

Energieeffiziente Lagerplatzordnung in Hochregallagern

Energy efficient storage location assignment in automated storage and retrieval systems (AS/RS)

Tobias Sommer
Karl-Heinz Wehking

*Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT)
Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
Universität Stuttgart*

Im Beitrag wird eine Strategie zur Lagerplatzzuordnung präsentiert und bewertet, die die Energieeffizienz automatischer Hochregallager verbessert: Die Lagerstrategie ermöglicht es, dass der mittlere Energiebedarf von Ein- und Auslagerungen gesenkt werden kann, ohne dass dafür eine ungewünschte Verminderung des Umschlags in Kauf genommen werden muss. Die Lagerstrategie wird in Simulationsexperimenten mit etablierten Strategien zur Lagerplatzzuordnung verglichen.

[Schlüsselwörter: automatische Hochregallager, Lagerstrategien, Lagerplatzzuordnung, Energieeffizienz]

This article aims to present an energy efficient storage location assignment policy for automated storage and retrieval systems (AS/RS). This policy provides significantly lower energy consumption while maintaining AS/RS throughput requirements. A simulation study is executed in order to compare the energy efficient storage policies with state of the art policies.

[Keywords: AS/RS, storage policies, storage location assignment, energy efficiency]

1 EINLEITUNG

Die in einem automatischen Hochregallager (aHRL) eingesetzten Lager- und Fördermittel, verbunden mit der notwendigen Automatisierungstechnik, führen zu einem hohen Investitionsaufwand, der durch die langfristige Wirtschaftlichkeit des Lagersystems gerechtfertigt werden muss. Veränderte energiepolitische Rahmenbedingungen, wie der weltweit steigende Energiebedarf, die zunehmende Erschöpfung fossiler Primärenergieträger, verschärfte politische Restriktionen und steigende Energiepreise, wirken als Treiber für eine Verbesserung der Energieeffizienz industrieller Systeme und Anlagen [Bol08]. AHRL müssen hinsichtlich ihrer Energieeffizienz optimiert werden, um weiterhin eine wirtschaftliche Systemlösung darzustellen. Bisherige Strategien zur Lagerplatzzuordnung (LP-Zuordnung), die eine Senkung

des Energiebedarfs von aHRL anstreben [z. B. MM11] führen nur zu geringen Energieeinsparungen und reduziertem Umschlag im Vergleich zu umschlagsoptimierenden Strategien. Es fehlen somit geeignete Strategien zur LP-Zuordnung, die die Energieeffizienz von aHRL im Vergleich zu bekannten Strategien verbessern.

Dieser Beitrag ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 werden das aHRL vorgestellt, relevante Begriffe eingeführt und Stellhebel zur Steigerung der Energieeffizienz im aHRL diskutiert. In Kapitel 3 erfolgt eine Beschreibung des Stands der Forschung im Bereich von Strategien zur LP-Zuordnung in aHRL. In Kapitel 4 wird ein Simulationsmodell zur Bewertung der Energieeffizienz von Lagerstrategien vorgestellt und auf bestehende Strategien angewendet. Anschließend erfolgt die Darstellung der neu entwickelten, explizit energieeffizienten Strategie zur LP-Zuordnung, deren Spielzeiten und Energiebedarfe mit bestehenden Strategien verglichen werden.

2 GRUNDLAGEN

Ein Artikel ist die durch Nummer und Bezeichnung unterscheidbare, kleinste Einheit des Sortiments [Gla08]. Eine Ladeinheit (LE) ist eine Ladung, die „als Einheit gehandhabt, transportiert, gestapelt und gelagert werden kann“ [DIN05]. Die Verweildauer gibt im Folgenden die Zeitspanne vom Eintreffen der LE am Identifikationspunkt der Lagervorzone bis zum geplanten Auslagerungstermin wieder. Tabelle 1 illustriert diese Zusammenhänge exemplarisch.

LE	Eingangszeitpunkt	Ausgangszeitpunkt	Verweildauer
1	1	2	1
2	3	7	4
3	5	7	2

Tabelle 1. *Beispiel zur Verweildauer von LE*

Die durchschnittliche Verweildauer eines Artikels ist dabei nicht unbedingt gleichbedeutend mit der Verweildauer einer LE des Artikels: Die Unterschiede resultieren aus der zeitlichen Verteilung der Zu- und Abgänge der LE eines Artikels. Die Verweildauer der LE und die Auslastung der LP stellen nach [PB11] zentrale Einflussgrößen auf die Systemleistung dar. Zur Verweildauerprognose siehe [Gla08].

