

Verfahren zur Durchsatz-maximierenden Lagerordnung auf Grundlage unsicherer Zugriffshäufigkeitsprognosen

Storage assignment on the basis of uncertainly forecasted access frequencies to maximize throughput

Christian Wildner

*Fachgebiet Fabrikbetrieb
Fakultät für Maschinenbau
TU Ilmenau*

Im Zusammenhang mit der Entwicklung einer neuen Betriebsstrategie zur Erzeugung einer Durchsatz-maximierenden Lagerordnung werden neue Herausforderungen des Strategiedesigns in Form von Echtzeitanforderungen, Korrelationen-abbildende Prognosenwertmodelle und ungewissen Auftragsfolgen thematisiert. Die Effektivität der neuen Betriebsstrategie wird im Rahmen eines Simulationsexperiments getestet.

[Schlüsselwörter: Betriebsstrategie, Lagerordnung, Echtzeitanforderung, Prognose, Auftragsreihenfolge, Simulation]

In the context of the development of a new storage policy to maximize the throughput of a storage system by proper storage assignment new challenges of policy design in form of real-time behavior, correlations in modelling forecasting and uncertain order sequences are taken into account. The efficiency of the new storage policy is tested with simulation methods.

[Keywords: storage policy, warehouse organization, real-time, forecasting, order sequence, simulation]

1 EINLEITUNG

Die für die Ein-/Auslagerungen von Ladeeinheiten (LE) in einem Lager anfallenden Zeiten hängen je nach technischem Lagertyp i. Allg. auch von den Positionen der entsprechenden Lagerplätze bzw. von den anfallenden Wegstrecken zwischen den Lagerplätzen und dem jeweiligen Übergabepunkt ab. Die Idee, bei der Auswahl der genutzten Lagerplätze bzw. für die Lagerordnung Unterschiede in artikelspezifischen Zugriffshäufigkeiten zu berücksichtigen, um somit die im regulären Betrieb anfallende mittlere Spielzeit zu verringern bzw. den maximalrealisierbaren Durchsatz zu steigern, existiert schon seit langem etwa unter den Namen Schnellläuferkonzentration oder ABC-Zonierung.

Versuche der Weiterentwicklung dieser Strategien durch eine Verfeinerung der Zonierung bzw. eine Erhöhung der Zonenanzahl alleine stießen auf Grenzen (Schumann, 2008). (Glass, 2008) schlug eine Strategie unter Berücksichtigung des FIFO-Prinzips vor, die für jede einzelne vorliegende einzulagernde Einheit im Moment der Bestimmung ihres Lagerplatzes, diesen in Abhängigkeit der aktuellen Verteilung des Lagerbestands und in Abhängigkeit der prognostizierten Verweildauer der jeweiligen LE ermittelt. In einer Weiterentwicklung durch (Piepenburg, Piepenburg, & Bruns, 2014) finden bei der Bestimmung des Lagerplatzes zusätzlich zur aktuellen Verteilung des Lagerbestands und der prognostizierten Verweildauer der vorliegenden LE auch all jene Einheiten Berücksichtigung, deren prognostizierte Ein- und Auslagerung voraussichtlich während der prognostizierten Verweildauer der vorliegenden LE erfolgt.

Angesichts des gegenwärtigen Standes der Forschung lassen sich einige relevante Aspekte benennen, die bislang noch nicht ausreichend Beachtung gefunden haben:

Im Zusammenhang mit der Modellierung von zukünftigen Zugriffshäufigkeiten bzw. von deren Prognosewerten ist von Einflüssen auszugehen, die in unterschiedlicher Hinsicht Unsicherheit und Dynamik dieser Daten charakterisieren. Insbesondere ist die Möglichkeit der Existenz von Korrelationen und deren Folgen bislang nicht berücksichtigt worden.

Die Ausprägung von Unsicherheit verursachenden Einflüssen und ihre genaue Wirkung auf relevante zukünftige Entwicklungen und Ereignisse sind aus Sicht des Lagerbetreibers i.Allg. nur teilweise bekannt. Daher ist es notwendig, entsprechende Lagerstrategien zu formulieren, die ein begrenztes Wissen über die vorliegenden Strukturen der Unsicherheit erfordern.

Die zurückliegenden Betrachtungen zu Durchsatz-maximierenden Lagerordnungen schlossen stets die Auslagerstrategie FIFO mit ein bzw. setzten diese voraus. Dass auf FIFO zu verzichten mögliche positive Folgen

nach sich ziehen kann, zeigt folgender Gedanke: Aufgrund von bestehender Unsicherheit stark ausgeprägte Sicherheitsbestände sind unter FIFO Teil des regulär umgeschlagenen Bestandes und tragen zu einem verschärften Konkurrieren um günstig zu bedienende Lagerbereiche bei. Ohne FIFO lassen sich Sicherheitsbestände ohne weiteres ungünstigeren Bereichen des Lagers zuweisen, da sie nur im Bedarfsfall, d.h. i.d.R. nicht regulär in Anspruch genommen werden. Hierdurch entschärft sich die Konkurrenzsituation in den günstigen Lagerbereichen: Ladeeinheiten mit hohen Zugriffshäufigkeiten erhalten leichter günstige Lagerplätze – was insgesamt zu einem höheren Durchsatz führen können sollte.

In der Praxis wird die Entscheidung für oder gegen die Anwendung von FIFO bislang i.d.R. nicht – jedenfalls nicht in erster Linie – von möglichen Vorteilen im Zusammenhang mit einer Durchsatz-maximierende Lagerordnung abhängig gemacht.

Angesichts dessen erscheint es durchaus angebracht, die Idee einer Betriebsstrategie zu verfolgen, welche FIFO nicht mit einschließt.

2 ECHTZEITANFORDERUNGEN IM LAGERBETRIEB

Der rechnergestützte Umgang mit komplexen Zusammenhängen, wie sie unsichere Prognosen darstellen, beansprucht Rechenleistung, wie sie in der Praxis nicht in beliebiger Höhe verfügbar ist. Folglich ist es notwendig, vorliegende Bedingungen im Zusammenhang mit Echtzeitanforderungen für Lagerbetriebsstrategien zu klären.

