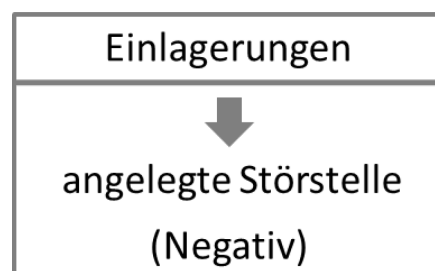
**Tabelle 8: Umfang AS von angelegten Störstellen in Folge eines RBG-Ausfalls**

Die Störstelle ist ‚angelegt‘, weil sie zum Entstehungszeitpunkt i.d.R. nicht in den untersten Basisschichten auftritt. Erst im Zuge des sich im Anschluss an die Beendigung des RBG-Ausfalls vollziehenden Artikelumschlags, wenn sämtliche LE, die vor dem RBG-Ausfall eingelagert worden waren, ausgelagert sind, finden sich während des RBG-Ausfalls eingelagerte LE in der untersten Basisschicht wieder. Entstand während des Ausfalls eines RBG eine angelegte Störstelle mit  $AS < 0$  und wurden nach dem Ende des Ausfalls sämtliche LE, die noch vor dem RBG-Ausfall eingelagert worden waren, ausgelagert, dann ergibt sich eine als Negativ ausgeprägte Störstelle der Basisschichten des Umfangs  $BS = AS$  (siehe *Tabelle 9: Umfang BS von Störstellen der Basisschichten in Folge eines RBG-Ausfalls*).

BS	Umfang einer Störstelle der Basisschichten in Folge eines RBG-Ausfalls
$BS < 0$	Ausprägung der Störstelle als Negativ
$BS = 0$	keine Störstelle
$BS > 0$	Ausprägung der Störstelle als Positiv

**Tabelle 9: Umfang BS von Störstellen der Basisschichten in Folge eines RBG-Ausfalls**

Von einer als Negativ ausgeprägten Störstelle der Basisschichten soll im Folgenden dann gesprochen werden, wenn mindestens die nächsten nach dem FIFO-Prinzip umzusetzenden  $m$  Auslagerungen keine LE aus der Gasse des zuvor ausgefallenen RBG einschließen (siehe *Abbildung 22: während eines RBG-Ausfalls angelegte Störstelle*).



**Abbildung 22: während eines RBG-Ausfalls angelegte Störstelle**

Abbildung 23: Entstehung von Störstellen während eines RBG-Ausfalls – Übersicht fasst die oben angestellten Betrachtungen schematisch zusammen.

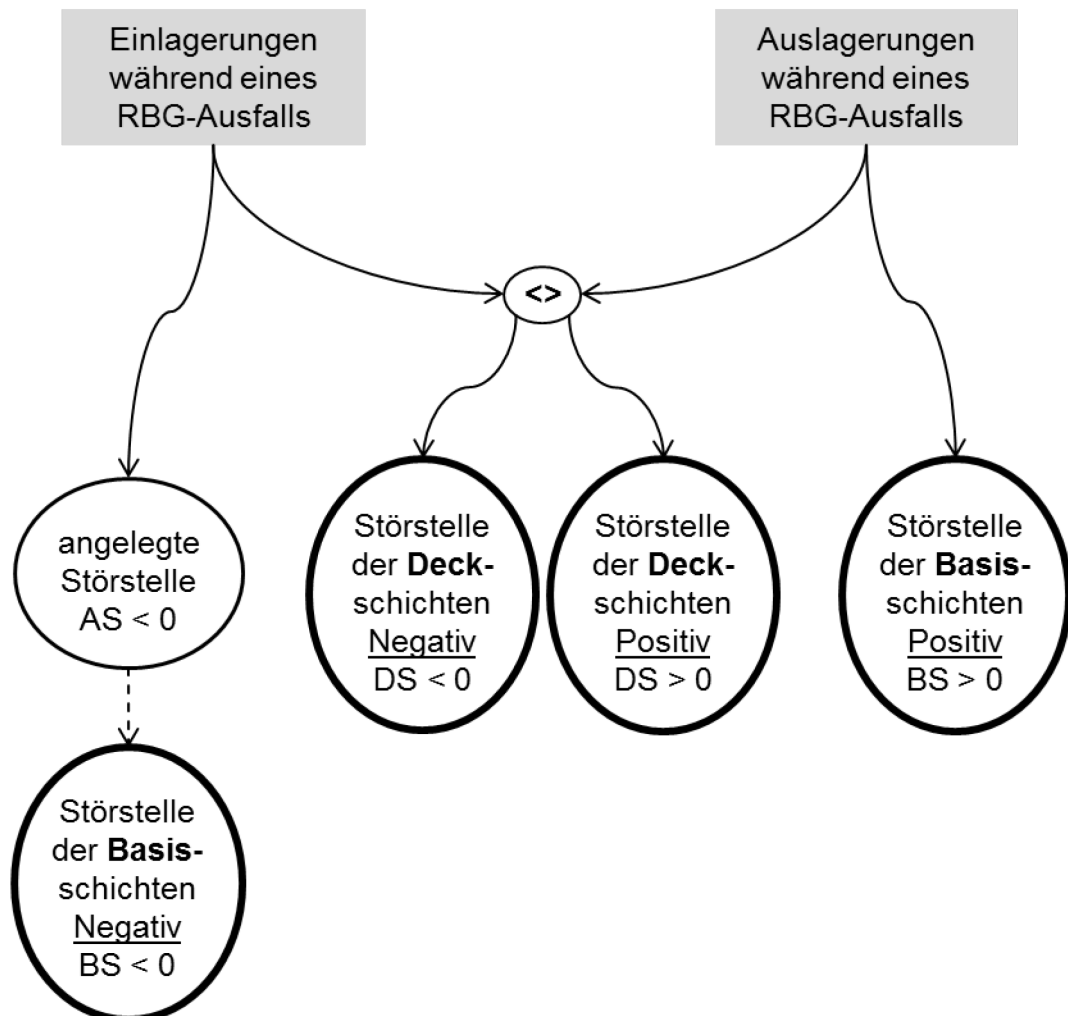


Abbildung 23: Entstehung von Störstellen während eines RBG-Ausfalls – Übersicht

## 5.2. Auswirkungen von Störstellen nach Behebung eines RBG-Ausfalls

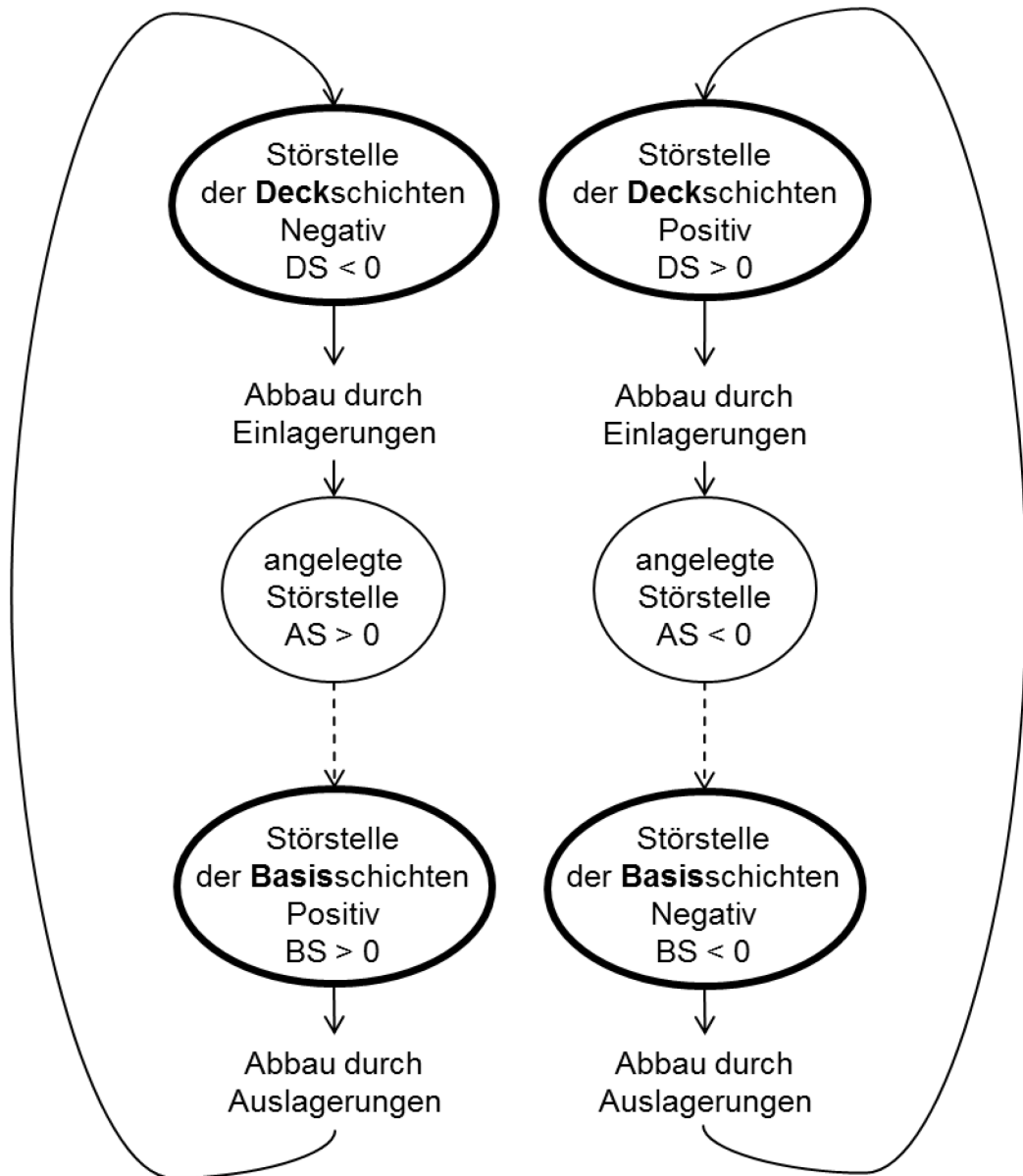
Für die folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass in den jeweils betrachteten Artikelbeständen keine anderen als die ausdrücklich erwähnten Störstellen vorliegen oder angelegt sind.

Liegt eine als Positiv ausgeprägte Störstelle der Basisschichten mit dem Umfang BS vor wenn BS Auslagerungen erfolgen, welche nicht von Einlagerungen unterbrochen werden, dann verringert sich mit jeder erfolgenden Auslagerung der Umfang der Störstelle – sie wird sozusagen abgebaut. Der Abbau dieser Störstelle verringert den Bestand von  $G_a$  um BS. War vor dem Abbau der Störstelle der Gassenbestand von  $G_a$  kleiner als das Gassenbestandsmittel, ergibt sich eine als Negativ ausgeprägte Störstelle der Deckschichten mit  $DS = -BS$ . War der entsprechende Gassenbestand gleich dem Gassenbestandsmittel, ergibt sich  $DS = -BS + 1$ . War er hingegen größer, dann ist  $DS = -BS + 2$ .

Kommt es zum Abbau einer vorliegenden, als *Negativ ausgeprägten Störstelle der Basisschichten* mit dem Umfang BS durch  $m + (m-1) \cdot (|BS| - 1)$  erfolgende Auslagerungen, dann verringern sich die Bestände der Gassen  $G_1, G_2, \dots, G_{m-1}$  folgendermaßen:  $m-2$  Gassenbestände verringern sich um  $|BS|$ , einer um  $|BS| + 1$ . War vor dem Abbau der Störstelle der Bestand der Gasse  $G_a$  als einziger größer als das Gassenbestandsmittel oder war er als einer von mehreren größer und  $|BS| + 1$  LE wurden während des Abbaus einem Gassenbestand entnommen, der vor dem Abbau kleiner als das Gassenbestandsmittel war, dann resultiert eine als Positiv ausgeprägte Störstelle mit dem Umfang  $DS = -BS - 1$ . War der Bestand der Gasse  $G_a$  als einer von mehreren größer als das Gassenbestandsmittel und  $BS + 1$  LE wurden nicht einem dieser Gassenbestände entnommen, dann ergibt sich  $DS = -BS$ . Waren alle Gassenbestände gleich groß, dann ergibt sich  $DS = -BS + 1$ . War der Bestand der Gasse  $G_a$  kleiner als das Gassenbestandsmittel und  $BS + 1$  LE wurden von einem Bestand entnommen, der größer als das Gassenbestandsmittel war, dann resultiert  $DS = -BS + 1$ . War der Bestand der Gasse  $G_a$  klei-



ner als das Gassenbestandsmittel wie auch der Bestand der Gasse aus der  $BS + 1$  LE entnommen wurden, dann ergibt sich ebenfalls  $DS = -BS + 1$ .



**Abbildung 24: Störstellenabbau erzeugt neue Störstellen – Übersicht**

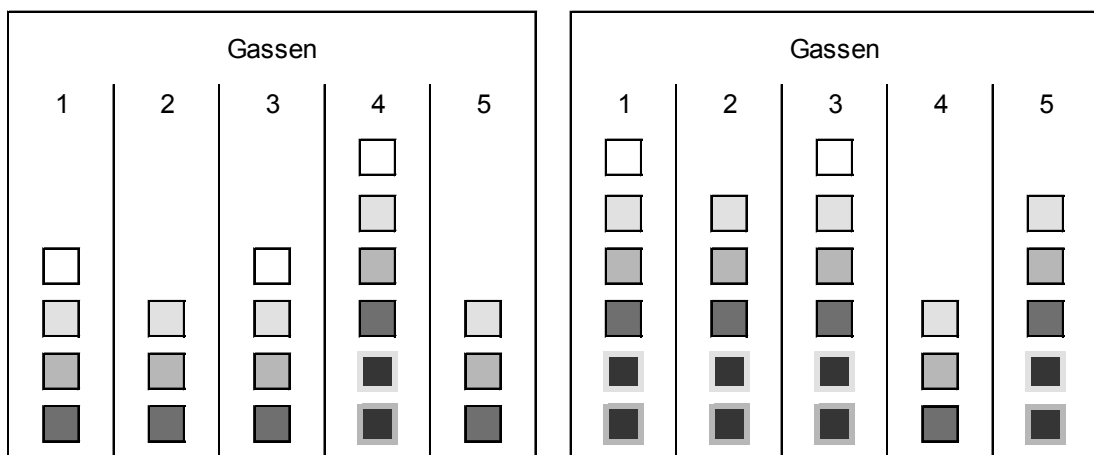
Liegt eine als Positiv ausgeprägte Störstelle der Deckschichten mit dem Umfang  $DS$  vor und erfolgen  $m + (m-1) * (DS-1)$  Einlagerungen (d.h. es erfolgt eine Einlagerung mehr als für den Abbau der vorliegenden Störstelle nötig) ohne von Auslagerungen unterbrochen zu werden, dann vergrößern sich die Bestände der Gassen  $G_1, G_2, \dots, G_{m-1}$ :  $m-2$  Gassenbestände vergrößern sich um  $DS$ , einer um  $DS + 1$ . Hierdurch wird eine Störstelle mit  $AS = -DS$  angelegt, welche im Zuge des Artikelumschlags zu einer dann vor-

liegenden, als Negativ ausgeprägten Störstelle der Basisschichten mit dem Umfang  $BS = AS$  wird.