Nach Wannewetsch umfasst ein Lagersystem „die Gesamtheit der zur Ausführung der Lagerfunktionen eingesetzten Fördermittel einschließlich der Lagertechnik und Informationsmittel“ [Wan10]. Im Rahmen dieser Arbeit werden aHRL betrachtet, die aus automatischen Regalbediengeräten (RBG) und Hochregalen zur Lagerung palettierter Ware bestehen (siehe Abbildung 1). Die Schnittstellen zur Lagervorzone bilden die Übergabepunkte (ÜP) für Ein- (EP) und Auslagerungen (AP).

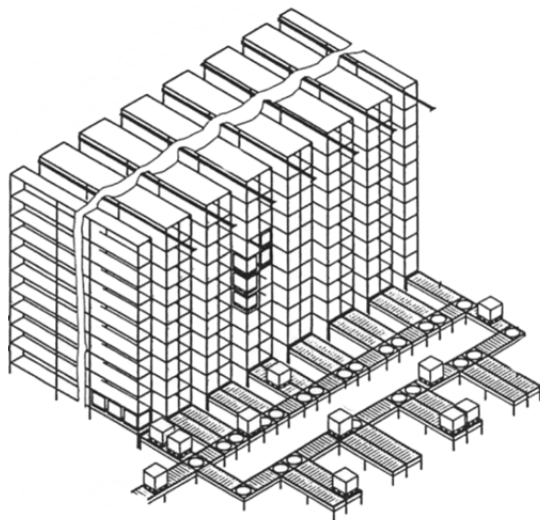


Abbildung 1. aHRL nach [Jün89]

Abbildung 2 illustriert die wesentlichen Bestandteile eines RBG: Die horizontale Bewegung (x-Richtung) wird durch Fahrtrieb realisiert, der den Mast entlang der oberen Führungs- und der unteren Fahrschiene bewegt. Die vertikale Bewegung des Hubwagens (y-Richtung) wird durch das Hubwerk ermöglicht. Die Aufnahme und Abgabe der LE (z-Richtung) erfolgt durch das Lastaufnahmemittel (LAM) am Hubwagen.

RBG werden vorzugsweise durch Asynchronmotoren angetrieben. Als Fahrtrieb werden meist Kurzschlussläufermotoren eingesetzt, wohingegen beim Hubwerk Schleifringläufer Verwendung finden. Die Stromzuführung lässt sich sowohl über Schleifleitungen, bewegliche Kabel (Schleppkabel, Kabeltrommel) und mitgeführte Akkumulatoren als auch über berührungslose Energieübertragung realisieren, wobei beim Fahrtrieb eines RBG vorzugsweise Draht- oder Schienenschleifleitungen zum Einsatz kommen. Die Fahrbewegung eines RBG wird durch angetriebene Räder realisiert, die in Kontakt

mit den Fahrschienen Kraft übertragen. Die Räder sind dabei aus Stahlguss mit zylindrischer, balliger oder konischer Lauffläche ausgeführt und, je nach Führungsaufgabe und Schienenprofil, mit zweiseitigem, einseitigem oder ohne Spurkranz versehen. Der Fahrwiderstand für den Vollbeharrungszustand lässt sich aus der Zapfenreibung, dem Rollwiderstand, der Spurkranzreibung, der Nabenstirnflächenreibung und dem Widerstand seitlich angebrachter Führungsrollen ermitteln [FEM97, Mar09].

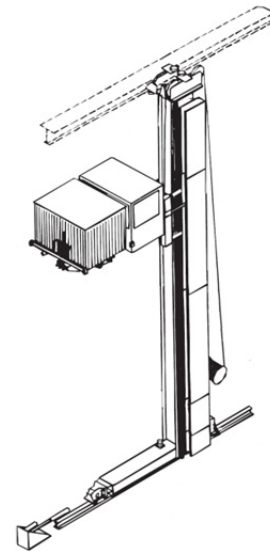


Abbildung 2. RBG nach [AF07]

3 UMSCHLAG UND ENERGIEEFFIZIENZ IN AUTOMATISCHEN HOCHREGALLAGERN

Der Begriff Effizienz verknüpft einen erzielten Nutzen bzw. einen Zielertrag mit einem dazu notwendigen Aufwand zu einer relativen Bewertungszahl [CKH07].