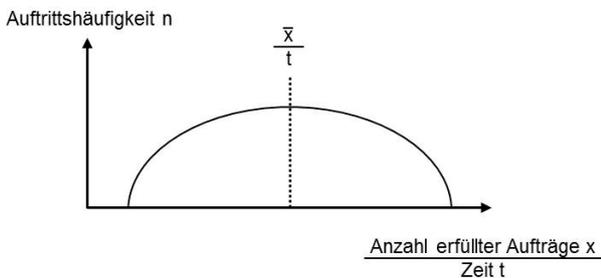


Abbildung 1. Auftrittshäufigkeiten variierender Bearbeitungsrate

Abbildung 1 „Auftrittshäufigkeiten variierender Bearbeitungsrate“ zeigt ein schematisiertes Diagramm, an dessen Abszisse der Quotient aus der Anzahl erfüllter Aufträge x und der hierfür notwendigen Zeit t aufgetragen sein soll. Die Auftrittshäufigkeit der so entstehenden Werte wird vertikal eingetragen. Je nach angewandten Betriebsstrategien, der Lagerdimensionierung und anderen Bedienzeit-relevanten Rahmenbedingungen lässt sich unter lückenlosem Auftragsaufkommen beobachten, wie mal mehr – mal weniger Aufträge pro Zeiteinheit abgearbeitet werden: die aufgewandte Zeit pro Auftrag variiert innerhalb gewisser Grenzen. Diese Beobachtung lässt sich auf alleine die Spielzeiten beziehen oder in entsprechend größerem Rahmen auf die Auftragsbearbeitungszeit ab I-

Punkt. Im Einzelfall muss die in der Abbildung eingetragene Bogenkurve, welche sich aus einer Vielzahl einzelner Beobachtungspunkte ergibt, sich nicht in genau dieser Form ergeben. Eine Senkrechte durch den Schwerpunkt der unter diesen Bogen und der Abszisse begrenzten Flächen schneidet die Abszisse in der mittleren Auftragsbearbeitungsrate \bar{x}/t .

Immer zwischen der Bearbeitung zweier aufeinanderfolgender Aufträge soll nun ein aufwendiger Algorithmus berechnet werden. Die Rechenzeit t_R sei annähernd konstant.

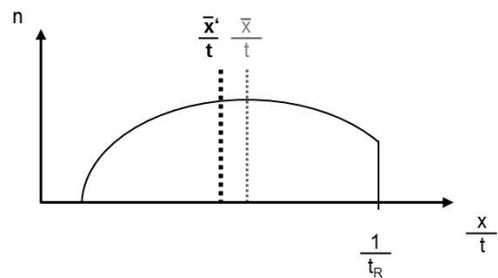


Abbildung 2. Bearbeitungsrate und Berechnungsrate

Abbildung 2 „Bearbeitungsrate und Berechnungsrate“ zeigt die begrenzend Wirkung einer entsprechenden Rechenzeit bzw. einer Berechnungsrate auf die Häufigkeitsverteilung der Bearbeitungsrate: Ursprünglich schnell ausführbare Bearbeitungsfolgen werden auf Grund der anfallenden Rechenzeit nun in größeren Zeitspannen realisiert. Es ergäbe sich eine neue mittlere Bearbeitungsrate \bar{x}'/t .

Setzt der berechnete Algorithmus eine wirksame Betriebsstrategie um, dann kommt es zu einer weiteren Veränderung der betrachteten Verhältnisse: die Auftrittshäufigkeiten der Bearbeitungsrate verändert sich. Abbildung 3 „veränderte Häufigkeitsverteilung“ zeigt, wie eine entsprechende Veränderung aussehen kann. Die auf diese Weise umgesetzte Betriebsstrategie entfaltet dann eine positive Wirkung, wenn die neue mittlere beobachtete Bearbeitungsrate \bar{x}''/t höher ist, als die ursprüngliche \bar{x}/t .

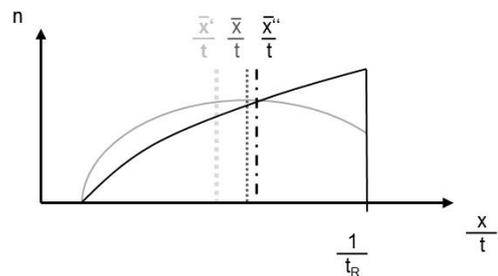


Abbildung 3. veränderte Häufigkeitsverteilung

3 MODELLIERUNG PROGNOTIZIERTER ZUGRIFFSHÄUFIGKEITEN

Je nach Anwendungsfall können die Zugriffshäufigkeiten eines Artikels einer Vielzahl unterschiedlicher inner- und außerbetrieblicher Einflüsse unterliegen. Aus der Menge möglicher Betrachtungen soll im Folgenden ein Beispiel gewählt werden, bei welchem die Zugriffshäufigkeiten in Orientierung an ein rollierend erstelltes Absatzzahlenmodell modelliert wurden, welches Zugriffe nach Ein- und Auslagerungen unterscheidet. Neben der oben erwähnten Forderung nach Abbildung von Korrelation soll das Modell außerdem folgende zwei Prämissen beachten:

- Werte, deren Realisierung in großer zeitlicher Ferne erfolgt, sollen unsicherer prognostiziert werden, als solche, deren Realisierung kurz bevorsteht.
- Mehrere in aufeinanderfolgenden Planungsperioden erstellte Prognosen ein und desselben artikelspezifischen zukünftigen Zugriffshäufigkeitswertes sollen variieren können.

Angesichts dieser Forderungen bietet sich die Modellierung in Form eines Faktorenmodells (Ang, Lim, & Sim, 2012) an:

Hierbei werden ausgehend vom realisierten Zugriffshäufigkeitswert eines Artikels in Form von Aus- oder Einlagerungen, die entsprechenden Prognosewerte schrittweise formuliert, beginnend mit dem Prognosewert für eine kurz bevorstehende Realisierung, gefolgt von dem Prognosewert für den Fall, dass die Realisierung des besagten Wertes in der Folgeperiode stattfindet, usw. Im Weiteren wird von einem Planungshorizont von 5 Perioden (0, 1, 2, 3, und 4) ausgegangen. Zur Modellierung kommen neben den Realisierungswerten „r“ auch Faktoren „d“ zum Einsatz. Es werden artikelspezifische Faktoren „d_a“ und artikelübergreifende Faktoren „d_g“ verwendet. Dabei bietet es sich an, die Faktoren als MAPE-Angaben (mean absolute percentage error) zu interpretieren.