Liegt eine als Negativ ausgeprägte Störstelle der Deckschichten mit dem Umfang  $DS$  vor und erfolgen  $|DS|$  Einlagerungen ohne von Auslagerungen unterbrochen zu werden, dann vergrößert sich der Bestand der Gasse  $G_a$  um  $|DS|$ , wodurch eine Störstelle mit  $AS = -DS$  angelegt wird, welche im Zuge des Artikelumschlags zu einer dann vorliegenden, als Positiv ausgeprägten Störstelle der Basisschichten mit dem Umfang  $BS = AS$  wird. Abbildung 24: Störstellenabbau erzeugt neue Störstellen – Übersicht zeigt die oben angestellten Betrachtungen in einer schematischen Zusammenfassung.

Wenn es nach der Behebung eines RBG-Ausfalls zum Abbau einer während des Ausfalls entstandenen Störstelle bei uneingeschränkter Anwendung von Querverteilung und FIFO kommt, dann werden die abbauenden Lageraufträge im Fall einer als Negativ ausgeprägten Störstelle der Deckschichten und im Fall einer als Positiv ausgeprägten Störstelle der Basisschichten zur Ausführung dem RBG zugewiesen, welches zuvor ausgefallen war. Die Lageraufträge, die eine als Positiv ausgeprägte Störstelle der Deckschichten und diejenigen, die eine als Negativ ausgeprägte Störstelle der Basisschichten abbauen, werden unter Anwendung von Querverteilung und FIFO den RBG der Gassen  $G_1, G_2, \dots, G_{m-1}$  zugewiesen.

Liegen bzgl. eines Artikelbestandes gleichzeitig sowohl eine als Positiv ausgeprägte Störstelle der Basisschichten als auch eine als Positiv ausgeprägte Störstelle der Deckschichten mit  $BS = DS$  vor oder liegen gleichzeitig sowohl eine als Negativ ausgeprägte Störstelle der Basisschichten als auch eine als Negativ ausgeprägte Störstelle der Deckschichten mit  $BS = DS$  vor, dann löst der Abbau der jeweiligen Störstelle die jeweils vorliegende Störstelle der Deckschichten auf (siehe *Abbildung 25: Beispiele für Kombinationen vorliegender Störstellen mit  $DS = BS$* ). Sind die Umfänge der auftretenden Störstellen nicht gleich groß, resultiert eine Störstelle mit dem Umfang gleich der Summe aus  $BS$  und  $DS$ .



**Abbildung 25: Beispiele für Kombinationen vorliegender Störstellen mit  $DS = BS$**

Wenn eine Störstelle als vollständig abgebaut gilt, ist allerdings nicht ausgeschlossen, dass ein weiterer Lagerauftrag des entsprechenden zuvor Störstellen-abbauenden Typs derselben Gasse zugewiesen wird, wie die zuvor Störstellen-abbauenden Lageraufträge.

Deckschichten und somit auch vorliegende Störstellen der Deckschichten verändern sich, wenn artikelspezifische Auslagerungen erfolgen: Auslagerungen aus der Gasse mit dem niedrigsten Bestand vergrößern  $|DS|$ , während Auslagerungen aus der Gasse mit dem größten Bestand  $|DS|$  verringern.

Wird der Abbau einer als Positiv ausgeprägten, vorliegenden Störstelle der Basisschichten durch Auslagerungen (frühestens nach der ersten erfolgten Auslagerung) von Einlagerungen unterbrochen, und ist zu Abbaubeginn der

Bestand der Gasse  $G_a$  der kleinste aller Gassenbestände, dann erfolgt frühestens die letzte querverteilt zugewiesene Einlagerung, mit der die Summe der seit Beginn des Abbaus umgesetzten Einlagerungen die der Auslagerungen um 2 LE überschreitet, nicht in  $G_a$ . Überschreitet die Summe der Einlagerungen die der Auslagerungen um 3 LE, muss eine der beiden letzten umgesetzten Einlagerungen in  $G_a$  erfolgt sein.

Ist der Bestand der Gasse  $G_a$  einer von mehreren, die kleiner gleich dem mittleren Gassenbestand sind, dann erfolgt frühestens die letzte Einlagerung, mit der die Summe der seit Beginn des Abbaus ausgeführten Einlagerungen die Summe der ausgeführten Auslagerungen um 1 überschreitet, in  $G_a$ . Wenn die Summe der Einlagerungen die der Auslagerungen um 2 überschreitet, wurde eine der beiden zuletzt ausgeführten Einlagerungen nicht in  $G_a$  umgesetzt.

Ist der Bestand der Gasse  $G_a$  größer als der mittlere Gassenbestand, dann erfolgt frühestens die Einlagerung, mit der die Summe der seit Beginn des Abbaus umgesetzten Einlagerungen die Summe der Auslagerungen erreicht, nicht in  $G_a$ . Wenn die Summe der Einlagerungen die der Auslagerungen um 1 überschreitet, wurde eine der beiden zuletzt ausgeführten Einlagerungen nicht in  $G_a$  umgesetzt. Erfolgt eine Einlagerung nicht in  $G_a$ , wird mit dieser Einlagerung das entspr. Anlegen einer Störstelle mit  $AS < 0$  abgebrochen.

Wird der Abbau einer als Negativ ausgeprägten, vorliegenden Störstelle der Basisschichten durch Auslagerungen (frühestens nach der ersten erfolgten Auslagerung) von Einlagerungen unterbrochen, erfolgt die nächste Einlagerung frühestens dann in die Gasse  $G_a$ , wenn diese Gasse als einzige zum Abbaubeginn über den kleinsten aller Gassenbestände verfügt und der Unterschied zwischen der um  $m-1$  verringerten Summe erfolgter Auslagerungen gleich der Summe der Einlagerungen ist. Ist die Summe der erfolgten Auslagerungen gleich der Summe der erfolgten Einlagerungen und findet eine Einlagerung statt, muss spätestens diese in die Gasse  $G_a$  erfolgen.

Ist der Bestand der Gasse  $G_a$  einer von mehreren, die kleiner als das Gassenbestandsmittel sind, dann kann ebenfalls schon die erste Einlagerung, nach dem die Summe aller Einlagerungen die um  $m-1$  verringerte Summe

der Auslagerungen entspricht, in  $G_a$  eingelagert werden. Spätestens wenn zusätzlich zur um  $m-1$  verringerten Summe der erfolgten Auslagerungen so viele Einlagerungen stattfanden, wie es Gassenbestände gab, die kleiner als das Gassenbestandsmittel waren, wurde eine LE in  $G_a$  eingelagert.

Ist der Bestand der Gasse  $G_a$  einer von mehreren, die größer als das Gassenbestandsmittel sind, dann kann frühestens diejenige Einlagerung  $G_a$  zugewiesen werden, die erfolgt, nachdem die Summe der Einlagerungen, die der um die Anzahl der Gassen mit Beständen kleiner als das Gassenbestandsmittel verringerten Auslagerungen entspricht. Erfolgte eine Einlagerung, mit der die Summe der Einlagerungen, die der um die Anzahl der Gassen mit Beständen kleiner als das Gassenbestandsmittel verringerten Auslagerungen um  $m$  übersteigt, dann muss eine der letzten  $m$  Einlagerungen in  $G_a$  umgesetzt worden sein.

Ist der Bestand von  $G_a$  als einziger größer als alle anderen, dann kann frühestens diejenige Einlagerung  $G_a$  zugewiesen werden, die erfolgt, nachdem zuvor die Summe der Einlagerungen die Summe der Auslagerungen um  $m-1$  überstieg. Übersteigt die Summe der Einlagerungen die Summe der Auslagerungen um  $2(m-1)$ , und erfolgt anschließend eine Einlagerung, muss spätestens diese  $G_a$  zugewiesen werden.

Erfolgt eine Einlagerung in die Gasse des zuvor ausgefallenen RBG, wird mit dieser Einlagerung das entspr. Anlegen einer Störstelle mit  $AS > 0$  abgebrochen.

Wird beim Abbau einer vorliegenden Störstelle die Erzeugung oder das Anlegen einer neuen Störstelle abgebrochen, während die vorliegende noch nicht vollständig abgebaut ist, dann erzeugt die Fortsetzung des Abbaus der vorliegenden ggf. eine weitere neue, deren Anlegen ebenfalls abgebrochen werden kann (usw.).

Daneben kann der Abbau einer Störstelle der Basisschichten auch so erfolgen, dass sich keine Störstelle der Deckschichten ausprägt, aber trotzdem eine entspr. Störstelle angelegt wird. Dies geschieht dann, wenn die in den einzelnen Gassen umzusetzenden Lageraufträge – z.B. aufgrund der sich ergebenden Summenunterschiede der Ein- und Auslagerungen – die

Ausprägung einer entspr. Störstelle der Deckschichten verursachen, und dabei aber das Anlegen der neuen Störstelle nicht abgebrochen wird.

Wird insbesondere der Abbau einer vorliegenden, Positiv ausgeprägten Störstelle der Basisschichten durch Einlagerungen unterbrochen, so dass das Anlegen einer Störstelle mit  $AS > 0$  abgebrochen wird, können sich hierdurch Strukturen im Bestandsaufbau des betrachteten Artikels ergeben, die mit dem oben geprägten Begriff der Störstelle nicht zureichend beschrieben werden können. Aus Sicht des Autors lässt sich aufgrund der Vielfalt möglicher Strukturvarianten nicht absehen, inwiefern dem mit deren präzisen Beschreibung einhergehende Aufwand einem im Sinne der Lagersteuerung umsetzbaren Nutzen entsprechen könnte, weshalb auf weitere Ausführungen zu den fraglichen Vorgangsmöglichkeiten verzichtet wird.

### **5.3. Störstellen-Entstehung im ungestörten Betrieb am Beispiel $BS > 0$**

Eine angelegte Störstelle mit  $AS > 0$ , also eine Störstelle, die bei Erreichen der untersten Basisschicht, eine als Positiv ausgeprägte Störstelle der Basisschichten mit  $BS > 0$  ergibt, lässt sich im Bestand eines Artikels nicht nur in Folge eines RBG-Ausfalls beobachten: sie kann ebenso im Bestand eines Artikels bei ungestörtem Betrieb unter Querverteilung und FIFO auftreten.

Hierbei stellt sich die Frage, wie häufig bzw. wahrscheinlich das Auftreten von Störstellen unabhängig vom Ausfall eines RBG im ungestörten Betrieb ist. Die präzise Beantwortung dieser Frage setzt für jeden Einzelfall die genaue Kenntnis folgender Rahmenbedingungen voraus:

- Welche Struktur des betrachteten Artikelbestands liegt zu Betrachtungsbeginn vor?
  - Wie groß sind die jeweiligen Gassenbestände?
  - In welcher Folge wurden die einzelnen LE des Artikels eingelagert bzw. welche Zugriffsreihenfolge ergibt sich aus der sukzessiven Ausführung von Auslageraufträgen nach dem FIFO-Prinzip bzgl. der einzelnen Gassen?
- Welche Lageraufträge werden im Betrachtungsverlauf umgesetzt?

- Welche Reihenfolge aus artikelspezifischen Ein- und Auslageraufträgen stellt sich ein?
- Welche der zur Auswahl stehenden Gassen wird jeweils ausgewählt, wenn im Zuge der Umsetzung eines Einlagerauftrags zum Zeitpunkt der Lagerplatzbestimmung mehrere Gassen den minimalen Bestand aufweisen und damit lt. Querverteilung mehrere Zuweisungsoptionen bestehen?

Im Lagerbetrieb lässt sich gemeinhin mit Hilfe des zur Lagersteuerung eingesetzten Softwaresystems die aktuell vorliegende Verteilungsstruktur eines Artikels bestimmen. Die zu vergangenen Zeitpunkten bestehenden Einheitenverteilungen lassen sich ggf. mit Hilfe von digital-gespeicherten Lagerständen rekonstruieren. Ebenso ist es möglich, in der Vergangenheit erfolgte Lagerbewegungen ex post zu ermitteln. Zukünftig erfolgende Auslagerungen sowie gassenspezifische Einlagerungen in ihrer Eintrittsreihenfolge vorherzusehen, ist demgegenüber i.d.R. nicht möglich.

Angesichts dessen lassen sich allenfalls verallgemeinerbare Anhaltspunkte zur Abschätzung des zukünftigen Auftretens von Störstellen im ungestörten Lagerbetrieb ermitteln. Zu diesem Zweck wurden drei in Plant Simulation implementierte Simulationsmodelle entwickelt, von denen jedes die Gasenbestände eines einzelnen Artikels in einem aHRL abbildet. Modell a) bezieht sich hierbei auf ein aHRL mit 3 Gassen, Modell b) auf eines mit 5 Gassen und Modell c) auf ein 10-gassiges. Für jedes Modell wird eine Folge von 100 Millionen Lageraufträgen erzeugt, wobei im Moment der Erzeugung eines einzelnen Auftrags unabhängig von jeweils zuvor erzeugten Aufträgen eine Wahrscheinlichkeit von 50% besteht, dass es sich bei dem neuen Auftrag um einen Ein- oder um einen Auslagerauftrag handelt. Die so ermittelte Auftragsfolge wird nacheinander umgesetzt.

Zur Umsetzung von Auslageraufträgen sollen gemäß FIFO Einheiten des Artikels entsprechend ihrer Einlagerreihenfolge entnommen werden. Nahelegend ist es, hierfür die sich im Simulationslauf in Folge von Einlageraufträgen ergebende Einlagerreihenfolge zu verwenden und den Anfangsbestand zum Simulationsstart gleich null zu wählen. Ein solches Vorgehen

wirft allerdings Probleme auf: Immer dann, wenn im Simulationsverlauf der Gesamtbestand gleich null ist und Auslageraufträge umgesetzt werden müssten, können diese nicht ausgeführt werden. Für einzelne Simulationsläufe wäre es in der Folge nicht möglich, von einheitlichen Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Ein- und Auslageraufträgen auszugehen – geschweige denn, für das entsprechende Simulationsexperiment die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten als tatsächlich diskret gleichverteilt zu beschreiben. Das Ansetzen eines Startbestandes größer null würde – je nachdem, wie viele Lageraufträge simuliert werden – die Auftretenshäufigkeit entsprechender Null-Bestände im Simulationsablauf verringern. Zieht man diese Möglichkeit näher in Betracht, stellt sich zum einen die Frage nach der konkreten Verteilungsstruktur des Startbestandes und zum anderen nach dessen zu wählender Höhe. Die Bestandshöhe beeinflusst hierbei auch, wie viele Auslageraufträge nötig sind, damit eine in den Deckschichten angelegte Störstelle als Basisschichten-Störstelle auftritt. Würde man bei der Ermittlung der Auftretenshäufigkeit von Störstellen sowohl die ursprüngliche Deckschichten-Störstelle als auch die durch entsprechendes Anlegen in Folge mehrerer Auslageraufträge auftretende Störstelle der Basisschichten zählen, dann hätte die jeweils gewählte Gesamtbestandshöhe starken Einfluss auf das ermittelte Ergebnis.