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Zielertrag}}{\text{erforderliche Mittel zur Zielerreichung}}$$

Zur Maximierung der Effizienz sind, ausgehend vom ökonomischen Prinzip, im Wesentlichen drei Herangehensweisen denkbar: Gemäß dem Maximum-Prinzip kann ein definierter Mitteleinsatz angesetzt werden, mit dem ein möglichst hoher Zielertrag generiert werden soll. Die zweite Möglichkeit ist die Anwendung des Minimum-Prinzips, wonach ein definierter Nutzen bzw. Zielertrag mit möglichst geringem Mitteleinsatz erreicht werden soll. Als dritte Variante wird das Maximin-Prinzip postuliert, wonach mit einem möglichst geringen Aufwand ein möglichst hoher Nutzen erzielt werden soll [CKH07]. Zur Beurteilung der Effizienz eines Vorgangs kann eine Gegenüberstellung seiner eingehenden und ausgehenden Flüsse erfolgen, die sich durch die Kategorien Stoff, Energie und Information beschreiben lassen. Soll die Effizienz einer Lagerung beurteilt werden, so sind dementsprechend alle Eingaben in Form von Materialien, Ener-

gien und Informationen vor und nach der Lagerung zu vergleichen. Unter Stoffen lassen sich hier die eingesetzten Betriebsmittel, d. h. Lager-, Fördermittel, Ersatzteile und Betriebsstoffe subsumieren. Zum Energiebedarf des aHRL zählen die benötigte elektrische, Heizungs-/ Kühl-, Lüftungs- und Beleuchtungsenergie. Diesen Eingangsgrößen stehen Ausgangsgrößen in Form von Abwärme, Lärm, Schwingungen sowie innere Energie von Körpern gegenüber. Der Informationsfluss beinhaltet Informationen zu den eingehenden Material- und Energieflüssen.

Der Umschlag beschreibt die „Anzahl der Ein- und/ oder Auslagerungen von Ladeeinheiten pro Zeiteinheit“ eines Lagersystems [VDI03] und wird durch eine hohe Verfügbarkeit der Elemente des aHRL und kurze Spielzeiten positiv beeinflusst [FEM81]. Die Spielzeit wird im Wesentlichen von der Artikelstruktur, der Struktur der Ein-/ Auslagerungsaufträge, der physischen Gestaltung der Lager- und Fördermittel, der informationstechnischen Ausrüstung und den Lagerstrategien bestimmt [Gud10]. Die mittlere Spielzeit in aHRL lässt sich statisch sowie dynamisch ermitteln. Statische Berechnungsvorschriften legen ein bestimmtes Arbeitsspiel mit definierten Anfahrpunkten zu Grunde. Dynamische Ansätze zur Spielzeitberechnung basieren auf Simulationsmodellen, mit denen eine definierte Anzahl an Arbeitsspielen simuliert wird. Aus den Simulationsergebnissen lassen sich anschließend Mittelwerte für die Dauer von Arbeitsspielen bilden. Dynamische Ansätze weisen den Vorteil auf, dass sich in den Simulationsmodellen detaillierte Angaben zu den verwendeten Lagerstrategien sowie zu technischen Eigenschaften der Lager- und Fördermittel berücksichtigen lassen, weswegen im Rahmen dieses Beitrags die dynamische Spielzeitberechnung verwendet wird.

Energieeffizienz beschreibt eine Gegenüberstellung von erzieltm Nutzen und der dafür eingesetzten Energie. Energieeffizienz heißt, „einen gewünschten Nutzen [...] mit möglichst wenig Energieeinsatz herzustellen oder aus einem bestimmten Energieeinsatz möglichst viel Nutzen zu ziehen“ [MEL09].

Im Bereich von aHRL können demnach die folgenden beiden Effizienzmaße gegenübergestellt werden: Als Umschlag wird die Anzahl von Ein- und/ oder Auslagerungen pro Zeiteinheit verwendet:

$$\text{Umschlag} = \frac{\text{Ein- und/ oder Auslagerungen}}{\text{Zeiteinheit}}$$

Dem Umschlag wird die Energieeffizienz gegenübergestellt, die die Anzahl an Ein- und/ oder Auslagerungen pro Energieeinheit beschreibt:

$$\text{Energieeffizienz} = \frac{\text{Ein- und/ oder Auslagerungen}}{\text{Energieeinheit}}$$

Eine Optimierung der Energieeffizienz gemäß dem Minimum-Prinzip würde demnach je nach gewähltem Zeithorizont entweder den Energiebedarf (Input) einer

einzelnen Ein- oder Auslagerung (Output) reduzieren oder - bei langfristiger Ausrichtung - den mittleren Energiebedarf pro Ein- und/ oder Auslagerung reduzieren.

AHRL zeichnen sich durch einen hohen Anteil mechanischer Nutzenergie infolge hoher bewegter Massen und hoher Nenngeschwindigkeiten aus. Daher eignen sich die folgenden Maßnahmen, um den mechanischen Energiebedarf zu verringern [MEL09]:

- Minderung der Masse von bewegten Körpern,
- Reduktion der Radien von rotierenden Körpern,
- Verringerung der Reibung,
- Minderung der Geschwindigkeit von bewegten Körpern,
- Energierückspeisung oder -weaternutzung sowie
- Verkürzung der Wege, über die ein Körper bewegt werden muss.