Tabelle 1. *Faktorenübersicht*

Periode	Wert	Artikelgruppe				i	Wert
		A	B	C	D		
0	10%	d _{g0A}	d _{g0B}	d _{g0C}	d _{g0D}	d _{a0i}	25%
1	1%	d _{g1A}	d _{g1B}	d _{g1C}	d _{g1D}	d _{a1i}	1%
2	1%	d _{g2A}	d _{g2B}	d _{g2B}	d _{g2D}	d _{a2i}	2%
3	2%	d _{g3A}	d _{g3A}	d _{g3C}	d _{g3C}	d _{a3i}	2%
4	2%	d _{g4A}	d _{g4A}	d _{g4A}	d _{g4D}	d _{a4i}	3%

Artikelübergreifende Faktoren beziehen sich auf die Artikel mindestens einer der vier Artikelgruppen „A“, „B“, „C“ und „D“. „A“ umfasst 55, „B“ umfasst 20, „C“ umfasst 15 und „D“ umfasst 10 Artikel. Tabelle 1 „Faktorenübersicht“ stellt die unterschiedlichen Faktoren dar. In der mit „i“ bezeichneten Spalte stehen die artikelspezifischen Faktoren. Betrachtet werden 5 Planungsperioden 0, 1, 2, 3, 4. Periode 0 bricht zum Betrachtungszeitpunkt entweder gerade an oder bereits angebrochen. Periode 1 ist diejenige, die sich an Periode 0 anschließen wird, etc.

Formel 1 zeigt beispielhaft den Term für den sich in Periode 1 realisierenden Einlagerungswerts des Artikels Nr. 80 (Artikelgruppe „C“) ergibt. Der hierbei auftretende Prognosefehler beträgt bzgl. des Realisierungswertes bis zu +/-37%.

$$r_{E80} \pm d_{g0C}r_{E80} \pm d_{a0,80}r_{E80} \pm d_{g1C}r_{E80} \pm d_{a1,80}r_{E80} \quad \text{Formel 1}$$

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird ein artikel-spezifischer Faktor „d_a“ einer Periode sowohl auf den Prognosewert der Einlagerungen, als auch auf den der Auslagerungen des entsprechenden Artikels bezogen.

3.1 UNSICHERHEIT BZGL. REIHENFOLGE

Ein auf diese Weise erstelltes Modell liefert die mit Prognosefehlern behafteten Prognosewerte für die zukünftigen Ein- und Auslagerungen je Artikel und betrachteter Periode. Unabhängig von der Unsicherheit dieser Angaben bleiben jegliche Fragen nach der Reihenfolge des Auftrageintritts, welche insbesondere im Zusammenhang mit nicht-FIFO besondere Relevanz besitzen, durch dieses Planungs- und Prognosemodell unbeantwortet. Welche Problemstellungen sich hieraus ergeben, lässt sich zunächst anhand einer Betrachtungsbeispiels veranschaulichen.

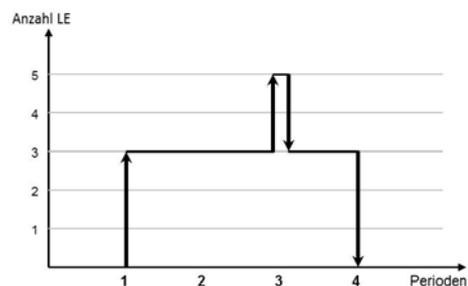


Abbildung 4. *Ein-/Auslagerfolge – Variante 1*

Abbildung 4 „Ein-/Auslagerfolge – Variante 1“ soll den Lagerbestand eines Artikels über vier Perioden darstellen. In Periode 1 werden 3 Einheiten eingelagert. In Periode 4 werden 3 Einheiten ausgelagert. In Periode 3 sollen 2 Einheiten ein- und 2 Einheiten ausgelagert werden. Die Abbildung zeigt den Fall, dass sämtliche beiden Einlagerungen in Periode 3 vor den Auslagerungen statt-

finden. Wenn FIFO nicht praktiziert werden muss, besteht die Möglichkeit, LIFO (last-in-first-out) zu verfolgen und die kurz zuvor eingelagerten Einheiten sofort wieder zu entfernen. Diesem Betrachtungsfall entsprechend ergibt sich in Periode 3 kurzzeitig eine Belegung von fünf unterschiedlichen Lagerplätzen. Drei Einheiten verbleiben 3 Perioden im Lager während zwei Einheiten weniger als eine Periode Lagerzeit verbringen.

Abbildung 5 „Ein-/Auslagerfolge – Variante 2“ zeigt hingegen den Fall, dass zuerst in Periode 3 die beiden Auslagerungen erfolgen und im Anschluss zwei Einheiten eingelagert werden. Hierbei ergeben sich für zwei der drei in Periode 1 eingelagerten Einheiten Lagerdauern von 2 Perioden. Die beiden Zugänge in Periode 3 verbleiben 1 Periode im Lager. Sie könnten, falls nötig, die Lagerplätze benutzen, die kurz zuvor durch die Auslagerungen frei geräumt wurden. In diesem Fall werden zu keinem Zeitpunkt mehr als 3 Lagerplätze beansprucht.

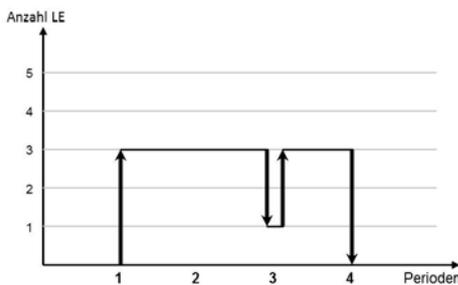


Abbildung 5. Ein-/Auslagerfolge – Variante 2

Dieses einfache Beispiel zeigt, welche Unterschiede bzgl. Verweildauer und Platzbedarf allein aus der Variation von Ein- und Auslagerungsreihenfolgen entstehen können.

Zur näheren Betrachtung der Auftretswahrscheinlichkeiten von Auftragsreihenfolgen aus Ein- und Auslageraufträgen eines Artikels empfiehlt sich die Interpretation des Eintretens einer bestimmten Reihenfolge aus aus e_p Einlageraufträgen und a_p Auslageraufträgen als Ergebnis eines Zufallsexperiments. (Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass die Wahrscheinlichkeit, mit der ein noch einzureihende Auftrag als nächster in die zu bildende Reihe aufgenommen zu wird, für alle zur Auswahl stehenden Aufträge gleich groß ist.) Ein derartiges Zufallsexperiment könnte man auch als eine Abfolge von $e_p + a_p$ Teilerperimenten auffassen – wobei das Ergebnis eines einzelnen dieser Teilerperimente Auskunft darüber gibt, ob eine bestimmte Position der Auftragsreihenfolge mit einem Ein- oder einem Auslagerauftrag belegt wird. Mit Hilfe eines gerichteten Graphen (siehe Abbildung 7 „Abbildung 7. Bayes'sches Netz für artikelspez. E-/A-Auftragsfolgen“) lassen sich sämtliche der in Frage kommenden Teilerperimente und die Abhängigkeiten zwischen ihnen darstellen:

Jeder einzelne Knoten lässt sich eindeutig mittels der beiden Koordinaten r und s identifizieren. Eine dritte eingetragene Skala steht für $t = r + s$. Hierbei steht t für die An-

zahl der erfolgten Teilerperimente, d.h. für die Anzahl belegter Reihenfolge-Positionen. Die Koordinate r gibt Auskunft darüber, wie viele Einlageraufträge sich auf diesen belegten Reihenfolge-Positionen befinden – die Koordinate s gibt die entsprechende Anzahl von Auslageraufträgen an. Gehen von einem Knoten sowohl ein mit „E“ als auch ein mit „A“ beschrifteter Pfad ab, dann kann die Belegung der folgenden Reihenfolge-Position ($t + 1$) sowohl durch einen Ein- (E) als auch durch einen Auslagerauftrag (A) erfolgen.