Angesichts dieser Zusammenhänge wird für die vorliegenden Modelle davon ausgegangen, dass der Bestand des betrachteten Artikels zu keinem Zeitpunkt auf null fällt. Seine Verteilungsstruktur soll in den beiden untersten Basisschichten stets so beschaffen sein, als wäre sie ein mögliches Ergebnis einer Folge von querverteilten Einlagerungen, welche zu keinem Zeitpunkt von Auslagerungen unterbrochen wurden. D.h. die unterste Basisschicht ist so beschaffen, dass für je  $m$  nacheinander umzusetzende Auslageraufträge je eine Auslagerung aus jeder der  $m$  Gassen erfolgt. Allerdings kann es hierbei dazu kommen, dass die jeweils  $m$ -te Auslagerung und die ihr nachfolgende  $(m+1)$ -te Auslagerung an dieselbe Gasse zugewiesen werden.



Zur Umsetzung eines Einlagerauftrags wird im Verlauf einer Simulation stets gemäß der Querverteilungsstrategie die Gasse mit dem minimalen Bestand identifiziert. Verfügen mehrere Gassen über den minimalen Bestand, wird unter diesen eine (gleichverteilt-)zufällig ausgewählt. Der Einlagerauftrag wird umgesetzt, indem die Unterschiede in den Bestandsmengen, die zwischen der bestimmten Gasse und den übrigen bestehen, einer Einlagerung entsprechend abgeändert werden. Abgebildet werden diese Bestandsmengenunterschiede der einzelnen Gassen in Form einer Ziffernfolge. Jede einzelne Ziffer dieser Ziffernfolge beschreibt hierbei den Bestand einer Gasse und gibt die Mengendifferenz zwischen ihrem Bestand und dem kleinsten auftretenden – mit „0“ bezeichneten – Gassenbestand wieder. Ein Beispiel einer solchen Ziffernfolge zeigt *Abbildung 26: Notation von Gassenbestandsunterschieden*. Im abgebildeten Fall sollen die Gassen 3 und 5 jeweils über den minimalen Artikelbestand verfügen. Die Gassen 1 und 4 weisen jeweils einen Bestand auf, der eine LE mehr als der minimale Gassenbestand umfasst. Die Gassen 2 umfasst zwei Einheiten mehr als der minimale Gassenbestand. Die entsprechende Ziffernfolge „12010“ drückt diese Bestandsunterschiede in der Reihenfolge der Gassen aus, wobei die Ziffer „0“ für einen Bestandsumfang steht, der dem minimal auftretenden Gassenbestand entspricht.



**Abbildung 26: Notation von Gassenbestandsunterschieden**

Würde in der in diesem Beispiel beschriebenen Verteilungssituation eine Einlagerung erfolgen, würde diese entweder Gasse 3 oder 5 zugewiesen werden. Käme es zur Einlagerung in Gasse 3, ergäben sich neue Gassenbestandsunterschiede der Form „12110“. Eine weitere folgende Einlagerung würde zwangsläufig der Gasse 5 zugewiesen werden. Die Umsetzung der Einlagerung würde dazu führen, dass sich ein neuer minimaler Gassenbestand ergäbe, wodurch die sich ergebenden Bestandsunterschiede mit der Ziffernfolge „01000“ zu beschreiben wären.

Die Umsetzung von Auslageraufträgen wirkt sich in den beschriebenen Modellen in zweierlei Weise aus: Zum einen verändert jede Auslagerung die für die jeweils nachfolgenden Auslagerungen geltende Zugriffsreihenfolge der Lagergassen entsprechend FIFO in der Art, dass die Gasse des übernächsten Zugriffs zur Gasse des nächsten Zugriffs wird, usw. Zum anderen verringert jede einzelne Auslagerung den Gesamtbestand der jeweiligen Gasse, wodurch sich die Gassenbestandsunterschiede verändern (und sich ggf. ein neuer minimaler Gassenbestand einstellt), was eine entsprechende Anpassung der Bestandsunterschiede-beschreibenden Ziffernfolge erfordert und damit die Entscheidungsgrundlage für die Identifikation der Zielgassen zukünftiger Einlagerungen.

Für jedes Modell wird ein Simulationslauf durchgeführt, während dem die in den obersten Deckschichten angelegten, als Positiv ausgeprägten Störstellen gezählt werden – d.h. immer dann, wenn zwei oder mehr aufeinanderfolgende Einlagerungen, welche von Auslagerungen unterbrochen werden können, durch Zugriffe auf ein und dieselbe Gasse umgesetzt werden, inkrementiert der entsprechende Zähler. Auf diese Weise werden Störstellen mit 2-, 3- und 4-Schichten Umfang ermittelt.

In *Tabelle 10: ungestörtes Anlegen von Störstellen – Simulationsergebnisse* sind die sich pro Simulationslauf ergebenden Zählerstände in Beziehung zu den jeweils 100 Millionen ( $10^8$ ) Lageraufträgen gesetzt. „ $\Sigma_{AS\ 2S}$ “ bezieht sich hierbei auf den Stand des Zählers für angelegte Störstellen mit 2 Schichten Umfang, „ $\Sigma_{AS\ 3S}$ “ auf diejenigen mit 3 Schichten und „ $\Sigma_{AS\ 4S}$ “ auf jene mit 4 Schichten.

Im Vergleich zwischen den drei Modellen zeigen die ermittelten Ergebnisse deutlich, dass sich die Auftrittshäufigkeiten von angelegten Störstellen mit der Anzahl der Gassen stark reduziert.

Modell	Gassenzahl	$\Sigma_{AS\ 2S} * 10^{-8}$	$\Sigma_{AS\ 3S} * 10^{-8}$	$\Sigma_{AS\ 4S} * 10^{-8}$
a)	3	0,08531108	0,00765280	$0,18725 * 10^{-3}$
b)	5	0,04268285	0,00121252	$0,00522 * 10^{-3}$
c)	10	0,01649331	0,00010911	$0,00006 * 10^{-3}$

**Tabelle 10: ungestörtes Anlegen von Störstellen – Simulationsergebnisse**

Für einen Vergleich der Ergebniswerte eines einzelnen Modells ist zu berücksichtigen, dass das Auftreten von zuvor in den Deckschichten angelegten Störstellen mit Umfängen von drei oder vier Schichten in den Basisschichten grundsätzlich nicht abgebildet ist. Kommt es im Lagerbetrieb zum Anlegen einer entsprechenden Störstelle in den Deckschichten eines Artikels, dann tritt diese in den Basisschichten in etwa dann auf, wenn der Artikel (nahezu) vollständig umgeschlagen ist. Kommt es auf diese Weise zum Auftreten einer Störstelle in den Basisschichten, dann erzeugt ihr Abbau durch erfolgende Auslagerungen ggf. eine entsprechende Störstelle der Deckschichten.

Die ermittelten Auftrittshäufigkeiten in den Fällen von angelegten Störstellen mit drei- oder vierschichtigem Umfang sind also im Einzelfall mit einem Faktor zu korrigieren, der u.a. die Häufigkeit, mit der der entsprechende Artikel vollständig umgeschlagen wird, berücksichtigt und in Beziehung zu der im jeweils angesetzten Betrachtungszeitraum gezählten

oder erwarteten Gesamtzahl von artikelspezifischen Lageraufträgen setzt. Für Störstellen mit zwei Schichten Umfang sind bereits einige Fälle angelegter Störstellen, welche sich in der untersten Basisschicht auswirken, in den ermittelten Werten berücksichtigt, nämlich diejenigen, die sich in der für die Modellierung gewählten Zusammensetzung der Basisschichten wiederfinden.

## **6. Minimierung des betrieblichen Risikos eines RBG-Ausfalls**

### **6.1. Relevante betriebliche Ziele der Lagersteuerung**

Das Risiko, welches im Zusammenhang mit einem möglicherweise eintretenden Ereignis besteht, ist gleich dem Produkt aus der Wahrscheinlichkeit des Ereigniseintritts und dem Schaden, der durch den Eintritt dieses Ereignisses entsteht. Für den vorliegenden Kontext handelt es sich hierbei um die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines RBG-Ausfalls und die durch den RBG-Ausfall verursachte Reduktion der Erreichungsgrade der entsprechenden relevanten betrieblichen Ziele. Dementsprechend gilt es zunächst, die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines RBG-Ausfalls zu vermindern. Hierzu zählt, möglichen zukünftigen Ausfällen vorzubeugen (präventive Instandhaltung, siehe Kapitel 2.2) und Vorkehrungen zur Minimierung der zu erwartenden Wiederherstellungszeit nach erfolgtem Ausfall zu treffen (korrektive Instandhaltung, siehe Kapitel 2.2).

Hinsichtlich der hierbei in Frage kommenden betrieblichen Ziele des Lagerbetriebs ist grundsätzlich davon auszugehen, dass jedes aHRL – wie auch jedes andere industrielle Lager – in seinem spezifischen Kontext dazu dient, gewisse logistische und betriebswirtschaftliche Funktionen zu erfüllen. Von diesen Funktionen leiten sich konkrete Ziele ab, für deren Realisierung die Lagersteuerung entsprechend auszulegen ist. Die Auslegung der Lagersteuerung umfasst dabei v.a. die Auswahl, die Anpassung und die entsprechende Kombination von geeigneten Betriebsstrategien. Die oben beschriebenen Modelle implizieren folgende wesentliche betriebliche Ziele der Lagersteuerung:

- realisierter Durchsatz (mindestens) gleich gefordertem Durchsatz (siehe Kapitel 3.2);
- vollständige Erfüllung der Artikelnachfrage des/der (ggf. unternehmensinternen) Kunden auch bei Ausfall eines RBG, und

- möglichst einheitliche LE-Verweildauern/Sicherstellung der Anwendbarkeit gewisser Methoden der Rechnungslegung (siehe FIFO, Kapitel 3.3).

Diese Ziele lassen sich nicht immer vollständig bzw. nur in gewissem Grade erreichen: So kann der geforderte Durchsatz zwar den maximal realisierbaren Grenzdurchsatz  $\gamma$  ohne weiteres vorübergehend übersteigen, der realisierte betriebliche Durchsatz  $\lambda$  kann das aber nicht.

Für die zu erwartende Wiederherstellungszeit ist die Entwicklung der Kundennachfrage in der Regel nur unsicher vorherzusehen. Aber die Erfüllbarkeit der Nachfrage während des Ausfalls eines RBG hängt nicht nur davon ab, wie lange das RBG ausfällt oder ob die Gassenbestände eines Artikels beim Ausfall eines RBG möglichst gleich groß sind (Querverteilung und maximale Artikelverfügbarkeit, Kapitel 3.3), sondern wird auch von der Höhe des Gesamtbestandes des Artikels beeinflusst: Sind die Gassenbestände jeweils gleich groß, und die Dauer des RBG-Ausfalls konstant, lassen sich bei einem hohen Momentanbestand mehr LE durch die funktionstüchtigen RBG auslagern, als bei einem niedrigen Bestandsniveau.

Der Bedeutung der Höhe des Gesamtbestands wird in folgendem Konzept Rechnung getragen: Gudehus (Gudehus, Dynamische Disposition, 2006, S. 87) beschreibt in Zusammenhang mit der Planung von Lieferfähigkeit die sog. Unterbrechungsreserve in Abgrenzung zum Sicherheitsbestand als Bestand, der etwa im Fall eines Anlagenausfalls zum Einsatz kommen soll und der sich aus dem erwarteten artikelspezifischen Periodenverbrauch und der maximal zu erwartenden Unterbrechungszeit berechnet. (Dabei bezieht sich Gudehus auf Ausführungen von Kern von 1979, welche dem Autor in der Form (Kern, 1984, S. 1222f) vorliegen.)

Hierbei darf allerdings bezweifelt werden, dass vor dem Hintergrund aktueller betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen die Vorteile einer derartigen permanenten Bestandserhöhung ihre Nachteile überwiegen. (Dem Autor liegen keinerlei Hinweise vor, dass das Konzept der Unterbrechungsreserve in der industriellen Praxis jemals angewandt wurde, geschweige denn aktuell (noch) angewandt wird.)

Fällt ein RBG aus, dann reduzieren sich i.d.R. die Erreichungsgrade der oben genannten betrieblichen Ziele der Lagersteuerung: der realisierbare Durchsatz sinkt unter den maximal realisierbaren Grenzdurchsatz. Übersteigt der Unterschied zwischen der Anzahl erfolgreicher Auslagerungen und der der Einlagerungen eines Artikels während des Ausfalls ein gewisses Mindestmaß, ergeben sich entsprechende Unterschiede in den Gassenbeständen, wodurch sich eine reduzierte Artikelverfügbarkeit ergibt, wenn es erneut zu einem RBG-Ausfall kommen sollte. Während des RBG-Ausfalls kann aus der Gasse des ausgefallenen RBG nicht ausgelagert werden, weshalb, wenn Auslagerungen während des RBG-Ausfalls erfolgen, die FIFO-Reihenfolge nicht aufrechterhalten werden kann.

Wird die während eines RBG-Ausfalls nicht bedienbare Gasse nach Wiederinbetriebnahme des RBG wieder für die Durchführung von Ein- und Auslagerungen zugänglich, dann entfällt zwar die wesentliche, vorübergehend wirksame Restriktion zur Erreichung der oben genannten betrieblichen Ziele, die während des RBG-Ausfalls entstandenen Störstellen in den betroffenen Bestandsstrukturen verhindern allerdings die sofortige Realisierung der ursprünglichen Erreichungsgrade v.a. die der beiden Ziele bzgl. Durchsatz und Kundennachfrage (Artikelverfügbarkeit), während FIFO bzgl. der nach dem RBG-Ausfall vorliegenden Artikelbestände wieder uneingeschränkt umgesetzt werden kann.

Eine entsprechende Anpassung bzw. vorübergehende Veränderung des Steuerungsprogramms bzw. der implementierten Betriebsstrategien ermöglicht es, die Erreichungsgrade der oben genannten betrieblichen Ziele im Anschluss an den Ausfall eines RBG neu zu bestimmen. Haben sich allerdings während des Ausfalls etwa hinreichend viele als Positiv ausgeprägte Störstellen der Basisschichten gebildet, ist offensichtlich, dass die uneingeschränkte Umsetzung von FIFO den Erreichungsgrad des Durchsatz-Betriebsziels verhindert, da die RBG nicht einheitlich ausgelastet werden. Haben sich während des Ausfalls hingegen hinreichend viele als Positiv ausgeprägte Störstellen der Deckschichten gebildet, ist wiederum offensichtlich, dass die uneingeschränkte Umsetzung der Querverteilungsstrategie

ebenfalls den Erreichungsgrad des Durchsatz-Betriebsziels unmöglich macht. Diese Beispiele verdeutlichen, dass die oben genannten betrieblichen Ziele hinsichtlich ihrer angestrebten Erreichungsgrade vorab abgestimmt werden müssen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird in der Folge davon ausgegangen, dass dem betrieblichen Ziel „realisierter Durchsatz (mindestens) gleich gefordertem Durchsatz“ uneingeschränkte Priorität einzuräumen ist – d.h. dieses Ziel sollte auch im Anschluss an einen RBG-Ausfall vollständig erreicht werden.