Die vorgenannten Maßnahmen lassen sich zur Umsetzung in die Kategorien „mechanische Konstruktion“, „elektrische und elektrotechnische Konfiguration“, „Bewegungssteuerung“ und „Lagerstrategien“ gliedern.

4 BISHERIGE ANSÄTZE ZUR ERHÖHUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ VON AUTOMATISCHEN HOCHREGALLAGERN

4.1 MECHANISCHE KONSTRUKTION

Im Bereich der mechanischen Konstruktion kann u. a. die Minderung der Masse bewegter Körper, die Reduktion der Rotationsradien sowie die Verringerung der Reibung zur Senkung des Energiebedarfs beitragen.

Massenreduktionen lassen sich beispielsweise beim RBG-Mast, dem Hubwagen oder dem LAM realisieren. Die Reduzierung der Totmasse bewirkt eine geringere Energieaufnahme zur Erreichung der Nenngeschwindigkeit des RBG. Zudem wird dadurch die Radlast gesenkt, was bei einem konstanten Reibungskoeffizienten zu einer Reduktion der Reibungsenergie führt. Ein Ansatz zur Reduktion der Eigenmasse des Hubmasts wurde von Furmans/ Linsel vorgestellt. Im Beitrag wird jedoch auf die lange Amortisationsdauer von Leichtbau-Masten verwiesen [FL11].

Der Ersatz von Stahlseilen durch Kunststoffseile im Hubwerk ermöglicht eine Reduktion des Radius und des Trägheitsmoments der Umlenkrolle. Die sich ergebenden energetischen Einsparpotentiale werden durch die Möglichkeit einer Verringerung des Antriebsstrangs sowie des oberen Totraums flankiert [EW10].

Reibungen können beispielsweise bei Umlenkungen, Lagern und in den Antriebselementen verringert werden.

4.2 ELEKTRISCHE UND ELEKTROTECHNISCHE KONSTRUKTION

Durch eine Zwischenkreiskopplung von Fahr- und Hubantrieb kann, wenn einer der Antriebe im Generatorbetrieb agiert, die erzeugte Energie dem anderen Antrieb zur Verfügung gestellt werden. So wird beispielsweise beim Absenken einer Last die generierte Energie in Fahr-energie des Fahrmotors umgewandelt.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, nicht benötigte Energie in das speisende Netz zurückzuspeisen. Hierfür werden eine Rückspeiseeinheit, bestehend aus einem Wechsel- und einem Gleichrichter, sowie eine Umrichtereinheit, bestehend aus einem Wechselrichter, eingesetzt. Schulz/ Monecke/ Zadek konnten bei einem im Jahr 2010 errichteten Labor-AKL Rückspeiseraten von 45-60 % beim Fahr- und 60-70 % beim Hubantrieb messen, d. h. 45-60 bzw. 60-70 % der mechanischen Energie konnte als elektrische Energie rückgespeist werden [SMZ12].

Energiespeicher, als weitere Möglichkeit, weisen den Nachteil auf, dass sie nur Gleichstrom speichern können. Somit muss überschüssiger Drehstrom erst verlustbehaftet gleichgerichtet werden, bevor er in Akkumulatoren oder Kondensatoren gespeichert werden kann.

4.3 BEWEGUNGSSTEUERUNG

Die Fahrsteuerung umfasst alle Freiheitsgrade der Bewegung des RBG, legt also Bewegungsparameter in Fahrtrichtung (x), in Hubrichtung (y) sowie in z-Richtung (LAM) fest [VDI93]. Die entsprechende Programmierung der Steuerung erlaubt es, die Bewegungsparameter Geschwindigkeit und Beschleunigung in x- und y-Richtung an die momentane Belastung anzupassen (belastungsorientierte Regelung) [TH11], um den Energiebedarf, den Verschleiß, das Schwingungsverhalten und die Fahrzeiten des RBG zu verbessern. Die Belastung umfasst dabei sowohl mechanische Lasten als auch den geforderten Umschlag. Eine Reduktion der Geschwindigkeiten und der Beschleunigungen hat eine Reduktion des maximal möglichen Umschlags zur Folge. Schulz/ Monecke/ Zadek weisen experimentell die zu erwartende Reduktion des Energiebedarfs von RBG bei reduzierten Fahrgeschwindigkeiten nach [SMZ12].