Einschränkungen in der Belegung von Positionen ergeben sich dann, wenn etwa sämtliche e_p Einlagerungen positioniert sind und noch nicht alle $e_p + a_p$ Positionen belegt sind. Die verbleibenden unbelegten Positionen können nur noch mit Auslageraufträgen belegt werden. Entsprechendes gilt, wenn schon alle a_p Auslageraufträge auf Positionen verteilt aber noch nicht alle $e_p + a_p$ Positionen belegt sind: Unter diesen Bedingungen können die verbleibenden Positionen mit Einlageraufträgen alleine belegt werden.

$$\frac{e_p - r}{e_p + a_p - t} \quad \text{Formel 2}$$

Die (bedingte) Wahrscheinlichkeit, dass zur Belegung der nachfolgenden Position ($t + 1$) ein Einlagerauftrag gewählt wird, ergibt sich gemäß Formel 2. Für die Auswahl eines Auslagerauftrags gibt Formel 3 die entsprechende (bedingte) Wahrscheinlichkeit an.

$$\frac{a_p - s}{e_p + a_p - t} \quad \text{Formel 3}$$

Jeder mögliche Wegverlauf zwischen dem Startknoten $t = 0$ und dem Endknoten $t = e_p + a_p$ entlang der einzelnen Pfade zwischen den einzelnen durch Knoten repräsentierten Teilmengen an Aufträgen, die jeweils die t -ersten Reihenfolge-Positionen belegen, steht für eine mögliche Auftragsreihenfolge. Ein gerichteter Graph, dessen Knoten – wie der hier vorliegende – Zufallsvariablen und dessen Pfade – wie der hier vorliegende – bedingte Wahrscheinlichkeiten wiedergibt, wird auch Bayes'sches Netz genannt.

Aus dem beschriebenen Zusammenhängen ergibt sich, dass die wahrscheinlichsten Reihenfolgen sich durch Wegeverläufe ergeben, die nahe an der durch Start- und Endpunkt bezeichneten Strecke liegen. Darüber hinaus lässt sich schließen: Falls e_p groß gegenüber a_p , ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass die ersten Aufträge der sich ergebenden Reihenfolge Einlagerungen sind und bereits im Lager vorhandene Bestände des entsprechenden Artikels unter LIFO nicht reduziert werden. Falls a_p groß gegenüber e_p , ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass die ersten Aufträge der sich ergebenden Reihenfolge Auslagerungen sind und bereits vorhandene Bestände unter LIFO tatsächlich reduziert werden.

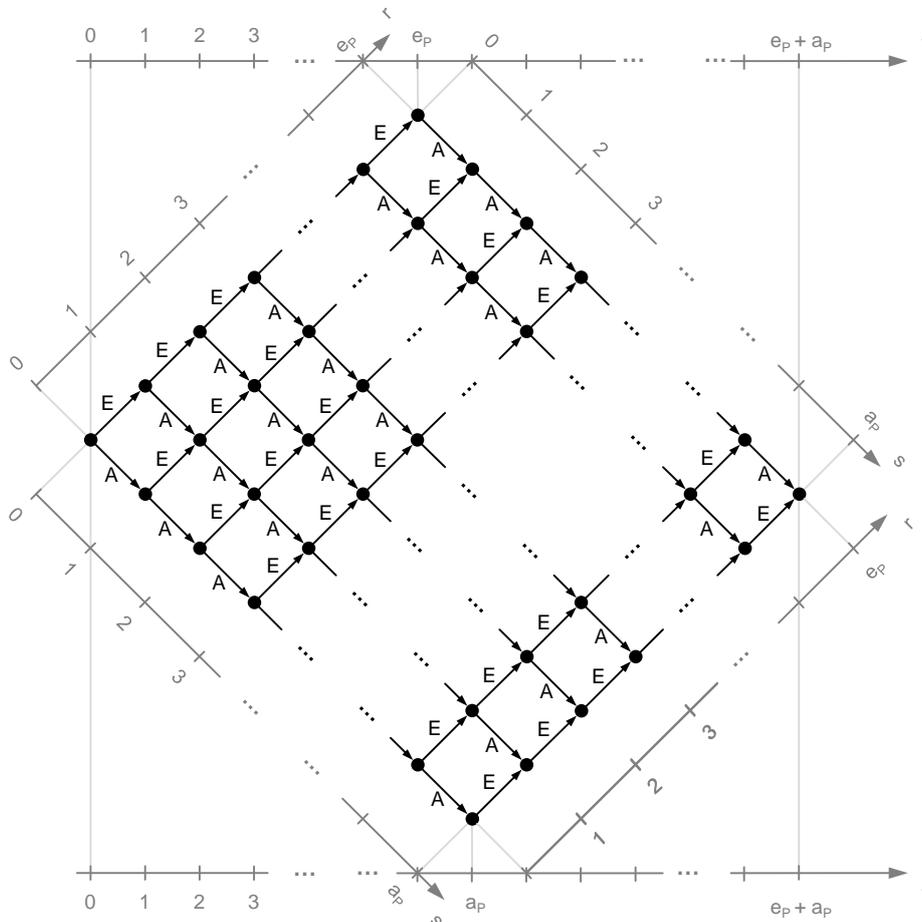


Abbildung 6. Bayes'sches Netz für artikelspez. E-/A-Auftragsfolgen

geordnet werden muss. Durch diese Aufteilung wird eine Verletzung von Echtzeitanforderungen (s.o.) vollständig vermieden. Ausgelagert wird stets nach der KFZ-Regel (kürzeste Fahrzeit).