Die beiden anderen Ziele beziehen sich auf die Bestände und auf Eigenschaften der einzelnen Artikel: Bis zu welcher Höhe des Gesamtbestands eines Artikels sind gleichverteilte Gassenbestände anzustreben, damit die im Fall eines neuerlichen RBG-Ausfalls während der zu erwartenden Wiederherstellungszeit eintretenden Kundennachfrage erfüllt werden kann?

Kommt es zum Ausfall eines RBG, dann kann das (strenge) FIFO-Prinzip für die LE der entsprechenden Gasse  $G_a$  nicht eingehalten werden. Für wie lange können in diesem Zusammenhang Abweichungen welchen Ausmaßes vom (strengen) FIFO-Prinzip nach dem Ausfall eines RBG für jeden Artikel toleriert werden? Hierbei stellt sich ggf. auch die Frage, welche alternativen Rechnungslegungsmethoden zur Umsetzung in Frage kämen und wie schnell bzw. wie lange ein vorübergehender Wechsel zu einer entsprechenden Methode erfolgen könnte (siehe Kapitel 3.3).

Wenn zur Erhaltung des Durchsatzniveaus im Anschluss an den Ausfall eines RBG sowohl die Gleichverteilung der Gassenbestände als auch die Auslagerreihenfolge gemäß strengem FIFO nicht realisiert sind, welche dieser beiden Bedingungen sollte dann vorrangig wieder hergestellt werden? Welcher Reduktionsumfang einer welchen Abweichung in der Gleichverteilung der Gassenbestände ist wichtiger oder unwichtiger als welche Reduktion einer welchen Abweichung von der Auslagerreihenfolge nach strengem FIFO? Diese Fragen sind für jeden Artikel ggf. in Abhängigkeit des Artikelbestands zu klären sowie, welche Maßnahme bzgl. des einen Artikels als wieviel



wichtiger oder wieviel unwichtiger anzusehen ist, als welche Maßnahme bzgl. eines anderen Artikels.

## **6.2. Schwaches FIFO – schwache Querverteilung**

Um in der Folge eines RBG-Ausfalls über die Steuerung des Hochregallagers neben den oben vorgestellten Varianten von und Alternativen zu FIFO und Querverteilung auf die Realisierungsgrade der oben erläuterten relevanten betrieblichen Ziele einwirken zu können, fehlen bislang entsprechende Betriebsstrategien. Um diese vorhandene Lücke unter den Betriebsstrategien zu schließen, werden unter den Bezeichnungen abgeschwächtes FIFO bzgl. der Gasse(n)  $G_{x1}$  ( $G_{x2}$ , ...) und der Schichtzahl  $S$  (aFIFO bzgl. G&S) und abgeschwächte Querverteilung bzgl. der Gasse(n)  $G_{x1}$  ( $G_{x2}$ , ...) und der Schichtzahl  $S$  (aQuerverteilung bzgl. G&S) in diesem Kapitel zwei neue Betriebsstrategien vorgestellt.

Die für beide Strategien zu Grunde liegende Idee besteht darin, das strenge FIFO bzw. die Querverteilung artikelspezifisch in einer Variante einzusetzen, welche für die Ausführung entsprechender Ein- bzw. Auslagerungen es ermöglicht, den Einfluss, der bei der Umsetzung entsprechender Lageraufträge von vorhandenen Störstellen auf die Auswahl der Gassen ausgeübt wird, zu kontrollieren. Für beide Betriebsstrategien ermöglicht insbesondere die jeweils zu wählende Ausprägung der sogenannten Schichtzahl  $S$  eben diese Kontrolle. Besitzt im entsprechenden Anwendungsfall die vorliegende Störstelle einen Schichtumfang gleich der gewählten Ausprägung, wird der Einfluss der Störstelle auf die Auswahl der RBG bzw. der Gassen vollständig reduziert. (Wird etwa im Verlauf des fortschreitenden Lagerbetriebs die gewählte Ausprägung so gewählt, dass sie kleiner als der Schichtumfang der betreffenden Störstelle ist, dann wirkt die Störstelle auf die Auswahl der RBG bzw. der Gassen, als besäße sie einen um  $S$  reduzierten Schichtumfang (siehe 6.3).)

Das abgeschwächte FIFO bzgl. der Gasse(n)  $G_{x1}$  ( $G_{x2}$ , ...) und der Schichtzahl  $S$  (aFIFO bzgl. G&S) wird stets für diejenigen LE eines Artikels angewendet, welche eine Anzahl der untersten Basisschichten des betrachteten Artikels

bilden. Die besagte Anzahl von Basisschichten entspricht hierbei der jeweils angegebenen Schichtzahl  $S$  der FIFO-Variante. Für die LE, die die festgelegten  $S$  untersten Basisschichten bilden und sich dabei nicht in der ausdrücklich bezeichneten Gasse  $G_{x1}$  bzw. in den ausdrücklich bezeichneten Gassen  $G_{x1}, G_{x2}, \dots$  befinden, wird zunächst eine vorläufige Auslagerreihenfolge gemäß regulärem FIFO gebildet. Anschließend werden die LE der besagten  $S$  untersten Basisschichten, die in der/den bezeichneten Gasse  $G_{x1}$  /Gassen  $G_{x1}, G_{x2}, \dots$  lagern, in diese vorliegende Auslagerreihenfolge entsprechend der in *Tabelle 11: Vorgehen zur Bildung der Auslagerreihenfolge gemäß aFIFO bzgl. G&S* beschriebenen Vorschrift integriert.

LE der Basisschicht Nr.:	einfügen zwischen den Stellen:	
$S$	$(S-1)*m$	$(S-1)*m + (m-g+1)$
...	...	...
$2$	$m$	$m + (m-g+1)$
$1$	$0$	$m-g+1$

**Tabelle 11: Vorgehen zur Bildung der Auslagerreihenfolge gemäß aFIFO bzgl. G&S**

Für jede LE der besagten Gasse(n) und  $S$  Basisschichten wird die konkrete Einfügestelle (gleichverteilt-)zufällig zwischen den jeweils angegebenen Stellen der vorläufigen Auslagerreihenfolge bestimmt. Die Variable  $m$  steht hierbei für die Gesamtzahl vorhandener Gassen. Die Variable  $g$  entspricht  $1$ , falls nur eine Gasse im Zusammenhang mit der FIFO-Variante ausdrücklich erwähnt wird. Falls mehrere Gassen  $G_{x1}, G_{x2}, \dots$  ausdrücklich erwähnt werden, entspricht sie deren Anzahl.

Das Einfügen erfolgt, indem zuerst für die  $g$  einzufügenden LE der ersten Basisschichten  $g$  Stellen bestimmt werden. Die LE, die sich lt. regulärem FIFO auf diesen bestimmten Stellen befinden, machen diese frei, indem sie auf die jeweils nächst höhere Stelle wechseln, welche bis dato nicht als Einfügestelle bestimmt wurde – und die  $g$  LE der ersten Basisschichten werden auf den für sie bestimmten Stellen eingefügt. Anschließend werden für die

g LE der zweiten Basisschicht g Stellen bestimmt. Diese werden durch Wechsel auf höhere Stellen frei gemacht, etc.

Liegt eine Störstelle der Basisschichten eines Umfangs BS vor und wird zur Bestimmung der Reihenfolge bevorstehender Auslagerungen die FIFO-Variante aFIFO bzgl. G&S mit  $G = \text{Gasse}(n)$ , die mindestens in den beiden ersten Basisschichten ausschließlich über LE höherer VWD als jede LE der übrigen Gassen dieser Schichten verfügen, und  $S = |BS|$  angewandt, dann ergibt sich ein Auslagerverhalten in Bezug auf die Reihenfolge, in der die vorhandenen RBG beansprucht werden, als wäre die Störstelle nicht existent. Die resultierende Auslagerreihenfolge entspräche der, die sich unter regulärem FIFO dann ergeben würde, wenn sämtliche LE der S untersten Basisschichten ohne Ausnahme nacheinander regulär querverteilt eingelagert worden wären. Dementsprechend blieben möglicherweise ebenfalls vorliegende Störstellen der Deckschichten unbeeinflusst von erfolgenden Auslagerungen.

Hierdurch wird allerdings die Auslagerreihenfolge, die sich durch die fortgesetzte Anwendung von regulärem FIFO ergeben hätte, grundsätzlich abgeändert. aFIFO bzgl. G&S verlängert zudem die Verweildauer der betroffenen LE. Um welchen absoluten Wert sich die VWD der einzelnen betroffenen LE verlängert, hängt insbesondere davon ab, wie viele Auslageraufträge bzgl. des betreffenden Artikels in der Folge pro Zeiteinheit umgesetzt werden.

Angesichts der oben beschriebenen Möglichkeiten des Entstehens von Störstellen der Deckschichten soll ebenfalls eine neue Variante der Querverteilungsstrategie vorgestellt werden: die abgeschwächte Querverteilung bzgl. der Gasse(n)  $G_{x1}$  ( $G_{x2}$ , ...) und der Schichtzahl S (aQuerverteilung bzgl. G&S). Wird im Zusammenhang mit regulärer Querverteilung die Zielgasse einer Einlagerung unter den Gassen mit minimalem Artikelbestand ausgewählt, sollen unter Anwendung der betrachteten Querverteilungsvariante die Bestandshöhen der ausdrücklich bezeichneten g Gasse(n)  $G_{x1}$  ( $G_{x2}$ , ...) um einen Wert gleich der angegebenen Schichtzahl S reduziert werden. Die resultierenden Werte werden untereinander und mit den Bestandswerten

der nicht bezeichneten  $m - g$  Gassen verglichen. Diejenige(n) Gasse(n), deren Wert(e) in diesem Vergleich dem Minimum aller Werte entspricht/entsprechen, kommt/kommen als potentielle Zielgasse(n) in Frage. Stehen mehrere potentielle Zielgassen zur Auswahl, regelt die betrachtete Strategievariante nicht die Auswahl unter diesen: Möglich ist es, eine von (gleichverteilt-)zufällig auszuwählen oder die Bestimmung z.B. anhand des Auslastungskriteriums durchzuführen (siehe Kapitel 2.3).

Liegt eine Störstelle der Deckschichten vor und wird die abgeschwächte Querverteilung bzgl. derjenigen Gassen, die über mindestens zwei LE mehr verfügen als die Gasse(n) mit minimalem Bestand, und mit einer Schichtzahl  $S = |DS|$  angewandt, dann ergibt sich ein Einlagerverhalten, als wäre die Störstelle nicht existent bzw. alle Gassen verfügten über annähernd gleich große Bestände und die einzulagernden LE würden entsprechend einer regulären Querverteilung auf die einzelnen Gassen aufgeteilt werden.

Eine Folge der Anwendung der Strategievariante aQuerverteilung bzgl. G&S besteht allerdings darin, dass entsprechend umgesetzte Einlagerungsaufträge die Störstellen der Deckschichten, welche zu Beginn der Phase der Anwendung der Strategie bestanden, nicht ausgleichen sondern im Wesentlichen unverändert bestehen lassen.

### 6.3. Lagersteuerung nach RBG-Ausfall

Setzt man im Anschluss an den Ausfall eines RBG die oben beschriebenen Varianten aFIFO bzw. aQuerverteilung bzgl. G&S für sämtliche Artikel, deren Bestände durch während des RBG-Ausfalls realisierten Durchsatz verursachte Störstellen aufweisen, angemessen ein, indem man G und S für diese Artikelbestände entsprechend der jeweils vorliegenden Störstellen wählt (siehe *Tabelle 12: aFIFO/aQuerverteilung entspr. Störstelle*) und prüft bzw. korrigiert man anschließend die durch während des Ausfalls erfolgten Einlagerungen beeinflusste Wahrscheinlichkeit für bevorstehende Einlagerungen in  $G_a$  durch Inkrementieren von DS entsprechender Artikel, dann entspricht der in der Folge maximal realisierbare Durchsatz des aHRL dem Niveau, das vor dem Ausfall bestand.

<b>vorliegende Störstelle:</b>	<b>aFIFO/aQuerverteilung der entspr. Ausprägung:</b>
als Positiv ausgeprägte Störstelle der Basisschichten ( $BS > 0$ )	aFIFO bzgl. $G_a$ und $S = BS$
als Positiv ausgeprägte Störstelle der Deckschichten ( $DS > 0$ )	aQuerverteilung bzgl. $G_a$ und $S = DS$
als Negativ ausgeprägte Störstelle der Deckschichten ( $DS < 0$ )	aQuerverteilung bzgl. $G_1, G_2, \dots, G_{m-1}$ und $S =  DS $
(angelegte Störstelle mit $AS < 0$ ) ... als Negativ ausgeprägte Störstelle der Basisschichten ( $BS < 0$ )	aFIFO bzgl. $G_1, G_2, \dots, G_{m-1}$ und $S =  BS $

**Tabelle 12: aFIFO/aQuerverteilung entspr. Störstelle**

Die unterste Zeile in *Tabelle 12: aFIFO/aQuerverteilung entspr. Störstelle* verweist in diesem Zusammenhang auf den Umstand, dass durch während des Ausfalls eines RBG erfolgende Einlagerungen eine angelegte Störstelle entsteht, welche in der Folge im Zuge des Artikelumschlags die unterste Basisschicht erreicht und dort eine als Negativ ausgeprägte Störstelle der Basisschichten erzeugt. In dem Moment, in dem diese ausgeprägte Stör-

stelle der Basisschichten vorliegt, ist die entsprechende Ausprägung von aFIFO als gültige Betriebsstrategie zu wählen. Diese gilt im Übrigen auch entsprechend für andere angelegte Störstellen, die in der Folge die unterste Basisschicht erreichen.

Die Schichtzahl  $S$  und die Anzahl der Gassen  $g$ , auf die sich die jeweilige Strategievариante bezieht, bringen die Unterschiede zwischen den Gassenbeständen bzw. die entsprechend geminderte Artikelverfügbarkeit einerseits und die von strengem FIFO abweichende Auslagerreihenfolge andererseits für den jeweiligen Artikel zum Ausdruck, welche jeweils aktuell vorliegenden und im Rahmen von Entscheidungen der Lagersteuerungen gewissermaßen toleriert werden.  $S$  und  $g$ , auf die sich aFIFO bzw. aQuerverteilung je artikelspezifisch beziehen, entsprechen damit bis zu einem gewissen Grad der vorliegenden Reduktion der Erreichungsgrade der entsprechenden relevanten betrieblichen Ziele.