Aufgrund der Überlagerung der Bewegung in x- und y-Richtung bei der Anfahrt jedes LP einer Regalwand erreicht die nicht-zeitbestimmende Bewegung bei gleichem Startzeitpunkt ihre Sollposition bereits vor Ende der Fahrzeit (Eine Ausnahme bildet hier die Anfahrt von LP auf der Synchronfahrgeraden). Meneghetti/ Monti zeigen drei Möglichkeiten auf, um den zeitlichen Leerlauf des Antriebs der nicht-zeitbestimmenden Achse zur Reduktion des Energiebedarfs oder der Leistungsaufnahme des RBG zu nutzen:

- Spätere Beschleunigung, um gleichzeitiges Anfahren, d. h. überlagerte Leistungsspitzen, zu vermeiden,
- kürzere Rampenzeit bei gleichbleibender Nennbeschleunigung, um auf eine geringere Endgeschwindigkeit zu beschleunigen sowie
- geringere Nennbeschleunigung bei verlängerter Rampenzeit, um die Leistungsaufnahme in der Beschleunigungsphase zu reduzieren.

Bei einer kürzeren Rampenzeit (Fall #2) verlängert sich bei einem trapezförmigen Geschwindigkeitsverlauf die Fahrzeit mit konstanter Geschwindigkeit. Um bei gleichzeitigem Beginn und gleichem Ende der Simultanbewegungen die notwendige Rampenzeit der nicht-zeitbestimmenden Fahrzeitkomponente zu bestimmen, muss nachfolgendes Gleichungssystem (für $t_x > t_y$) gelöst werden. Dabei bezeichnet s_y den Hubweg, a_y die Hubbeschleunigung, t_{Ay} die Beschleunigungsdauer, t_{Ry} die Zeit, in der mit Nenngeschwindigkeit gefahren wird und t_x die gesamte Fahrzeit in x-Richtung [MeM11]:

$$s_y = a_y t_{Ay} (t_{Ay} + t_{Ry})$$

$$t_x = 2t_{Ay} + t_{Ry}$$

Ertl/ Günthner weisen darauf hin, dass die Ausstattung eines RBG mit einer Zwischenkreiskopplung eine Anpassung der Bahnkurve notwendig macht, um den Energieausgleich zwischen Fahr- und Hubantrieb wirkungsvoll einzusetzen. Die durch Adaption der Bahnkurve möglichen Energieeinsparungen für eine Bewegung zwischen zwei LP beziffern die Autoren auf bis zu 9 % [EG13]. Kritikpunkt an diesem Ansatz bleibt aber, dass damit lediglich vordeterminierte Bahnen energieeffizient zurückgelegt werden. Ziel muss es aber sein, von vorneherein energieeffiziente Bahnen zu bestimmen, was Ziel dieses Beitrags ist.

4.4 LAGERSTRATEGIEN

Lagerstrategien sind Betriebsstrategien in Materialflusssystemen, die in aHRL für die folgenden Funktionen eingesetzt werden [HSG76, LW87, WY97]:

- Einlagerung:
 - Ladungsträgerzuordnung,
 - Gassenzuordnung,
 - LP-Zuordnung,
- LE-Auswahl bei Auslagerungen,
- Umlagerung,
- Reihenfolgebildung:
 - Erfassung der Aufträge für Ein- und Auslagerungen,

- Auswahl der Warteschlange (Ein- oder Auslagerung),
- Reihenfolgebildung innerhalb der beiden Warteschlangen,
- Dringlichkeitsregeln,
- Befehlszyklus der Fördermittel:
 - Spielbildung,
 - Verweilpunkt

Dieser Beitrag bezieht sich auf Strategien zur LP-Zuordnung. Bei der LP-Zuordnung ist für eine eingehende LE aus den freien LP einer Gasse ein nach definierten Kriterien optimaler LP auszuwählen. Die Anforderungen der LE an den LP ergeben sich aus ihren Eigenschaften, zu denen beispielsweise die Artikel, die physischen Attribute (z. B. Masse), das Gefährdungspotential, das Produktionsdatum oder die voraussichtliche Verweildauer gehören. Die LP einer Gasse unterscheiden sich in ihrer Verfügbarkeit, im horizontalen und vertikalen Abstand zu den ÜP und damit in der Zeit, die das RBG zum Anfahren des jeweiligen LP benötigt sowie in ihren konstruktiven Merkmalen (z. B. Massebegrenzungen) [Gla08].

Etablierte Strategien zur Anordnung von LE in Regalwänden lassen sich anhand von sechs Kriterien klassifizieren [Gla08, GR90, HSG76, RV09, TS10, VG00]:

- Erstes Kriterium ist hierbei die Anzahl von Zonen, in die eine Regalwand untergliedert wird.
- Zweites Kriterium ist das Attribut der LE, das für die Zuordnung zu einer der Zonen ausschlaggebend ist. Varianten hierfür sind meist die mittleren Verweildauern der Artikel (oft ausgedrückt durch die Umschlagshäufigkeit) oder die Verweildauern der einzelnen LE.
- Drittes Kriterium ist die Datengrundlage für die genannte Attributausprägung. Möglich ist die Nutzung von Produktions- bzw. Absatzplänen zur Bestimmung der Verweildauer der Artikel oder LE. Alternativ hierzu bietet sich die Extrapolation von Vergangenheitsdaten an. Physische Daten, z. B. die LE-Masse, können im Betrieb gewonnen werden.
- Viertes Kriterium ist die Methode zur Anpassung der Zonen. Aufgrund von Sortiments- und Nachfrageveränderungen kann beispielsweise die benötigte Menge an LP für Schnellläufer die Zonenkapazität übersteigen. In diesem Fall ist entweder eine Anpassung der Zonenkapazität oder der Grenzwerte der Attributausprägungen nötig.
- Fünftes Kriterium ist die Exklusivität der Zonen. In einer exklusiven Zone dürfen nur LE gelagert werden, die die definierten Attribut-

ausprägungen der Zone erfüllen. Alternativ bieten sich geteilte Zonen an, d. h. im Falle einer vollen Zone kann eine LE in eine benachbarte Zone eingelagert werden.

- Sechstes Kriterium ist die LP-Findung innerhalb einer zulässigen Zone. Möglich sind die zufallsbasierte Zuordnung sowie die Auswahl des Stellplatzes mit der kürzesten Fahrzeit. Beide Strategien sind unabhängig von den Attributen der LE und werden lediglich durch die Regalwandgeometrie beeinflusst. Des Weiteren bietet sich die Anordnung aufgrund der Verweildauer der Artikel bzw. der LE an [GR90].

Generell verspricht eine 1-Zonen-Strategie mit verweildauerbasierter LP-Zuordnung die geringsten mittleren Fahrzeiten [Gla08, HSG76, LW87, SGH78, WY97]. Dabei befinden sich die Artikel bzw. LE mit den kürzesten Verweildauern auf den LP mit den kürzesten Fahrzeiten zu den ÜPs (EP/AP). Der Vorsprung der verweildauerbasierten LP-Zuordnung gegenüber der kürzesten-Fahrzeit-Strategie ist vor allem bei schiefen Nachfrageverteilungen gegeben, bei denen eine geringe Artikelanzahl einen hohen Anteil an den Ein-/ Auslagerungen verursacht [HSG76, LW87, Gla08]. Bei homogener Nachfrageverteilung kann die kürzeste-Fahrzeit-Strategie hingegen zu kürzeren mittleren Spielzeiten führen. Grund hierfür ist, dass die aus der verweildauerbasierten Anordnung der LE in der Regalwand kein signifikanter Vorteil gezogen werden kann, während die kürzeste-Fahrzeit-Strategie von der Nichtnutzung der LP mit den längsten Fahrzeiten profitiert [HSG76]. Yu/ de Koster schlagen vor, in Zeiten mit einem Lagerfüllgrad < 1 „langsame“ LP nicht zu vergeben, sondern eingehende LE nur in einer *effective storage area* der Regalwand anzuordnen. Hierunter verstehen die Autoren die n schnellsten LP einer Regalwand plus eine zu bestimmende Menge zusätzlicher LP zur Bildung zeit-effizienter Doppelspiele. Die Autoren präsentieren einen Algorithmus zur Dimensionierung der *effective storage area* [YD09].

Wird eine Mehrzonenstrategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zonen gewählt, so reduzieren sich die mittleren Fahrzeiten gegenüber einer 1-Zonen-Strategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung. So lassen sich bei einer schiefen Nachfrageverteilung durch 2-3 Zonen mit zufallsbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zonen etwa 75-83 % der Ersparnis einer 1-Zonen-Strategie mit verweildauerbasierten LP-Zuordnung erreichen [HSG76]. Bei mehreren Zonen bleibt jedoch der Aufwand für die Berechnung der Anzahl, Lage, Form und Größe der einzelnen Zonen in Abhängigkeit von den Lagerdimensionen, den Bewegungsparametern des RBG sowie der Anzahl und Lage der ÜP.

Goetschalckx/ Ratliff weisen nach, dass eine LP-Zuordnung mit Zonierung auf Basis der individuellen Verweildauer der LE geringere Spielzeiten als auf Basis

der Verweildauer der Artikel ermöglicht, und stellen eine entsprechende Strategie zur LP-Zuordnung vor („Adaptive“) [GR90]. Zur Vermeidung des Aufwands für Zonenbildung und -anpassung schlägt Glass eine Zuordnung ohne Zonenbildung vor und erweitert so den Ansatz von Goetschalckx/ Ratliff. Beim Ansatz von Glass („DYN“) wird das Verweildauerquantil der einzulagernden LE ermittelt, indem die Verweildauer der LE mit den Verweildauern aller bisher eingelagerten LE verglichen wird. Die LP der Regalwand werden anschließend nach aufsteigender Fahrzeit sortiert. Der eingehenden LE wird der LP zugeordnet, dessen Fahrzeitquantil dem Verweildauerquantil der LE am nächsten kommt. Ist der LP belegt, wird der freie Platz in der Liste gesucht, der den geringsten Mehraufwand bedeutet. Im Vergleich zu „Adaptive“ bietet „DYN“ nur geringe Einsparungen der Fahrzeiten, vermeidet jedoch das Management der Zonierung. „DYN“ zeigt kaum Leistungsänderungen bezüglich der Schiefe der Nachfrageverteilung und ist somit robust bei Nachfrageveränderungen [Gla08].