4 LAGERORDNUNG AUF BASIS VON ZUGRIFFSPROGNOSEN PRO PERIODE

Auf Basis des oben beschriebenen Prognosen-Modells soll eine Betriebsstrategie beschrieben werden, die dazu geeignet ist, im Betrieb eine Lagerordnung herbeizuführen, welche im Zusammenhang mit eingehenden Ein- und Auslageraufträgen einen hohen Durchsatz ermöglicht. Der entsprechende Algorithmus besteht aus zwei Teilen: einem *Planungsalgorithmus* und einem operativen *Zuordnungsalgorithmus*, welcher auf die Ergebnisse des Planungsalgorithmus zurückgreift. Der Planungsalgorithmus wird immer kurz vor Anbruch/zu Beginn einer neuen Planungsperiode eingesetzt. Der Zuordnungsalgorithmus kommt jedes Mal zum Einsatz, wenn ein Einlagerauftrag einem freien Lagerbereich zu-

Im Folgenden wird mit „rB“ der sog. realisierte Bestand bezeichnet. Gemeint ist damit der Bestand eines Artikels der sich tatsächlich zum Zeitpunkt der Betrachtung im Lager befindet. Durch die Realisierung einzelner Lageraufträge erfährt dieser Bestand nach und nach Veränderungen. Der Planungsalgorithmus führt auf Grundlage der „rB“ sämtlicher Artikel zum Zeitpunkt der Planungsdurchführung die Einplanung prognostizierter Lageraufträge durch.

4.1 PLANUNGsalGORITHMUS: EINPLANUNGsvORGEHEN

In einem ersten Schritt bildet der Planungsalgorithmus aus den zum Planungszeitpunkt vorliegenden Prognosewerten Salden eines Artikels der Form: Einlageraufträge minus Auslageraufträge. Abbildung 7 „Auftragssalden zu Planelementen 1“ zeigt in Spalte 2 ein beispielhaftes Ergebnis dieser Saldenbildung. Wir dargestellt, weist der realisierte Bestand „rB“ zum Planungszeitpunkt 20 Ladeeinheiten des fraglichen Artikels auf. In Periode „p0“ wird möglicherweise sowohl ein- als auch ausgelagert – insgesamt besagen die Prognosewerte, dass aber 100 Einheiten mehr ein- als ausgelagert werden.

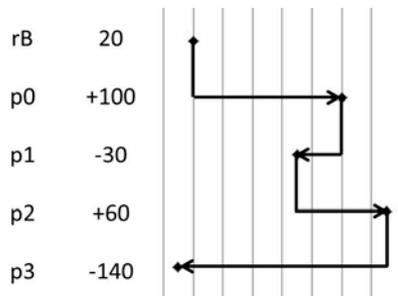


Abbildung 7. Auftragssalden zu Planelementen 1

Abbildung 8 „Auftragssalden zu Planelementen 2“ stellt den nächsten Berechnungsschritt des Planungsalgorithmus dar. Auf Grundlage der ermittelten Salden werden unter Anwendung von LIFO sog. Planelemente ermittelt. (LIFO wird allerdings im weiteren Verlauf nicht in durchgängig strenger Ausprägungsform angewandt. Vielmehr handelt es sich um ‚schwaches‘ LIFO.) Bei Planelementen handelt es sich um zwei Größenarten: bzgl. erfolgreicher Einlagerungen beschreiben Planelemente in welcher Periode wie viele Einheiten für welchen Zeitraum eingelagert werden; bzgl. innerhalb des Betrachtungshorizontes erfolgreicher Reduktionen des „rB“ geben entsprechende Planelemente an, in welcher Periode eine Reduktion in welcher Höhe erfolgt. Abbildung 8 zeigt wie am gewählten Beispiel, dass in Periode 0 30 Einheiten mit VWD (Verweildauer) 1 („p0E1“) und 70 Einheiten mit VWD 3 („p0E3“) eingelagert werden. In Periode 2 sind es 30 Einheiten mit VWD 1 („p2E1“). In Periode 3 kommt es zu einer Reduktion des „rB“ um 10 Einheiten („p3A“).

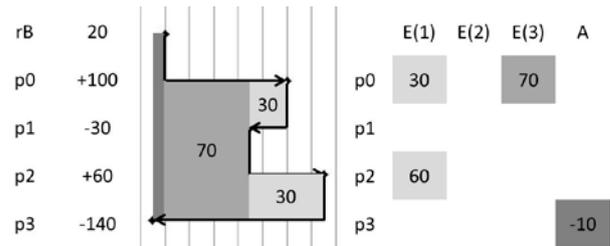


Abbildung 8. Auftragssalden zu Planelementen 2

Im Folgenden Schritt werden die für jeden Artikel auf Basis der vorliegenden Prognosewerte und des realisierten Bestands ermittelten Planelemente eingeplant. Hierbei stellt sich die Frage, in welcher Reihenfolge dies geschehen sollte. Um das Ausmaß abzubildender Komplexität nicht überhand nehmen zu lassen, werden für jede Periode (siehe Abbildung 9 „Ein-/Auslagerungstermine pro Periode“) zwei Ein- („ET1“, „ET2“) und ein Auslagerungstermin („AT“) bestimmt. Erfolgende Einlagerungen werden zu einer Hälfte für „ET1“ eingeplant, und anderen Hälfte für „ET2“.

Abbildung 9 stellt einen kleinen Ausschnitt der unten folgenden Planansicht dar. In Richtung der Abszisse werden aufsteigend die Perioden angetragen, zu denen zum Zeitpunkt der Planung Prognosewerte vorliegen. In positiver Richtung der Ordinate werden die Planelemente bzgl. Einlagerungen angetragen. In negativer Richtung der Ordinate werden die Planelemente eingetragenen, die „rB“ reduzieren.

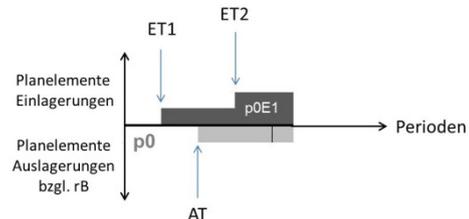


Abbildung 9. Ein-/Auslagerungstermine pro Periode

Aus Abbildung 10 "Vorgehen zur Einplanung der Planelemente" lässt sich die Folge der vorzunehmenden Einplanung ableiten. Die hierbei gewählten Prinzipien lauten:

- Planungselemente in Reihenfolge der Periode, in der sie wirksam werden, einplanen.
- Planungselemente mit kürzerer VWD vor Planungselementen mit längerer VWD einplanen.

Letzteres Prinzip klärt den Beginn der Einplanung bei Planelement „p0E1“. Die folgenden Planelemente mit Einlagerungen lauten „p1E1“, „p2E1“, „p3E1“, „p0E2“, etc. Bei den Einplanungen der Planelemente bzgl. Einlagerung zu beachten sind allerdings, die perioden- und einlagertermin-spezifisch vorliegenden Ausprägungen des realisierten Bestands. Die Einplanung der ersten Hälfte der „p1E1“-Einlagerung beispielsweise erfolgt unter Ausschluss der Lagerplätze, die von „p0E1“ belegt wurden, gleichzeitig stehen allerdings jene Lagerplätze zur Verfügung, die in Folge „p0A2“ frei geräumt wurden.