Zu einem Abbau der Reduktion der Erreichungsgrade kann es in der Folge auf 5 unterschiedliche Weisen kommen:

- a) aFIFO:  $S$ -Reduktion in Folge von  $|BS|$ -Reduktion durch Auslagerungen;
- b)  $S$ -Reduktion vor  $|DS|$ - bzw.  $|BS|$ -Reduktion durch  $m$  entspr. Lageraufträge;
- c) aQuerverteilung:  $S$ -Reduktion vor  $|DS|$ -Reduktion während Phase mit geringem Durchsatz;
- d) aFIFO:  $S$ -Reduktion vor  $|BS|$ -Reduktion während Phase mit geringem Durchsatz, und
- e) Umlagerung von einer Gasse in eine andere.

**a) aFIFO:  $S$ -Reduktion in Folge von  $|BS|$ -Reduktion durch Auslagerungen:**

Immer wenn bzgl. eines Artikels, dessen Bestand eine Störstelle der Basisschichten aufweist und je eine Auslagerung nach aFIFO der entspr. Ausprägung aus der Gasse  $G_{x1}$  bzw. aus jeder der Gassen  $G_{x1}, G_{x2}, \dots$  erfolgt ist, auf die sich aFIFO bezieht, dann dekrementiert der Betrag des Umfangs der vorliegenden Störstelle der Basisschichten:  $|BS_{neu}| = |BS_{alt}| - 1$ . Reduziert sich die vorliegende Störstelle der Basisschichten auf diese Weise,

kann die Schichtzahl der wirkenden aFIFO-Ausprägung ebenfalls um 1 reduziert werden, ohne dass es zu einer Ausfall-bedingten ungleichmäßigen Auslastung der RBG kommen könnte:  $S_{\text{neu}} = S_{\text{alt}} - 1$ . Auf diese Weise baut sich eine vorliegende Störstelle der Basisschichten im Zuge erfolgreicher Auslagerungen nach und nach bis auf 0 vollständig ab, während die Schichtzahl, auf die sich die wirkende aFIFO-Ausprägung bezieht, sich im gleichen Maße bis auf 0 abbaut und damit wirkungslos wird.

Die Schichtzahl wird in diesem Zusammenhang in Reaktion auf erfolgte Lageraufträge reduziert. Die nächsten 3 beschriebenen Vorgehensmöglichkeiten sehen im Gegensatz dazu eine Reduktion der Schichtzahl *vor* der Zuweisung von Lageraufträgen an die RBG vor. Die Anwendung dieser Vorgehensweisen setzt in jedem Fall voraus, dass gewisse Lageraufträge zur Ausführung anstehen. Damit ist gemeint, dass sie sich entweder im Auftragspuffer befinden (siehe Kapitel 3.2), oder dass mit ihrer Auslösung in naher Zukunft zu rechnen (vgl. Rhythmik u.ä.; siehe Kapitel 3.2) ist.

Reduzieren sich vorliegende Störstellen der Basisschichten auf oben beschriebene Weise durch erfolgreiche Auslagerungen, ergeben sich in Bezug auf Störstellen der Deckschichten und erfolgreiche Einlagerungen keine vergleichbaren Abläufe. (Kommt es zum vollständigen Abbau eines Artikelbestands, wenn mindestens ein Gassenbestand gleich 0 ist, dann reduzieren erfolgreiche Auslagerungen auch eine ggf. vorliegende Störstelle der Deckschichten. Dieser Sonderfall wird allerdings in der Folge nicht weiter berücksichtigt.)

**b) S-Reduktion vor |DS|- bzw. |BS|-Reduktion durch m entspr. Lageraufträge:**

Immer dann, wenn zur gleichen Zeit  $m$  Lageraufträge zur Ausführung anstehen, von denen eine Anzahl von  $m-1$  Lageraufträgen geeignet ist, eine gewisse vorliegende Störstelle um eine Schicht zu reduzieren, und ein anderer Lagerauftrag geeignet ist, eine andere Störstelle ebenfalls um eine Schicht zu reduzieren (siehe *Tabelle 13: Anzahl und Typ von Lageraufträgen für den gezielten Störstellen-Abbau*), dann kann die Schichtzahl jeder der Betriebsstrategien, die der jeweiligen Störschicht entspricht, um 1 reduziert wer-

den. Zur Umsetzung wird anschließend pro RBG je einer der entsprechenden Lageraufträge eingelastet.

Zu beachten gilt es hierbei und grundsätzlich, dass ein entsprechender, gezielt oder gesteuert erfolgender Abbau einer Störstelle der Basisschichten, also eine Reduktion der Schichtzahl der wirkenden aFIFO- bzw. aQuerverteilung-Strategie vor der Zuweisung von Lageraufträgen an die RBG, sich ggf. auf die Deckschichten des Artikelbestands auswirkt und eine Störstelle der Deckschichten erzeugt oder verändert.

<b>Störstelle:</b>	<b>Lagerauftragstyp:</b>	<b>erforderliche Anzahl:</b>	<b>umzusetzen in der/den Gasse(n):</b>
Störstelle der Basisschichten – Positiv	Auslagerung	1	$G_a$
Störstelle der Basisschichten – Negativ	Auslagerung	$m-1$	$G_1, G_2, \dots, G_{m-1}$
Störstelle der Deckschichten – Positiv	Einlagerung	$m-1$	$G_1, G_2, \dots, G_{m-1}$
Störstelle der Deckschichten – Negativ	Einlagerung	1	$G_a$

**Tabelle 13: Anzahl und Typ von Lageraufträgen für den gezielten Störstellen-Abbau**

Im Folgenden werden weitere Vorgehensmöglichkeiten vorgestellt, welche allerdings alle ausschließlich in solchen Betriebsphasen genutzt werden können, während derer der realisierte betriebliche Durchsatz  $\lambda$  kleiner als der maximal realisierbare Grenzdurchsatz  $\gamma$  ist (siehe Kapitel 3.2), da insbesondere das RBG der Gasse  $G_a$  aber ggf. auch andere RBG im Zuge der Umsetzung einer entsprechenden Vorgehensweise mit mehr Ein- bzw. Auslagerungen beauftragt werden, als es ohne einen entsprechenden Eingriff ins Betriebsgeschehen der Fall wäre. Der Unterschied zwischen dem Durchsatz, den das entspr. RBG realisieren würde, falls keinerlei Eingriffe in das



Betriebsgeschehen erfolgen würden, und dem maximal durch das RBG realisierbare Grenzdurchsatz, lässt sich in diesen Betriebsphasen nutzen. Aufgrund der Variabilität auftretender Spielzeiten und ggf. aufgrund weiterer gassenspezifisch wirksamer Betriebsstrategien (z.B. Doppelspielstrategie) ist es allerdings nur mit begrenzter Genauigkeit möglich, einen gewissen Durchsatzunterschied mittels einer entsprechenden Anzahl von Lageraufträgen zu beziffern, die dem entspr. RBG in einer solchen Phase zusätzlich zugewiesen werden kann. (Es wird vorausgesetzt, dass keine anderen Betriebsstrategien in der Steuerung des aHRL wirksam sind, die eine Zuordnung von Lageraufträgen und RBG/Gassen prioritär zu Querverteilung und FIFO bzw. ihren oben vorgestellten Varianten durchführen.)

**c) aQuerverteilung: S-Reduktion vor |DS|-Reduktion während Phase mit geringem Durchsatz:** Existiert im Bestand eines Artikels eine vorliegende Störstelle der Deckschichten und stehen ausreichend viele Einlageraufträge des entspr. Artikels zur Ausführung bereit, um den Betrag des Störstellenumfangs um 1 zu reduzieren (siehe *Tabelle 13: Anzahl und Typ von Lageraufträgen für den gezielten Störstellen-Abbau*), dann kann eine Betriebsphase mit geringem Durchsatz dazu genutzt werden, die Schichtzahl der der Störstelle entsprechenden Betriebsstrategie aQuerverteilung vor der Zuweisung der Lageraufträge an die RBG um 1 zu reduzieren. In Folge dieser Maßnahme wird auf das RBG der Gasse bzw. jedes RBG der Gassen, auf die sich die aQuerverteilung bezieht, ein Einlagerauftrag eingelastet. Durch die Umsetzung dieser Einlagerungen – spätestens aber durch eine entsprechende Einlagerung einer weiteren LE des Artikels – wird eine angelegte Störstelle erzeugt bzw. der Betrag der Schichtzahl einer angelegten Störstelle inkrementiert.

Wird diese Vorgehensweise angewandt, wenn im Bestand des entspr. Artikels eine Störstelle der Deckschichten vorliegt und die LE der obersten Deckschichten der größten Gassenbestände eine angelegte Störstelle bilden, dann kann sich eine zweite angelegte Störstelle in denselben Deckschichten ausbilden, wie die bereits existierende. Wenn dies eintritt und die beiden Störstellen im Zuge des Artikelumschlags die unterste Basis-

schicht erreichen, dann können sie unter der Wirkung einer geeigneten Ausprägung von aFIFO durch Auslagerungen parallel abgebaut werden.

**d) aFIFO: S-Reduktion vor |BS|-Reduktion während Phase mit geringem Durchsatz:**

Existiert im Bestand eines Artikels eine vorliegende Störstelle der Basischichten und stehen ausreichend viele Auslageraufträge des entspr. Artikels zur Ausführung bereit, um den Betrag des Störstellenumfangs um 1 zu reduzieren (siehe *Tabelle 13: Anzahl und Typ von Lageraufträgen für den gezielten Störstellen-Abbau*), dann kann eine Betriebsphase mit geringem Durchsatz dazu genutzt werden, die Schichtzahl der der Störstelle entsprechenden Betriebsstrategie aFIFO vor der Zuweisung der Lageraufträge an die RBG um 1 zu reduzieren. In Folge dieser Maßnahme wird auf jede RBG der Gasse(n), auf die sich aFIFO bezieht, ein Auslagerauftrag eingelastet. Durch die Umsetzung dieser Auslagerungen verändern sich die Höhen der Gassenbestände, was ggf. eine neue entsprechende Störstelle der Deckschichten bzw. die entsprechende Veränderung einer bereits vorliegenden Störstelle bewirkt.

Aufgrund dieses Zusammenhangs lohnt die Anwendung dieser Vorgehensweise v.a. dann, wenn ein Bestand sowohl über eine Störstelle der Basischichten als auch über eine der Deckschichten derselben Ausprägung verfügt ( $BS/|BS| = DS/|DS|$ ). Reduziert man diese Störstellen schrittweise um insgesamt das Minimum der Beträge beider Störstellen-Umfänge  $\min(|BS|, |DS|)$ , dann ergibt sich jeweils annähernd (siehe *Formel 3* und *Formel 4*):

$$|BS_{\text{neu}}| = |BS_{\text{alt}}| - \min(|BS_{\text{alt}}|, |DS_{\text{alt}}|) \quad \text{Formel 3}$$

$$|DS_{\text{neu}}| = |DS_{\text{alt}}| - \min(|BS_{\text{alt}}|, |DS_{\text{alt}}|) \quad \text{Formel 4}$$

Wobei einer der beiden sich neu einstellenden Störstellen-Umfänge gleich 0 ist.

#### **e) Umlagerung von einer Gasse in eine andere:**

Die Durchführung einer Umlagerung einer LE eines Artikels von einer Gasse in eine andere setzt voraus, dass die Lagertopologie dies ermöglicht. Eine Umlagerung kann während einer Phase mit geringem Durchsatz im Gegensatz zu den Vorgehensweisen b) – d) auch dann initiiert werden, wenn kein artikelspezifischer Lagerauftrag zur Umsetzung ansteht. Mittels Umlagerungen lassen sich zudem auch angelegte Störstellen bearbeiten.

Als nachteilig muss bewertet werden, dass während der Umlagerung einer LE nacheinander entspr. Lagerspiele mit zwei RBG durchgeführt werden müssen, wodurch kein Beitrag zum Lagernachschub oder zur Erfüllung der Kundennachfrage geleistet wird. Da sich allerdings eine Betriebsphase mit geringem Umsatz vollzieht – eine Phase also, während der der Lagernachschub und die Erfüllung der Kundennachfrage gemeinsam nicht den maximal realisierbaren Durchsatz generieren, fällt dieser Nachteil im vorliegenden Kontext nicht weiter ins Gewicht.

### **6.4. Anwendungsbeispiel**

Anhand eines fiktiven Beispielszenarios soll des Weiteren die Auswahl, Anwendung und Wirkungsweise der oben vorgestellten Optionen abschließend kurz beschrieben werden. Hierbei werden spezifische Annahmen bzgl. der betrachteten Ausgangssituation sowie weiterer relevanter Rahmenbedingungen getroffen, d.h. hinsichtlich der Dauer eines RBG-Ausfalls, der Bestandssituation zu Beginn des Ausfalls sowie der in der Folge umzusetzenden Lageraufträge. Diese Annahmen bilden die Grundlage zur konkreten Bestimmung der in der Folge des RBG-Ausfalls umsetzbaren Optionen zur Steigerung der Erreichungsgrade der relevanten betrieblichen Ziele.

Betrachtet werden soll ein 5-gassiges aHRL, dessen Sortiment 100 Artikel aufweist. Jede Gasse wird durch zwei Regale gebildet, von denen jedes 2000 LP aufweist. Der Füllungsgrad des Lagers betrage 65% – es befinden sich also 13000 LE im Lager. Der mittlere Bestand eines einzelnen Artikels umfasse 130 LE. Der mittlere erzielbare Durchsatz unter Grenzauslastung ( $n = m$ ) betrage 300 1/h (siehe *Abbildung 13: Grenzdurchsätze und Ausfälle*

*variierender Dauer (5-gassiges aHRL)).*

Ein RBG falle für die Dauer von 8h aus. Während des Ausfalls erzielt das aHRL unter Grenzauslastung ( $n = m-1$ ) einen mittleren Durchsatz von 254 1/h. Während des Ausfalls erfolgen also 2032 Lagerspiele. Es wird angenommen, dass sich diese je zur Hälfte aus Ein- und Auslagerungen zusammensetzen. Des Weiteren wird vereinfachend angenommen, dass bzgl. jedes einzelnen Artikelbestands je 4 erfolgende Auslagerungen BS inkrementieren und je 4 Einlagerungen AS dekrementieren. (Die artikel-spezifische Ausprägung von DS wird in diesem Beispiel nicht näher betrachtet.) Vor diesem Hintergrund ergibt sich über sämtliche betroffene Artikelbestände aufsummiert  $\Sigma BS = 254$  und  $\Sigma AS = -254$ .

Das Anforderungsniveau im Anschluss an den Ausfall soll zunächst mindestens 300 1/h entsprechen. Um einen Abfall des sich ergebenden Durchsatzes nach Beendigung des Ausfalls zu vermeiden, werden zum Ende des Ausfallzeit BS (und DS) artikelspezifisch ermittelt und die Strategievarianten aFIFO bzw. aQuerverteilung bzgl. G&S für sämtliche betroffenen Artikel entsprechend eingesetzt (s.o.). Auf diese Weise entspricht der nach dem RBG-Ausfall realisierte Grenzdurchsatz dem Niveau von 300 1/h, das vor dem Ausfall erzielt worden war.