Bis jetzt wurden nur wenige Untersuchungen zur energieeffizienten LP-Zuordnung in aHRL durchgeführt. Meneghetti/ Monti vergleichen zwei 1-Zonen-Strategien mit verweildauerbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zone, wobei bei der ersten Strategie eingehende LE mit geringer Verweildauer den LP mit geringer Fahrzeit zum ÜP zugeordnet werden. Bei der zweiten Strategie werden eingehende LE mit geringer Verweildauer LP mit geringem Energiebedarf (für die Fahrt zum ÜP) zugewiesen. Bei der Studie wird ein mechanisches Energiemodell der Elektromotoren des RBG verwendet, wobei weder eine Zwischenkreiskopplung noch eine Energierückspeisung modelliert wird. Die zweite Strategie führt zu einer Reduktion des mittleren Energiebedarfs pro Einlagerung in Höhe von 2 %, der jedoch eine um ebenfalls 2 % erhöhte Fahrzeit gegenübersteht. In Anlehnung an die in Abschnitt 3 erläuterten Zusammenhänge kann hierbei also nicht von einer Erhöhung der Energieeffizienz gesprochen werden. Des Weiteren betrachten die Autoren lediglich LE mit homogener Masse, wodurch kein energetischer Vorteil aus einer entsprechenden Masseverteilung entlang der Regalwand erzielt werden kann [MM11].

5 BEWERTUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ VON LAGERSTRATEGIEN

In diesem Kapitel werden bestehende Strategien zur LP-Zuordnung in einem Simulationsmodell anhand der erzielten mittleren Fahrzeiten und Energiebedarfe bewertet. Hierzu wird ein mechanisches Energiemodell verwendet. Das Energiemodell ist Teil eines Gesamtmodells, das die Lagerverwaltung, RBG-Steuerung und die RBG-Bewegung umfasst. Die Simulationsstudie umfasst nach VDI 3633-1 die Phasen Vorbereitung, Durchführung und Auswertung, die nacheinander durchlaufen werden [VDI00]. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse bilden die

Grundlage zur Entwicklung einer neuen, energieeffizienteren Strategie zur LP-Zuordnung.

5.1 SIMULATION UND TECHNISCHE DATEN

In vielen Fällen sollen Erkenntnisse über ein System gewonnen werden, ohne dass an diesem jedoch die dazu notwendigen Untersuchungen oder Veränderungen durchgeführt werden können. In diesen Fällen bietet sich die Untersuchung an einem Modell an, das das System auf Grund bekannter Gesetzmäßigkeiten oder getroffener Annahmen hinreichend genau abbildet [VDI00].

Als Basis für die Bewertung der Energieeffizienz von Lagerstrategien wird das Modell eines aHRL herangezogen, das in der Simulationsumgebung PLANT SIMULATION erstellt wurde. Abgebildet wird ein aHRL mit einer Gasse, einem RBG sowie einer Regalwand. Die Regalwand besteht aus einer Mehrfachanordnung einfachtiefer, homogener LP, d. h. mit gleichen Abmessungen, Kapazitäten und Tragfähigkeiten, in 75 Spalten und 25 Zeilen. Dabei sind jeweils 3 LP zu einem Regalfach zusammengefasst, das durch horizontale Traversen und vertikale Regalständer begrenzt wird. Die Einlagerung der LE erfolgt längs, d. h. der Zugriff vom Gang erfolgt auf die Stirnseite der LE. Ein EP sowie ein AP befinden sich in der untersten Zeile und der Spalte 0, jedoch an unterschiedlichen Seiten des RBG-Fahrwegs. Somit ergeben sich keine Unterschiede in Fahrzeit und Energiebedarf zur Anfahrt der ÜP. Der Aufbau und die Steuerung der Lagervorzone werden nicht betrachtet, da hier kein Einfluss auf die Fahrzeiten und Energiebedarfe des RBG angenommen wird. Im aHRL werden LE als artikelreine Paletten mit homogenen Abmaßen (1.200 mm × 800 mm Grundfläche) gelagert. In Kombination mit der Homogenität der LP ist somit jeder LP mit jeder LE kompatibel. Die LE kann simultan in x- und y-Richtung bewegt werden. Die resultierende Fahrzeit zwischen Punkten ist gemäß der Tschebyscheff-Metrik das Maximum aus den isolierten Fahr- und Hubzeiten. Die Spielzeiten und Energiebedarfe werden auf Basis der konstruktiven und kinematischen Eigenschaften der RBG ermittelt. Im Modell werden ausschließlich Doppelspiele durchgeführt, wodurch keine Leerfahrten von oder zu den ÜP entstehen.