Die zweite Hälfte der „p1E1“-Einlagerungen wird eingeplant unter der Annahme, dass sämtliche der „p0E1“-Einheiten sowie diejenigen von „p1A“ betroffenen Einheiten bereits ausgelagert wurden.

Genaugenommen wird das zweite der oben genannten Prinzipien an einer Stelle des Vorgehens verletzt: Das Planelement „p1E4+“ umfasst Einheiten mit einer VWD von 4 oder mehr. Es umfasst somit möglicherweise Einheiten mit einer längeren VWD als das Planelement „p0E5+“ bezeichnet. Diese Verletzung ist dem begrenzten Prognosehorizont geschuldet: ein Planelement „p1E4“ lässt sich anhand der Prognosewerte für vier Perioden nicht bilden. Somit müssen die Einheiten, die in Periode 0 mit einer VWD von 5 eingelagert werden, Einheiten, die in Periode 1 eingelagert werden und deren VWD möglicherweise ebenfalls 5 beträgt bei der Einplanung den Vorrang gewähren.

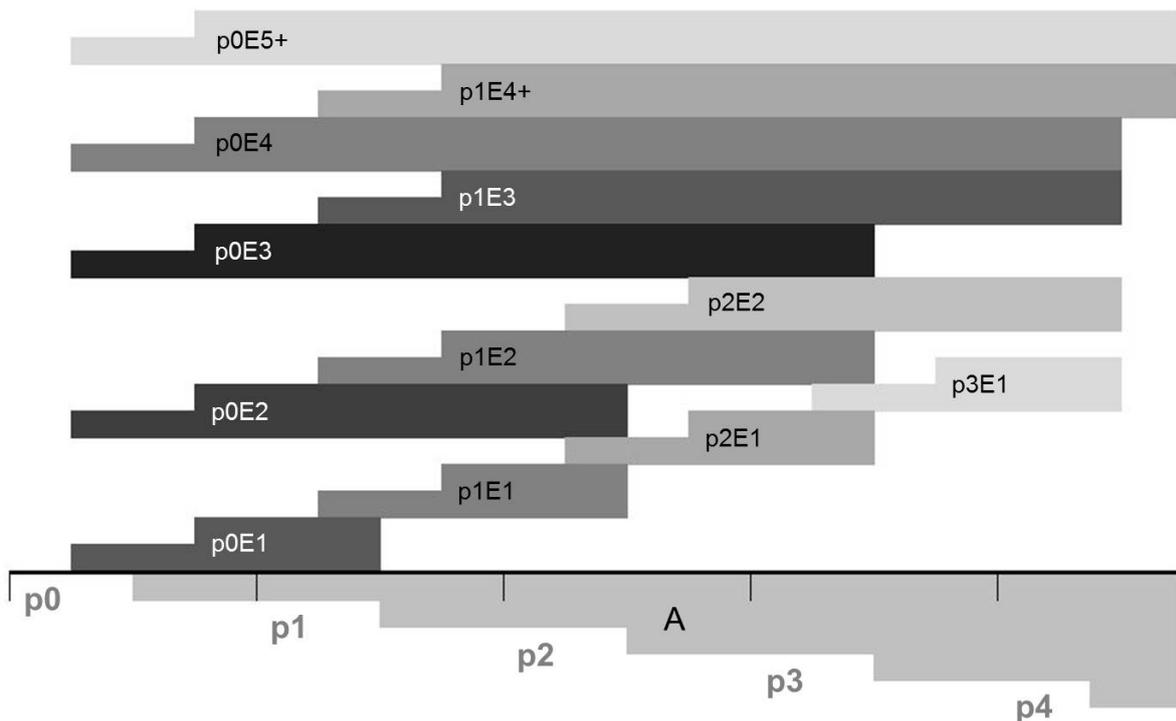


Abbildung 10. Vorgehen zur Einplanung der Planelemente

Der Planungsalgorithmus belegt im oben beschriebenen Vorgehen festgelegte Lagerbereiche begrenzter Kapazität. Bei einem Lagerbereich handelt es sich um eine bestimmte Menge von Lagerplätzen, welche in Einzelspielen zu bedienen, für jeden Lagerplatz dieselbe Zeit benötigt. (Ein Lagerbereich setzt sich aus den durch eine Isochrone bestimmten Lagerplätzen zusammen.)

4.2 ZUORDNUNGSGALGORITHMUS

Der Zuordnungsalgorithmus weist jedem auszuführenden Einlagerauftrag entsprechend den erfolgten Planungen einen Lagerbereich zu. Hierzu verwendet er in erster Linie sämtliche Einplanungen, die die Lagerbelegung zum Zeitpunkt des zweiten Einlagertermins von Periode 0 wiedergeben. Konkret sucht er die Lagerbereiche in der Reihenfolge der für sie jeweils anfallenden Einzelspielzeiten (beginnend beim günstigsten) nach dem ersten für den entsprechenden Artikel reservierten und tatsächlich noch freien Lagerplatz und ordnet dem vorliegenden Einlagerauftrag den entsprechenden Lagerbereich zu. Wird er bei dieser Suche nicht fündig, weil sämtliche artikelspezifischen Reservierung bereits belegt sind, setzt ein ‚workaround‘ ein:

Zunächst wird die VWD der vorliegenden Einheit abgeschätzt. Vereinfachend wird hierbei angenommen, dass die Erfüllung einer der folgenden zwei Bedingungen zu einer Beendigung der Verweildauer der Einheit führen wird: Entweder es wird mit einer Reduktion des realisierten Bestand in einer der betrachteten Perioden gerechnet (z.B. in Periode 2 in Form eines Planelements „p2A“) oder das einlagernde Planelement einer Folgeperiode ist um mindestens einer gewissen Einheitenmenge kleiner als das einlagernde Planelement desselben Artikels der Vorgängerperiode. Die Zahl, welche der Nummer des Lagerbereichs entspricht, der zum Zeitpunkt des zweiten Einlagertermins von Periode 0 den ungünstigen aller belegten Lagerplätze umfasst, wird durch die geschätzte VWD geteilt und ggf. gerundet. Das Ergebnis stellt den Lagerbereich dar, in dem bzw. von dem aus in Schritten in den benachbarten sowohl günstigeren als auch ungünstigeren Lagerbereichen nach dem ersten freien Lagerplatz gesucht wird. Der Lagerbereich dieses freien Lagerplatzes wird dem wartenden Einlagerauftrag zugeordnet.