Das in diesem Beispiel gewählte Ziel weiterer Maßnahmen soll sein, möglichst schnell sämtliche in Folge des RBG-Ausfalls ermittelten angelegten Störstellen und Störstellen der Basisschichten vollständig abzubauen.

Stellt sich in der Zeit nach dem RBG-Ausfall durchgehend ein Anforderungsniveau in Höhe der Grenzauslastung von 300 1/h ein und werden etwa gleichviele Ein- und Auslagerungen ausgeführt, dann sind nach ca. 86,67h Betriebszeit insgesamt ca. 13000 LE ausgelagert worden, was der Zahl nach dem ursprünglichen Lagerbestand entspricht. Allerdings soll in diesem Zusammenhang davon ausgegangen werden, dass nicht alle Lagerartikel gleich schnell umgeschlagen werden. Vielmehr soll der letzte Langsamderher erst nach ca. 433h (also etwa 2,6 Wochen) ununterbrochener Betriebszeit vollständig umgeschlagen sein.

Wendet man in diesem Betriebszeitraum die Option a) (**aFIFO: S-Reduktion in Folge von |BS|-Reduktion durch Auslagerungen**) durchgängig an, dann werden sämtliche durch den RBG-Ausfall bedingte Störstellen im Zuge des Lagerumschlags vollständig abgebaut.

Ist in der Zeit nach dem RBG-Ausfall das Anforderungsniveau niedriger als 300 1/h, dann vollzieht sich der Lagerumschlag einerseits langsamer, andererseits kann in diesem Fall die Umsetzung weiterer alternativer Optionen in Betracht gezogen werden. Geht man davon aus, dass sich etwa ein Anforderungsniveau in Höhe von 200 1/h einstellt, dann können insbesondere die Optionen d) (**aFIFO: S-Reduktion in Folge von |BS|-Reduktion durch Auslagerungen**) und e) (**Umlagerung von einer Gasse in eine andere**) umgesetzt werden. Das zuvor ausgefallene RBG sei unter diesen Umständen in der Lage etwa 10 Ein- und 10 Auslageraufträge pro Stunde zusätzlich auszuführen.

Um  $\Sigma BS = 254$  alleine mittels Option d) (**aFIFO: S-Reduktion in Folge von |BS|-Reduktion durch Auslagerungen**) vollständig abzubauen, sind ca. 25,4h Betriebszeit nötig, wenn stets ein jeweils artikelspezifischer Auslagerauftrag zu Ausführung ansteht. Steht kein entsprechender Lagerauftrag zur Ausführung an, verlängert sich ggf. die insgesamt zum Abbau der Störstellen nötige Zeitspanne.

Die Anzahl der zum vollständigen Abbau einer angelegten negativen Störstelle erforderlichen Umlagerungen richtet sich v.a. nach dem Störstellenumfang und der Anzahl von Deckschichten, die nach dem Anlegen der Störstelle erzeugt wurden und vorliegen. Jede einzelne Umlagerung erfordert die Umsetzung eines Auslagerauftrags durch ein RBG und anschließend die Umsetzung eines Einlagerauftrags durch ein anderes RBG. Welche RBG in welcher Reihenfolge welche Lageraufträge umzusetzen haben, lässt sich aus der Struktur des jeweiligen Artikelbestands vorhersehen, wodurch auch die zu erwartenden Auslastungen der einzelnen RBG in gewisser Weise abgestimmt werden können. Für den Abbau einer angelegten Störstelle muss das zuvor ausgefallene RBG in der Regel mindestens so viele Einlageraufträge ausführen, wie die Störstelle Schichten aufweist. Der Abbau von  $\Sigma AS = -254$  erfordert unter diesen Umständen also mindestens 25,4 Stunden.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1. Zusammenfassung

Bis auf weiteres ist davon auszugehen, dass automatisierte Hochregalläger relevante Varianten marktüblicher Lagersysteme darstellen. Aufgrund aktueller Entwicklungen der Betriebszeiten sowie beobachtbarer Trends bzgl. der Instandhaltung kommt der Steuerung von aHRL die besondere Bedeutung zu, trotz möglicher auftretender Komponentenstörungen einen hohen mittleren Durchsatz zu generieren. Nach bisherigem Stand der Forschung wurde die Querverteilung als einzige Lagerbetriebsstrategie angesehen, welche einen Beitrag zur Erreichung dieses Ziels leisten könne. Allerdings beobachtete Geinitz in einem aHRL-Modell unter Anwendung von Querverteilung und FIFO, dessen Einsatz nicht zuletzt aus Gründen der Rechnungslegung weit verbreitet ist, eine deutliche Durchsatzreduktion nach Beendigung eines erfolgten RBG-Ausfalls.

Zur Überprüfung der Geinitz'schen Aussagen wurden die Leistungsdaten von marktüblichen, in Palettenläger einsetzbaren RBG und LAM miteinander verglichen, um eine typische Kombination von Merkmalsausprägungen abzuleiten. Diese ermittelten Größen bilden die Grundlage mehrerer Simulationsmodelle, welche aHRL mit unterschiedlichen Gassenzahlen abbilden. Zur Lagersteuerung dieser aHRL kommen jeweils die Lagerbetriebsstrategien Querverteilung und FIFO zum Einsatz. In mehreren Simulationsexperimenten wurden an diesen Modellen in der Folge die Auswirkungen des Ausfalls eines RBG auf das Durchsatzverhalten unter maximaler Auslastung bei variierender Ausfalldauer untersucht. Die ermittelten Ergebnisse bestätigen die Geinitz'schen Beobachtungen.

Eine nähere Betrachtung möglicher artikelspezifischer Änderungen der Gassenbestände, wie sie sich sowohl während des Ausfalls eines RBG als auch im Anschluss an einen RBG-Ausfall ergeben, führte zur Entwicklung des Konzepts der sog. Störstelle im Bestand eines Artikels. Dieses Konzept ermöglicht es, die beobachteten Durchsatzänderungen zu erklären.

Ein durchgeführtes Simulationsexperiment verdeutlicht in diesem Zusam-

menhang, dass auch im ungestörten Lagerbetrieb ein statistisches Auftreten von Störstellen stattfindet.

Eine Diskussion relevanter betrieblicher Ziele der Lagersteuerung und der Bestandsführung liefert die zur Auswahl und Entwicklung von Lösungsansätzen nötigen Grundlagen.

Ein lagerbetriebsstrategischer Ansatz unter Verwendung sog. ‚schwacher‘ Varianten von FIFO und Querverteilung verhindert die durchsatzmindernden Auswirkungen von während eines RBG-Ausfalls entstandenen Störstellen. Eine Reihe weiterer optionaler Maßnahmen ermöglicht es, in Abhängigkeit der im Einzelfall vorliegenden betrieblichen Ziele, die durch einen RBG-Ausfall verursachten Störstellen im laufenden Lagerbetrieb nach und nach abzubauen.

## **7.2. Ausblick**

Werden zur Steuerung eines einzelnen aHRL mehrere unterschiedliche Einlagerstrategien eingesetzt, entscheidet u.a. deren Priorisierung darüber, welchen Einfluss sie auf das Betriebsverhalten des Lagersystems ausüben (siehe Kapitel 3.4). Zur Klärung dieser Zusammenhänge bedarf es entsprechender Untersuchungen.

Anstelle die anzustrebende Artikelverfügbarkeit pauschal zu maximieren (siehe Kapitel 3.3), sollte diese in Abhängigkeit des artikelspezifischen Momentanbestands und der zum Einsatz kommenden Lagerhaltungs- und Nachschubstrategien bestimmt werden (siehe Kapitel 6.1). Hierzu fehlen bislang nähere Betrachtungen.

Der Ausfall eines RBG verhindert die ununterbrochene Fortsetzung von Auslagerungen nach dem FIFO-Prinzip. Zur Vorbereitung auf Zwischenfälle dieser Art sollten die entsprechend eingesetzten Computer-gestützten Informationssysteme alternative Möglichkeiten zur Rechnungslegung vorsehen.

Störstellen können sich im Bestand eines Artikels auch im ungestörten Betrieb ergeben und vergrößern. Hierzu bedarf es geeigneter Möglichkeiten

des Bestandsmonitoring und effektiver Gegenmaßnahmen. Entsprechende Maßnahmen sollten einerseits auf die Vermeidung der Störstellen-Entstehung, andererseits auf den Abbau bereits vorhandener Störstellen abzielen.

Um die im Zusammenhang mit dem Ausfall eines RBG bestehenden Risiken präziser kalkulieren zu können, muss die ‚Leistungsfähigkeit‘ spezifisch ausgestalteter Formen der Instandhaltung quantitativ näher als bisher üblich bestimmt werden.

Die oben vorgestellten lagerbetriebsstrategischen Ansätze und Maßnahmen sind grundsätzlich auch dazu geeignet, zum reibungslosen Lagerbetrieb während der geplanten Stilllegung einzelner vorhandener RBG – etwa im Rahmen der Durchführung von geplanten Instandhaltungsmaßnahmen, von Anlagenerweiterungen oder -modernisierungen – beizutragen. Hierzu sind entsprechende Anpassungen nötig.



## 8. Literaturverzeichnis

- Arnold, D., & Furmans, K. (2009). *Materialfluss in Logistiksystemen* (2. Ausg.). Heidelberg, Dordrecht, u. a.: Springer.
- Atz, T., & Günthner, W. A. (2011). Integrierte Lagersystemplanung. In N. Vojdani (Hrsg.), *7. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL). Proceedings. 03. und 04. Mai 2011* (S. 64-84). Verlag Praxiswissen Service.
- Bamler, U. (2012). Neuer Schwung in alten Anlagen. *Logistik für Unternehmen*, 7/8, S. 28-41.
- Bandow, G., Kohlmann, B., & Wenzel, S. (2008). Robustheit und Modernisierung - ein Widerspruch? *Modernisierungsfibel: Retrofit und Co., Grundlagen, Projekte, Unternehmen*, S. 12-14.
- Bauer, H. (1991). *Wahrscheinlichkeitstheorie* (4. Ausg.). Berlin, New York: De-Gruyter.
- Bleymüller, J., Gehlert, G., & Gülicher, H. (2008). *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler* (15. Ausg.). München: Verlag Franz Vahlen GmbH.
- Brandes, T. (1997). *Betriebsstrategien für Materialflußsysteme unter besonderer Berücksichtigung automatisierter Lager*. Aachen: Shaker Verlag.
- Cramer, E., & Kamps, U. (2008). *Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik. Ein Skript für Studierende der Informatik, der Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften* (2. Ausg.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Dematic. (2014). *Dematic - Produkte: Rapidstore, Regalbediengeräte für Paletten*. Abgerufen am 02. 09 2014 von <http://www.dematic.com/data/asrs/index.html>

- DIN 31051. (2012). Grundlagen der Instandhaltung. *Deutsche Norm*. Berlin: Beuth.
- DIN EN 13306. (2010). Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung. *Deutsche Norm*. Berlin: Beuth.
- DIN EN 60300-1. (2010). Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 1: Leitfaden für Management und Anwendung. *Deutsche Norm*. Berlin: Beuth.
- Dönges, J. (2013). 20. CIM Jahrestagung. *Instandhaltungsservices für Intralogistikanlagen*. Ilmenau.
- Eckstein, P. P. (2014). *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler* (4. Ausg.). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Eisele, W. (2005). *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre - Bd. 2: Führung* (9. Ausg.). (F. X. Bea, B. Friedl, & M. Schweitzer, Hrsg.) Stuttgart: Lucius & Lucius Verlagsgesellschaft.
- FEM 9.222. (06 1989). Regeln über die Abnahme und Verfügbarkeit von Anlagen mit Regalbediengeräten und anderen Gewerken. *Fédération Européenne de al Manutention (FEM) Sektion IX(1.)*, 13.
- FEM 9.831. (02 1995). Berechnungsgrundlagen für Regalbediengeräte - Toleranzen, Verformungen und Freimaße im Hochregallager. *Fédération Européenne de la Manutention (FEM) Sektion IX*.
- FEM 9.851. (08 1978). Leistungsnachweis für Regalbediengeräte - Spielzeiten. *Fédération Européenne de la Manutention (FEM) Sektion IX(1.)*, 7.
- Gebhardt Fördertechnik. (2010). *Gebhardt-Fördertechnik - Produkte - Lagertechnik - Regalbediengeräte: Palettenregalbediengeräte*. Abgerufen am 02. 09 2014 von <http://www.gebhardt-foerdertechnik.de/produkte/lagertechnik/lastaufnahmemittel.html>

- Geinitz, J. (1998). Unerkannte Abhängigkeiten mindern die Leistungsfähigkeit automatisierter Lager. *Marktbild Lager*, 18, S. 16-18.
- Glass, M. (2008). *Schnellläuferstrategien in Lagern und Dynamische Zonierung*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Fakultät für Maschinenwesen.
- Gudehus, T. (1999). *Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen* (1. Ausg.). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Gudehus, T. (2006). *Dynamische Disposition* (2. Ausg.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
- Gudehus, T. (2010). *Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen* (4. Ausg.). Heidelberg, Dordrecht, u.a.: Springer.
- Günthner, W. A., Atz, T., & Ulbrich, A. (2011). *Integrierte Lagersystemplanung*. Forschungsbericht der AiF-Forschungsvereinigung, fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik.
- Handfield, R., Straube, F., Pfohl, H.-C., & Wieland, A. (2013). *Bundesvereinigung Logistik BVL; www.bvl.de*. Abgerufen am 18.. 06. 2013 von Trends and Strategies in Logistics and Supply Chain Management - Embracing Global Logistics Complexity to Drive Market Advantage:  
<http://www.bvl.de/service/publikationen/studien-zum-download>
- Jungheinrich AG. (2014). *Jungheinrich AG - Automatische Förderzeuge - Regalbediengeräte - Regalbediengeräte Hochregallager*. Abgerufen am 02. 09 2014 von <http://www.jungheinrich.de/automatische-foerderzeuge/regalbediengerate/regalbediengerat-hochregallager/>

- Kern, W. (Hrsg.). (1984). *Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre - Handwörterbuch der Produktionswirtschaft* (2. Ausg., Bd. 7). Stuttgart: Poeschel Verlag.
- Klug, F. (2010). *Logistikmanagement in der Automobilindustrie*. Heidelberg, Dordrecht, u.a.: Springer.
- Kuchling, H. (2001). *Taschenbuch der Physik* (17. Ausg.). München, Wien: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- Maier, M. (2012). *Praxisgerechte AbnahmeprozEDUREN für intralogistische Systeme unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitstheorie - Fortschr.-Ber. VDI-Reihe 13 Nr. 56*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998). *Forecasting - Methods and Applications* (3rd Ausg.). New York, Chichester, Weinheim, u.a.: John Wiley & Sons, Inc.
- Markl, U. (2012). *Shuttle-System vs. Automatisches Kleinteilelager: Ein Vergleich hinsichtlich Durchsatz, Lagerkapazität und Kosten*. Diplomarbeit, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Professur für Technisches Logistik, Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt, Dresden.
- Meyberg, K., & Vachenauer, P. (1993). *Höhere Mathematik 1* (2. Ausg.). Berlin, Heidelberg, New-York: Springer-Verlag.
- Monecke, J., Schulz, R., & Zadek, H. (2010). Mobile Messeinrichtung zur Prozessdiagnose in Stückgutförderanlagen. In L. Overmeyer (Hrsg.), *6. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL) - Tagungsband - 29. und 30. September 2010* (S. 106-116). Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH.
- Pfohl, H.-C. (2010). *Logistiksysteme - Betriebswirtschaftliche Grundlagen* (8. Ausg.). Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer.

- Piazza, H.-M. (5 2012). Systemintegrator mit starkem Engineering - FM-Interview mit Mark Vogt, Vertriebsleiter, TGW Systems Integration GmbH, Wels. *FM - Das Logistik-Magazin*, S. 10-13.
- Rank, S., Uhlig, T., Schmidt, T., & Rose, O. (2012). Beherrschung stark korrelierter Logistik- und Produktions-Prozesse. In H. Zadek (Hrsg.), *8. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V., 26. und 27. September 2012* (S. 135-146). Magdeburg: Otto-von-Guericke Universität Magdeburg.
- Scheid, W.-M. (2006). 14. CIM-Jahrestagung. *RAM - Reliability, Availability, Maintenance: Gedanken zu einer europäisch-nordamerikanischen Initiative*. Ilmenau.
- Scheid, W.-M. (2008). Automatisierte Systeme der Intralogistik - Hochregallagertrends. In *Jahrbuch Logistik* (S. 35-37). Korschbroich: free beratung GmbH.
- Scheid, W.-M. (2010). Havarie bei Anlagen der Intralogistik. In H. Wolft-Kluthausen (Hrsg.), *Jahrbuch Logistik* (S. 30-33). Korschbroich: free beratung.
- Schierenbeck, H., & Wöhle, C. B. (2012). *Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre* (18. Ausg.). München: Oldenbourg Verlag.
- Schmidt, T. (10 2012). Zwischen Theorie und Praxis. *Logistik für Unternehmen*, S. 43.
- Schneckenburger, T. (2000). *Prognosen und Segmentierung in der Supply Chain - Ein Vorgesehensmodell zur Reduktion der Unsicherheit*. Bamberg: Difo-Druck OHG.
- Schumann, M. (2008). *Zur Bestimmung der Umschlagleistung von Hochregallagern unter besonderer Berücksichtigung der Lagerorganisation*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau.

- Schumann, P., Schmidt, T., & Zhakov, A. (2014). Entwicklung eines Versuchstandes für die Zahnriemenprüfung. In W. GÜthner, & WGTL (Hrsg.), *Tagungsband zum 10. Fachkolloquiums der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL) am 8.+9. Oktober 2014* (S. 49-69). Garching: fml - Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik; TU München.
- SSI Schäfer. (kein Datum). *SSI Schäfer - Förder- und Kommissioniersysteme - Regalbediengeräte - Broschüre: Regalbediengeräte*. Abgerufen am 02. 09 2014 von [http://www.ssi-schaefer.de/fileadmin/ssi/documents/navigationbaum/logistiksysteme/vollautomatische\\_systeme/palettenhochregallager/RBG\\_Broschüre\\_de.pdf](http://www.ssi-schaefer.de/fileadmin/ssi/documents/navigationbaum/logistiksysteme/vollautomatische_systeme/palettenhochregallager/RBG_Broschüre_de.pdf)
- Stölzle, W., Heusler, K., & Karrer, M. (2004). *Erfolgsfaktor Bestandsmanagement - Konzeptk, Anwendung, Perspektiven*. Zürich: Versus.
- Tempelmeier, H. (2012). *Bestandsmanagement in Supply Chains* (4. Ausg.). Norderstedt: Books on Demand GmbH.
- ten Hompel, M. (2008). Intralogistik - Auf dem Weg vom Prozess zum Service. In H. Baumgarten (Hrsg.), *Das Beste der Logistik* (S. 103-110). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- ten Hompel, M. (Hrsg.). (2012). *IT in der Logistik - Trend des Logistik-IT-Markts auf einen Blick - vom Supply Chain Management bis zum Warehouse Management*. Hamburg: DVV Media Group.
- ten Hompel, M., & Heidenblut, V. (2006). *Taschenlexikon Logistik - Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- ten Hompel, M., & Schmidt, T. (2008). *Warehouse Management. Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen* (3. Ausg.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

- TGW. (2013). *TGW - Produkte - Lagersysteme: Magnus (Paletten-Regalbediengerät)*. Abgerufen am 02. 09 2014 von <http://www.tgw-group.com/de-de/produkte/lagersysteme/palettenlagertechnikbr-160/8/>
- TGW. (2013). *TGW - Produkte - Lagersysteme: Palettenteleskop D*. Abgerufen am 02. 09 2014 von <http://www.tgw-group.com/de-de/produkte/lagersysteme/palettenlagertechnikbr-160/23/>
- Turban, E., & Volonino, L. (2010). *Information Technology for Management - Transforming Organizations in the Digital Economy* (7. Ausg.). Hoboken: Jon Wiley & Sons.
- VDI 2516. (September 2003). Flurförderzeuge für die Regalbedienung - Spielzeitermittlung in Schmalgängen. *VDI-Richtlinie*. Berlin: Beuth-Verlag.
- VDI 2895. (Dezember 2012). Organisation der Instandhaltung - Instandhalten als Unternehmensaufgabe. *VDI-Richtlinie 2895*. Berlin: Beuth.
- VDI 3581. (12 2004). Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente. *VDI Richtlinie, 14*. Düsseldorf: Beuth-Verlag.
- VDI 3633. (2013). Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Begriffe. *Entwurf einer VDI-Richtlinie*. Düsseldorf: Beuth.
- VDI 3649. (1992). Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lagersysteme. *VDI-Richtlinie*. Berlin: Beuth.
- VDI 3967. (12 1994). Instandhaltung zur Sicherung des Betriebes von Lagersystemen. *VDI-Richtlinie*. Düsseldorf: Beuth.
- VDI 4403-1. (2011). Modernisierung und Erweiterung fördertechnischer Anlagen und logistischer Systeme bei laufendem Betrieb. *VDI-Richtlinie*. Berlin: Beuth.

- VDI 4480-1. (1998). Durchsatz von automatischen Lagern mit gassengebundenen Regalbediensystemen. *VDI-Richtlinie 4480 - Blatt 1*. Berlin: Beuth.
- VDI 4486. (2012). Zuverlässigkeit in der Intralogistik - Leistungsverfügbarkeit. *VDI-Richtlinie*. Düsseldorf: Beuth.
- Viastore. (kein Datum). *Viastore - Lager- und Distributionssysteme - Automatische Hochregallager (HRL) - Regalbediengeräte (RBG): viapal*. Abgerufen am 02. 09 2014 von <http://www.viastore.de/lagertechnik/regalbediengeraeete/regalbediengeruet-hochregallager-viapal/>
- Wenzel, S., Weiß, M., Collisi-Böhmer, S., Pitsch, H., & Rose, O. (2008). *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik - Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Wöhe, G., & Döring, U. (2013). *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre* (25. Ausg.). München: Verlag Franz Vahlen GmbH.
- Wustmann, D., Schmalzer, R., & Schmidt, T. (2011). Relevante Zeitbereiche intralogistischer Datenströme - Grundlagen für die Optimierung im laufenden Betrieb. In N. Vojdani (Hrsg.), *7. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL) - Proceedings - 03. und 04. Mai 2011* (S. 194-206). Dortmund: Verlag Praxiswissen Service.



## 9. Anhang – Algorithmen zur Berechnung der Fahrtzeit

Einzelspiel		Doppelspiel
Einlagern:	Auslagern:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lasttransfer (LE-Aufnahme)</li> <li>• Bewegung in xy-Ebene (Ü-Punkt → LP)</li> <li>• Lasttransfer (LE-Abgabe)</li> <li>• Bewegung in xy-Ebene (LP → Ü-Punkt)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewegung in xy-Ebene (Ü-Punkt → LP)</li> <li>• Lasttransfer (LE-Aufnahme)</li> <li>• Bewegung in xy-Ebene (LP → Ü-Punkt)</li> <li>• Lasttransfer (LE-Abgabe)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lasttransfer (LE1-Aufnahme)</li> <li>• Bewegung in xy-Ebene (Ü-Punkt → LP1)</li> <li>• Lasttransfer (LE1-Abgabe)</li> <li>• Bewegung in xy-Ebene (LP1 → LP2)</li> <li>• Lasttransfer (LE2-Aufnahme)</li> <li>• Bewegung in xy-Ebene (LP2 → Ü-Punkt)</li> <li>• Lasttransfer (LE2-Abgabe)</li> </ul>

**Abbildung 27: Ablauf Einzelspiel/Doppelspiel**

Neben der Möglichkeit eine LE innerhalb einer Gasse von einem LP auf einen anderen umzulagern, welche hier nicht weiter betrachtet wird, erfolgt das Arbeitsspiel eines RBG mit der Kapazität  $C_{LG} = 1$  LE (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 615, 626ff) stets entweder in Form eines Einzel- oder eines Doppelspiels. Einzelspiele können in der Variante Einlagern oder der Variante Auslagern erfolgen. Eine Übersicht über die jeweils hiermit verbunden Vorgangsfolgen liefert *Abbildung 27: Ablauf Einzelspiel/Doppelspiel*.

Zur Berechnung der im konkreten Einzelfall anfallenden Spielzeit eignen sich *Formel 5* für ein Einzelspiel und *Formel 6* für ein Doppelspiel. Einzusetzen sind jeweils die Totzeit  $t_0$  (siehe *Tabelle 2: LAM für Paletten – Leistungskenngrößen*), die entsprechenden Werte für  $t_{xy,ges}$  (jeweils Ergebnis der Algorithmen von *Abbildung 28: Algorithmus A zur Fahrtzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung* und *Abbildung 29:*

Algorithmus B zur Fahrzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung) sowie die Lasttransferzeit  $t_{Trsf}$ .

$$t_{ESp} = 2(t_0 + t_{xy,ges} (\ddot{U} \leftrightarrow LP1) + t_{Trsf}) \quad \text{Formel 5}$$

$$t_{DoSp} = 3t_0 + t_{xy,ges} (\ddot{U} \rightarrow LP1) + t_{xy,ges} (LP1 \rightarrow LP2) + t_{xy,ges} (LP2 \rightarrow \ddot{U}) + 2t_{Trsf} \quad \text{Formel 6}$$

(vgl. (Gudehus, 2010, S. 628))

Die Lasttransferzeit  $t_{Trsf}$  berechnet sich entsprechend *Formel 7* (VDI 2516, 2003) (VDI 2516, 2003).

$$t_{Trsf} = 2 * t_{Schub} + t_{Fr|Ab} + t_{Trsf,R} \quad \text{Formel 7 (VDI 2516, 2003)}$$

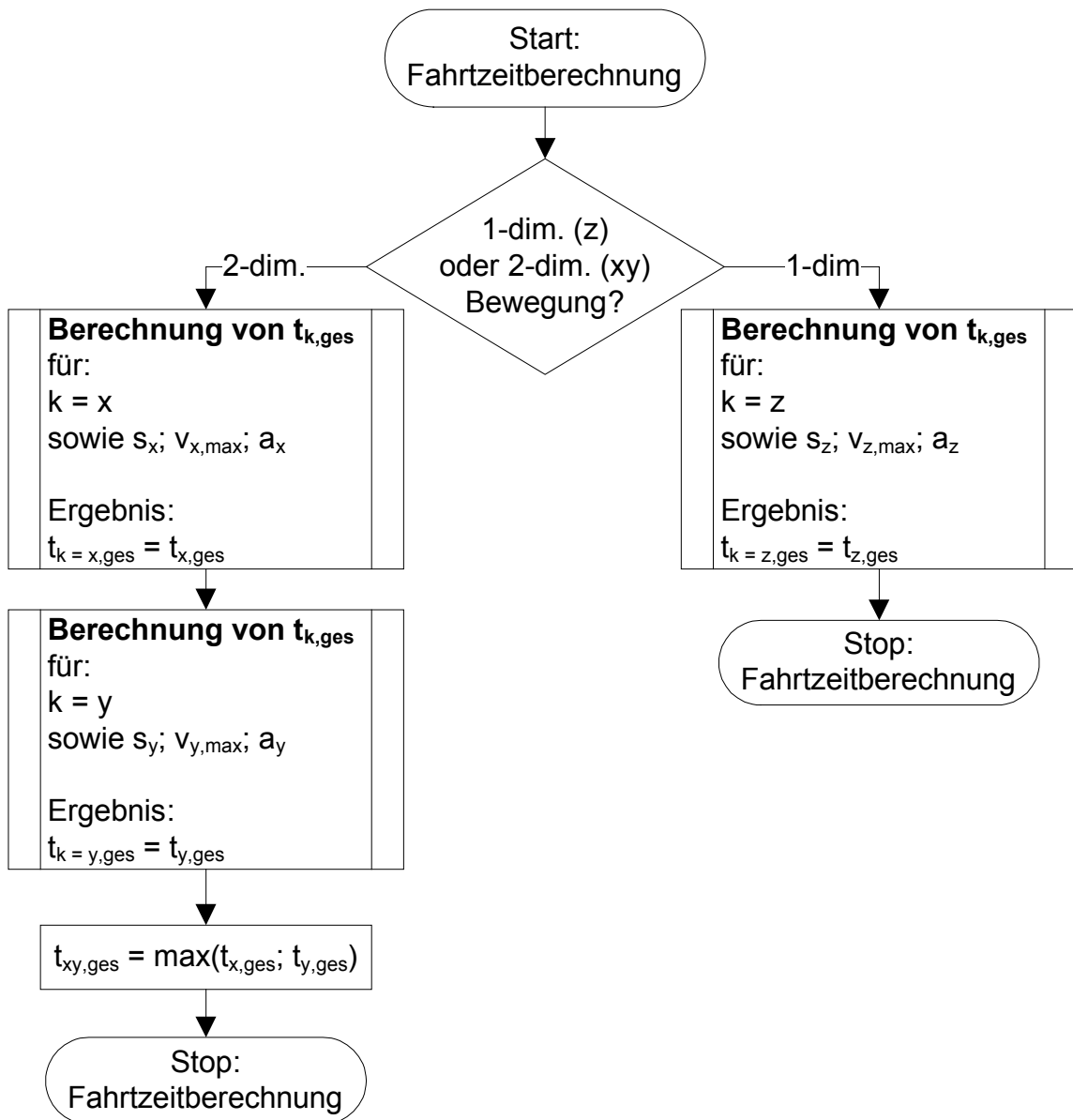
Für die in *Formel 7 (VDI 2516, 2003)* (VDI 2516, 2003) genannten Größen lassen sich Entsprechungen angeben (siehe *Tabelle 14: entsprechende Größen*):

$t_{Schub}$	$t_{z,ges}$
$t_{Fr Ab}$	$t_{y,ges}$ für $y = 100\text{mm}$
$t_{Trsf,R}$	$2 * t_0$

**Tabelle 14: entsprechende Größen**

Die Größe  $t_{z,ges}$  ergibt sich aus der Anwendung der entspr. Berechnungsvorschrift für Bewegungszeiten (Abbildung 28: Algorithmus A zur Fahrzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung und *Abbildung 29: Algorithmus B zur Fahrzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung*). Bei  $t_{Fr|Ab}$  handelt es sich um die Zeitdauer für das Freiheben bzw. Absenken der Last, welche sich ebenfalls mit Hilfe des dokumentierten Berechnungswegs für Bewegungszeiten (Abbildung 28: Algorithmus A zur Fahrzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung und *Abbildung 29: Algorithmus B zur Fahrzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung*) ermitteln lässt, wobei in diesem Zusammenhang allgemein angenommen wird, dass der jeweilige Be-

wegungsweg in y-Richtung immer eine Länge von 100mm hat. Darüber hinaus wird angenommen, dass  $t_{Trs,R}$ , die sog. Reaktionszeiten in der Lasttransferzeit (VDI 2516, 2003), einer Zeitdauer entsprechen, die dem doppelten der Totzeit  $t_0$  (siehe *Tabelle 2: LAM für Paletten – Leistungskenngrößen*) entspricht.