5 SIMULATION

Am Beispiel des Modells eines 5-gassigen Hochregallagers soll im Folgenden die oben beschriebene Betriebsstrategie getestet werden. Hierzu wird das beschriebene Modell von Prognosewerten, die Betriebsstrategie sowie zwei weitere Vergleichsstrategien in MS Excel 2010 (VBA) implementiert.

Zur konkreten Formulierung der Realisierungswerte für Ein- und Auslageraufträge pro Artikel und Periode ist festzustellen, dass die vorliegenden Betrachtungen sich im Wesentlichen auf Fragen des Durchsatzes richten und nicht auf Fragen der Bestandsführung, der richtigen Bestell- oder Nachschubpolitik. Die Formeln 4, 5 und 6 geben an, wie die Realisationen der Ein- und Auslagerungsauftragsmengen im Simulationsmodell definiert sind.

$$E_1 = 100 + X_1 \quad \text{Formel 4}$$

$$E_t = \begin{cases} 200 - E_{t-1} + A_{t-1} + X; & \text{wenn } E_{t-1} - A_{t-1} < 200 \\ 0; & \text{sonst} \end{cases}$$

mit $X_1 \in \Omega\{1; 2; \dots; 400\}$ gleichverteilt Formel 5

$$A_t = \frac{E_{t-1} + A_{t-1} + E_t}{2} + X_2$$

mit $X_2 \in \Omega\left\{1; 2; \dots; \left\lceil \frac{E_{t-1} + A_{t-1} + E_t}{2} \right\rceil\right\}$ gleichverteilt Formel 6

Auf Grundlage der sich ergebenden Prognosewerte wurde die oben im Zusammenhang mit dem workaround erwähnte gewisse Einheitenmenge, um die ein einlagerndes Folge-Planelement zur Begrenzung der geschätzten VWD kleiner als Vorgänger sein muss, auf 70 festgelegt.

Im einem Simulationslauf wird das betrachtete Lager mit 5 Gassen à 2 Regalen und je Regal mit 100 x 20 Lagerplätzen zunächst in der ersten Periode befüllt. Anschließend schwankt der Gesamtbestand im Lager um einen Wert, welcher leicht über der Hälfte der Lagerkapazität in Höhe von 20000 Lagerplätzen liegt. Die Regalbediengeräte lagern ausschließlich in Form von Einzelspielen ein und aus.

Tabelle 2 „RBG-Kennwerte“ listet relevante kinematische Kenngrößen der modellierten Regalbediengeräte (RBG). Auf deren Grundlage pro Regalwand 119 Isochrome unterschieden werden.

Tabelle 2. RBG-Kennwerte

v_x [m/s]	4,0
a_x [m/s ²]	0,75
v_y [m/s]	1,5
a_y [m/s ²]	0,75
t_0 [s]	0,7
t_{Trsf} [s]	6,92

Als eine der beiden betrachteten Vergleichsstrategien wird die Betriebsstrategie „glv“ implementiert. Sie sieht vor, einem Einlagerauftrag einen gleichverteilt-zufällig ermittelten Lagerbereich zuzuweisen. Weist der ermittelte Lagerbereich keine freien Lagerplätze auf, wird schrittweise in den benachbarten abwechselnd in den günstigeren und ungünstigeren Lagerbereichen nach dem nächsten freien Lagerplatz gesucht. Auslagerungen werden nach der KFZ-Strategie abgewickelt.

Die Betriebsstrategie „aru“ ermittelt kurz vor Ablauf einer neuen Periode die prognostizierten Umsätze pro Artikel über den gesamten Planungshorizont. Hierfür werden schlichtweg die prognostizierten Ein- und Auslagerwerte aufaddiert. Aus sämtlichen Artikelumsätzen werden das arithmetische Mittel und die mittlere absolute Abwei-

chung gebildet. Sämtlichen Einlageraufträge eines Artikels mit einem prognostizierten Gesamtumsatz größer /gleich dem arithmetischen Umsatzmittel wird der Lagerbereich 94 zugewiesen (Lagerbereich 94 ist der günstigste der ungünstigsten 25% aller Lagerbereiche). Einlageraufträge eines Artikels mit einem prognostizierten Gesamtumsatz kleiner als das arithmetische Mittel aber gleichzeitig größer als die mittlere absolute Abweichung werden dem Lagerbereich 60 zugewiesen (alle übrigen Lagerbereiche bilden zwei etwa gleichgroße Gruppen wovon sämtliche Mitglieder der einen günstiger, sämtliche Mitglieder der anderen Gruppe ungünstiger liegen). Einlageraufträge eines Artikels mit einem prognostizierten Gesamtumsatz kleiner oder gleich der mittleren absoluten Abweichung werden dem Lagerbereich 33 zugewiesen (Lagerbereich 33 ist der ungünstigste der günstigsten 25% aller Lagerbereiche). Weist der zugewiesene Lagerbereich keine freien Lagerplätze auf, wird schrittweise in den benachbarten abwechselnd in den günstigeren und ungünstigeren Lagerbereichen nach dem nächsten freien Lagerplatz gesucht. Auslagerungen werden nach der KFZ-Strategie abgewickelt.

Für jede sich vollziehende Periode wird auf Basis der Auftrag-Realisationen eine durchgehende Reihe von Ein- und Auslageraufträgen gebildet. Hierbei einzuhalten- de Rahmenbedingungen sind: Zu keinem Zeitpunkt kann ein Artikelbestand unter 0 sinken – und: der Gesamtbestand sämtlicher Artikel muss stets kleiner oder gleich der Lagerkapazität sein. Es wird davon ausgegangen, dass die Wahrscheinlichkeit, mit der ein noch einzureihende Auftrag als nächster in die zu bildende Reihe aufgenommen wird, für alle zur Auswahl stehenden Aufträge gleich groß ist.

Die ermittelten Auftragsfolgen werden von der jeweiligen Betriebsstrategie umgesetzt, d.h. Ein- und Auslagerungen verändern die vorhandenen Artikelbestände. Jeder Auftrag wird im Rahmen eines entsprechenden Einzelspiels ausgeführt. Zur Charakterisierung eines jeden erfolgten Einzelspiels dient die Angabe des Lagerbereichs, den es zum Ziel hatte. Dieser wird durch die zum Einsatz kommende Betriebsstrategie bestimmt. Zur Bestimmung der tatsächlich verstreichenden Zeiten wird die Zuweisung eines jeden Auftrags an ein Regalbediengerät berücksichtigt. In der Regel versucht die Steuerung, den jeweils vorliegenden Auftrag demjenigen Regalbediengerät zuzuweisen, das bislang die geringste Gesamtbetriebszeit aufweist. Vollständig befüllte Lagerbereiche einzelner Gassen im Fall von Einlageraufträgen und nur in einzelnen Gassen vorrätige Einheiten eines Artikels können jedoch dazu führen, dass einem RBG der Auftrag zugewiesen wird, welches nicht die minimale Gesamtbetriebszeit aufweist. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass sämtliche übrigen RBG frühestens zum Zeitpunkt des Spielbeginns des eben zugewiesenen Auftrags erneut zum Einsatz kommen. Ihre Gesamtbetriebszeit wird dementsprechend angehoben. Am Ende eines Simulationslaufs wird das arithmetische Mittel der Gesamtbetriebszeiten der fünf

RBG gebildet und durch die genaue Anzahl der in den durchlaufenen Perioden erfüllten Lageraufträge geteilt. Es werden 7 Läufe mit je 32 Perioden durchgeführt. (Pro Periode werden ca. 60000 Aufträge verarbeitet.) Tabelle 3 „Simulationsergebnisse“ stellt die ermittelten Werte in Form von (gemittelten) Durchsätzen „D“ in der Einheit [1/h] dar. Bei der Betriebsstrategie „opt“ handelt es sich um die oben entwickelte Strategie aus Einplanungs- und Zuordnungsalgorithmus.

Tabelle 3. *Simulationsergebnisse*

Betriebsstrategie	D	Vertrauensbereich 95%	
		o. Gr.	u. Gr.
opt	356,742	365,519	348,377
glv	202,805	203,169	202,441
aru	176,304	177,165	175,450

5.1 INTERPRETATION DER SIMULATIONSERGEBNISSE

Relativ starke Schwankungen der Auftragsdaten eines Artikels von einer Periode auf die nächste verhelpfen der Betriebsstrategie „opt“ zu ihrem guten Ergebnis.

Da im Grunde keine Unterschiede in den möglichen Ausprägungsgrenzen der Auftragsdaten unterschiedlicher Artikel bestehen und sich vorübergehende Unterschiede von einer Periode auf die nächste ändern können, ergibt sich für „aru“ ein niedriger Ergebniswert.

Dass der gemittelte Durchsatz für „aru“ sogar noch kleiner ausfällt als für „glv“ lässt sich wie folgt erklären:

Im Fall von „aru“ startet die Suche nach einem freien Lagerplatz immer an einem von drei festgelegten Lagerbereichen. Diese Lagerbereiche und ihre Nachbarbereiche werden schnell gefüllt. Folgende Suchen finden zwar weiterhin freie Lagerplätze und nehmen entsprechende Zuweisungen vor, relativ wahrscheinlich ist es allerdings, dass diese freien Lagerplätze in bereits gut gefüllten Lagerbereichen liegen. Die Entscheidung, in welche Gasse eingelagert werden kann, ist demnach i.d.R. eingeschränkt. In der Folge entstehend entsprechend häufig Wartezeiten für untätige Regalbediengeräte.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ausgehend vom bisherigen Stand der Forschung bzgl. Betriebsstrategien zur Erzeugung Durchsatzmaximierender Lagerordnungen ließen sich relevante Aspekte identifizieren, denen bislang nicht in angemessener Weise Aufmerksamkeit gezollt wurde. Bei diesen in der Folge thematisierten Aspekten handelt es sich um Echtzeitanforderungen im Lagerbetrieb, Korrelationsabbildende Prognosewertmodelle und das Problem ungewisser Auftragsfolgen. Ausführungen zur Funktions-

weise einer neuen, auf schwachem LIFO basierenden Betriebsstrategie wurden durch einen ergänzenden Vergleichstest in Form eines Simulationsexperiments ergänzt, welcher die Ergebnisse der neuen Strategie denen einer gleichverteilt-zufälligen Einlagerung und denen der Einlagerung mit Orientierung auf artikelweise Umsätze über den gesamten Planungshorizont gegenüberstellt.

Festzustellen ist in diesem Zusammenhang, dass die Algorithmen der neu entwickelten Betriebsstrategie an vielen Stellen vereinfachende Annahmen darstellen. Diese Vereinfachungen ließen sich in zukünftigen Überarbeitungen des Algorithmus durch genauere, aufwendigere Berechnungsvorschriften ersetzen – wodurch einerseits zwar weitere Ergebnisverbesserungen erzielt werden können sollte, andererseits die Komplexität des Algorithmus deutlich ansteigen würde. Ein mit relativ geringem Aufwand umsetzbarer Ansatz zur Weiterentwicklung des vorliegenden Strategiekonzepts bestünde darin, den Planungsalgorithmus häufiger in der jeweils laufenden Periode zu durchlaufen, um somit die Basis für Zuordnungen in insgesamt aktuellerer Form bereit zu stellen.

Neben der zu Grunde liegenden allgemeinen Prognose-Unsicherheit ist zu erwarten, dass die Effektivität der vorgestellten Strategie dann hoch ist, wenn der Unterschied zwischen Ein- und Auslagerauftragsmengen eines Artikels pro Periode stark ausgeprägt vorliegt. Wohingegen dann die Effektivität niedrig ausfallen sollte, wenn der entsprechende Unterschied gering ausfällt.

Ein sinnvolles größeres Ziel der zukünftigen Entwicklung von Lagerbetriebsstrategien könnte die Erarbeitung eines Instrumentariums statistischer Methoden zur Analyse von Prognosedaten – verbunden mit Regeln, mit deren Hilfe sich die ermittelten Ergebnisse in abgestimmte Betriebsstrategien und Lager-Steuerungskonzepte überführen ließen – sein.

LITERATURVERZEICHNIS

- Ang, M., Lim, Y., & Sim, M. (November 2012). Robust Storage Assignment in Unit-Load Warehouses. *Management Science*, Vol. 58, S. 2114-2130.
- Glass, M. (2008). *Schnellläuferstrategien in Lagern und Dynamische Zonierung*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Fakultät für Maschinenwesen.
- Piepenburg, A., Piepenburg, B., & Bruns, R. (2014). Das prognosebasierte Reservierungsverfahren - ein Ansatz zur Reduzierung der mittleren Fahrzeit in einer Regalfläche. In W. Günthner, & WGTL (Hrsg.), *Tagungsband zum 10. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL) am 8.+9. Oktober 2014* (S. S. 57-69). Garching: fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München.
- Schumann, M. (2008). *Zur Bestimmung der Umschlagleistung von Hochregallagern unter besonderer Berücksichtigung der Lagerorganisation*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau.

Dipl.-Ing. Christian Wildner, M.A.,

Member of Research Staff at the Department Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Ilmenau University of Technology.

Address:

Department Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Ilmenau University of Technology, PO Box 10 05 65, 98684 Ilmenau, Germany,
Phone: +49 3677 69 3846, Fax: +49 3677 69-3840,
E-Mail: Christian.Wildner@TU-Ilmenau.de