**Abbildung 28: Algorithmus A zur Fahrtzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung**

Die in Form zweier Flussdiagramme dargestellten Algorithmen zur Fahrtzeitberechnung (siehe *Abbildung 28: Algorithmus A zur Fahrtzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung* und *Abbildung 29: Algorithmus B zur Fahrtzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung*) eignen sich sowohl zur Berechnung

der Fahrzeit eines RBG in x-y-Ebene als auch zur Berechnung der Verfahrzeit des LAMs in z-Richtung.

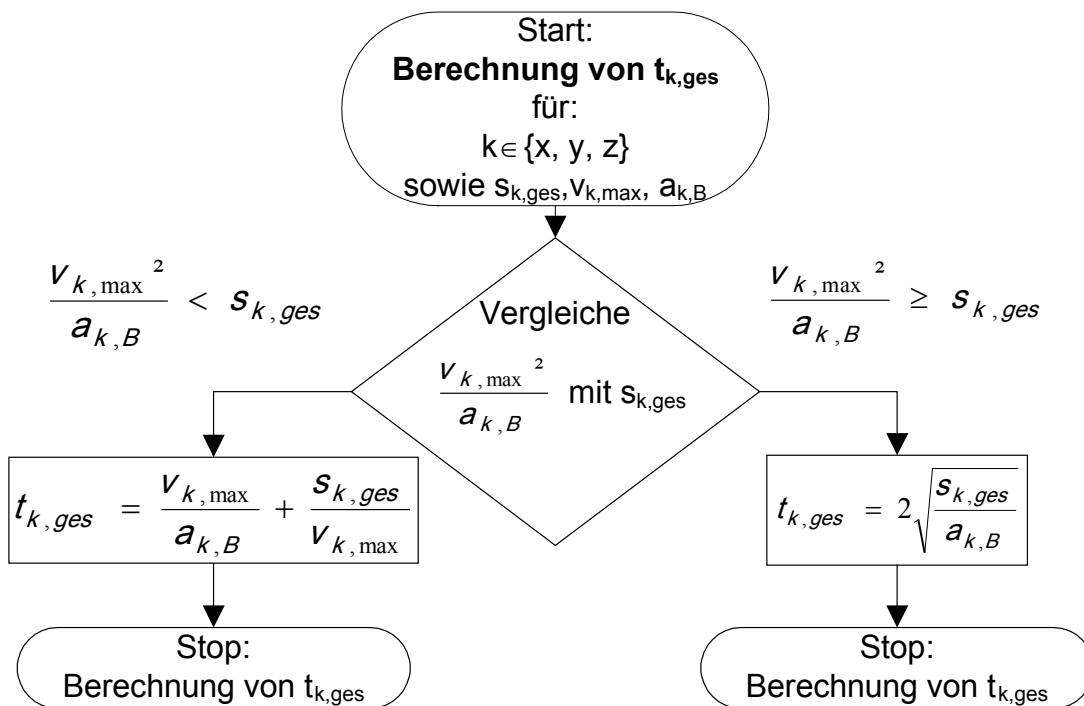


Abbildung 29: Algorithmus B zur Fahrzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung

Den Kern des Algorithmus bildet die Routine zur Berechnung von  $t_{k,ges}$  (siehe Flussdiagramm in *Abbildung 29: Algorithmus B zur Fahrzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung*), wobei  $k$  als Platzhalter für jeweils eine der drei in Frage kommenden Raumdimensionen  $x$ ,  $y$  und  $z$  steht. Jeder der hiermit betrachteten Fahrvorgänge beginnt mit einer Beschleunigungsphase und endet mit einer Bremsphase (negative Beschleunigung). Bei der Berechnung von  $t_{k,ges}$  muss man in der Folge unterscheiden, ob die insgesamt zurückzulegende Fahrstrecke  $s_{k,ges}$  lang genug ist, damit zwischen Beschleunigungs- und Bremsphase die technisch maximal mögliche Geschwindigkeit  $v_{k,max}$  erreicht wird oder nicht. Für den zur Erreichung der technisch maximal möglichen Geschwindigkeit  $v_{k,max}$  nötigen Beschleunigungsweg  $s_{k,B}$  lässt sich folgende Formel verwenden (siehe *Formel 8 (Kuchling, 2001, S. 65)* (Kuchling, 2001, S. 65)):

$$v_{k,max} = \sqrt{2a_{k,B}s_{k,B}}$$

Formel 8 (Kuchling, 2001, S. 65)

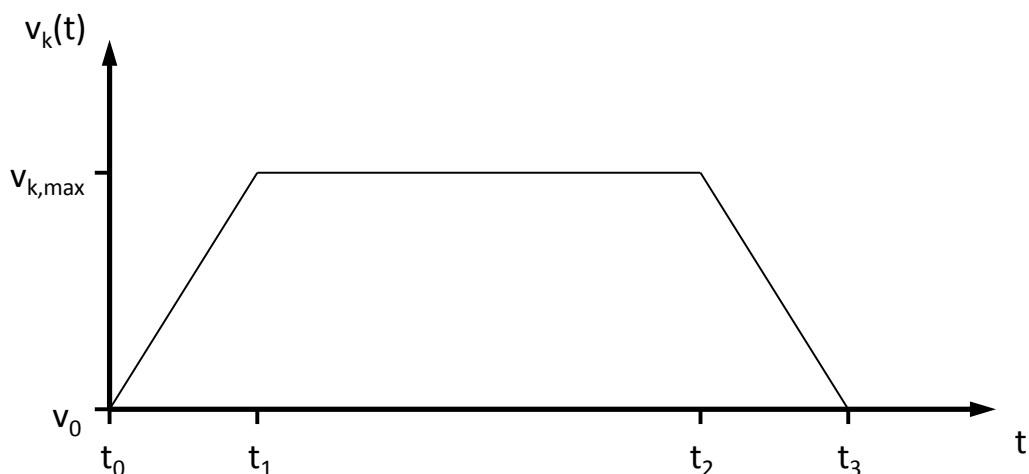
Durch Umformen erhält man (siehe *Formel 9*):

$$s_{k,B} = \frac{v_{k,max}^2}{2a_{k,B}} \quad \text{Formel 9}$$

Hierbei wird idealisierend angenommen, dass die Bremsbeschleunigung betragsgleich  $a_{k,B}$  ist und dass es sich jeweils um lineare Beschleunigungen handelt.

Für den Fall, dass  $v_{k,max}$  erreicht wird (siehe: linker Ast im Flussdiagramm der *Abbildung 29: Algorithmus B zur Fahrzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung*), lässt sich die betrachtete Fahrbewegung in drei Phasen (siehe *Abbildung 30: Bewegung mit Phase konstanter Geschwindigkeit  $v_{k,max}$* ) unterteilen: in eine Beschleunigungsphase ( $\Delta t_{10}$ ), eine Phase konstanter Geschwindigkeit ( $\Delta t_{21}$ ) und eine Bremsphase ( $\Delta t_{32}$ ).

(Anzumerken in diesem Zusammenhang ist, dass die Annahme einer phasenweisen Konstanz der jeweiligen Beschleunigung eine idealisierende darstellt (Gudehus, *Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen*, 2010, S. 622f) (Schumann M. , 2008, S. 39f)).



**Abbildung 30: Bewegung mit Phase konstanter Geschwindigkeit  $v_{k,max}$**

Für die gesuchte Gesamtfahrzeit  $t_{k,ges}$  lässt sich folglich ansetzen :

$$t_{k,ges} = \Delta t_{10} + \Delta t_{21} + \Delta t_{32} \quad \text{Formel 10}$$

Aufgrund der angenommenen Betragsgleichheit der wirkenden Beschleunigungen ist  $\Delta t_{10} = \Delta t_{32}$ . Durch einfaches Umformen erhält man  $\Delta t_{10}$  aus *Formel 11* (Kuchling, 2001, S. 65) (Kuchling, 2001, S. 65):

$$v_{k,max} = a_{k,B} \Delta t_{10} \quad \text{Formel 11 (Kuchling, 2001, S. 65)}$$

Für die Phase konstanter Geschwindigkeit gilt es noch  $\Delta t_{21}$  auf bekannte Größen zurückzuführen. Hierzu lässt sich zunächst wie für einfache Translationen *Formel 12* ansetzen, wobei  $s_{21}$  die im Zeitraum  $\Delta t_{21}$  zurückgelegte Wegstrecke ist.

$$v_{k,max} = \frac{s_{21}}{\Delta t_{21}} \quad \text{Formel 12 (Kuchling, 2001, S. 63)}$$

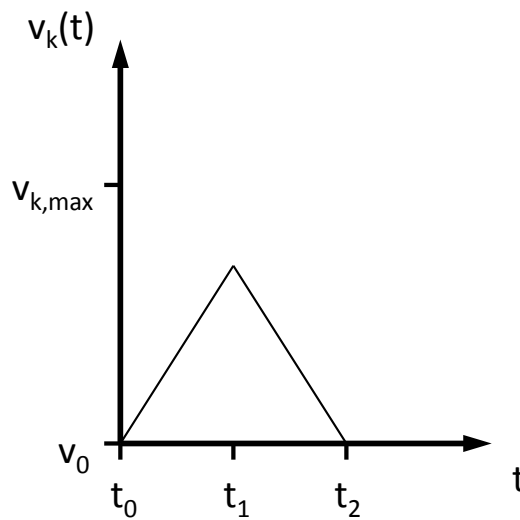
Die im Zeitraum  $\Delta t_{21}$  zurückgelegte Wegstrecke  $s_{21}$  entspricht der insgesamt zurückzulegenden Wegstrecke  $s_{k,ges}$  abzüglich der während der Beschleunigungsphase zurückgelegten Wegstrecke  $s_{10} = s_{k,B}$  sowie der gleichlangen, während der Bremsphase zurückgelegten Wegstrecke  $s_{32} = s_{k,B}$ . *Formel 10* lässt sich folglich unter Berücksichtigung der aufgeführten Zusammenhänge wie folgt umschreiben (siehe *Formel 13*):

$$t_{k,ges} = 2 \frac{v_{k,max}}{a_{k,B}} + \frac{s_{k,ges} - 2s_{k,B}}{v_{k,max}} \quad \text{Formel 13}$$

Bzgl.  $s_{k,B}$  bietet *Formel 9* eine weitere Möglichkeit der Umformulierung, woraufhin sich *Formel 13* in folgender Weise vereinfachen lässt (siehe *Formel 14*):

$$t_{k,ges} = \frac{v_{k,max}}{a_{k,B}} + \frac{s_{k,ges}}{v_{k,max}} \quad \text{Formel 14}$$

Für den Fall, dass  $v_{k,max}$  nicht erreicht wird (siehe: rechter Ast im Flussdiagramm der *Abbildung 29: Algorithmus B zur Fahrzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung*), lässt sich die betrachtete Fahrbewegung in zwei Phasen (siehe *Abbildung 31: Bewegung ohne Phase konstanter Geschwindigkeit  $v_{k,max}$* ) unterteilen: in eine Beschleunigungsphase ( $\Delta t_{10}$ ) und eine Bremsphase ( $\Delta t_{21}$ ).



**Abbildung 31: Bewegung ohne Phase konstanter Geschwindigkeit  $v_{k,max}$**

Für die gesuchte Gesamtfahrzeit  $t_{k,ges}$  lässt sich folglich ansetzen (siehe *Formel 15*):

$$t_{k,ges} = \Delta t_{10} + \Delta t_{21} \quad \text{Formel 15}$$

Aufgrund der angenommenen Betragsgleichheit der wirkenden Beschleunigungen ist  $\Delta t_{10} = \Delta t_{21}$ .

$$s_{k,B} = \frac{a_{k,B} * \Delta t_{10}^2}{2} \quad \text{Formel 16}$$

Setzt man *Formel 16* nach Umformung in *Formel 15* ein und berücksichtigt man  $s_{k,ges} = 2s_{k,B}$ , ergibt sich nach Vereinfachung:

$$t_{k,ges} = 2 \sqrt{\frac{s_{k,ges}}{a_{k,B}}} \quad \text{Formel 17}$$

Mittels dieser Routine zur Berechnung von  $t_{k,ges}$  (siehe Flussdiagramm in *Abbildung 29: Algorithmus B zur Fahrzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung*) lassen sich unter den in aHRL gegebenen Bedingungen Fahrzeiten bzgl. Bewegungen in sämtlichen drei kartesischen Raumdimensionen berechnen. Bei den Bewegungen eines RBG in x-y-Ebene überlagern sich hierbei häufig Bewegungen in x-Richtung mit Bewegungen in y-Richtung – d.h. das RBG bewegt sich gleichzeitig in x- wie auch in y-Richtung. Um im Fall einer solchen zusammengesetzten Bewegung die nötige Gesamtfahrzeit zu ermitteln, sind zunächst die Fahrzeiten in x- ( $t_{x,ges}$ ) wie auch in y-Richtung ( $t_{y,ges}$ ) separat zu ermitteln (siehe: linker Ast im Flussdiagramm der *Abbildung 28: Algorithmus A zur Fahrzeitberechnung in x-y-Ebene und z-Richtung*). Die Gesamtfahrzeit für die kombinierte Bewegung ( $t_{xy,ges}$ ) entspricht der größeren dieser beiden ermittelten Fahrzeiten  $t_{x,ges}$  und  $t_{y,ges}$  (vgl. (Gudehus, Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen, 2010, S. 623)).