Zur Bewertung des Energiebedarfs von durchgeführten Lageroperationen wird ein mechanisches Energiemodell des RBG implementiert. Dieses ermöglicht die Ermittlung der kinetischen, potentiellen und Reibungsenergie, die zur Bewegung des RBG und der LE aufgebracht werden muss. Unbeachtet bleiben im Energiemodell das Lastspiel, das Bremsmoment, der erhöhte Energiebedarf bei der Positionierung sowie die Energie zur Überwindung der Haftreibung. Die Nutzung eines mechanischen Energiemodells zur Bewertung von Energieeffizienz-Strategien in Intralogistiksystemen wurde von Schmidt/ Schulze postuliert. Demnach ist die mechanische Arbeit zum Heben, Senken und Beschleunigen

primäre Ursache für den elektrischen Energiebedarf automatisierter Anlagen. Die Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Arbeit erfolgt dabei in mehreren Schritten mit jeweils nichtlinearem, betriebszustandsabhängigem Wirkungsgrad, so dass eine Berechnung der elektrischen Energie mit hohen Ungenauigkeiten versehen wäre [SS11].

Während sich die Fahrzeit aus den Beschleunigungen und den Maximalgeschwindigkeiten des RBG in x- und y-Richtung ergeben, sind zur Ermittlung des Energiebedarfs des RBG weitere Parameter notwendig. Für das Projekt *GreenRBG*, das diesem Artikel zu Grunde liegt, wurde ein Mehrkörper-Simulationsmodell eines RBG erstellt und zur Ermittlung der Energiebedarfe genutzt. In diesem Beitrag kommt jedoch nur ein vereinfachtes Energiemodell zum Einsatz, das die folgenden Approximationen enthält:

- Vollständige Umsetzung kinetischer Energie in Reibung bei Bremsvorgängen;
- Zuführung kinetischer und potentieller Energie bei Fahr- und Hubbewegungen;
- Berücksichtigung von Reibungskoeffizienten in Fahrt- und Hubrichtung;
- Ermittlung des Energiebedarfs zur Durchführung der Einlagerfahrt (EP→LP) und der Auslagerfahrt (LP→AP). Zwischenfahrten werden weder zeitlich noch energetisch berücksichtigt, da diese nicht von der Strategie zur LP-Zuordnung, sondern von der Strategie zur Spielbildung (z. B. Nearest-Neighbour) abhängen.

5.2 SYSTEMLASTDATEN

In der Lagervorzone werden in konstantem Zeitabstand LE generiert. Im Modell wird eingehenden LE eine individuelle Masse und Verweildauer zugeordnet. Die Masse folgt dabei einer Gleichverteilung zwischen 100 und 1.200 kg, während die Verweildauer anhand einer Beta-Verteilung erzeugt wird: Zur Approximation einer 20/75-Verteilung der Nachfragekurve wurden in Anlehnung an die Untersuchungen von Glass die Parameter $\alpha_1 = 1,25$ und $\alpha_2 = 2$ gewählt [Gla08]. Nach Ende der Verweildauer wird die Auslagerung einer LE initialisiert. Eine eingehende LE wird jeweils mit der nächsten auszulagernden LE zu einem Doppelspiel kombiniert. Der Lagerfüllgrad beträgt dabei 0,87.

5.3 MODELLIERTE STRATEGIEN

Für die LP-Zuordnung eingehender LE wurden die folgenden Strategien implementiert:

RND: 1 Zone pro Regalwand; zufallsbasierte Auswahl eines freien LP.

COL1: 1 Zone pro Regalwand; Auswahl des freien LP mit der niedrigsten Fahrzeit zum EP.

COL2: 2 Zonen pro Regalwand; Zuordnung der eingehenden LE zu einer Zielzone (Schnell- oder Langsamläufer). Innerhalb der Zielzone Auswahl des freien LP mit der niedrigsten Fahrzeit zum EP.

DYN: Dynamische Zonierung nach Glass; Vergleich des Verweildauerquantils der eingehenden LE mit den Fahrzeitquantilen der freien LP. Auswahl des freien LP mit der geringsten Abweichung.

5.4 ENERGIEEFFIZIENTE LP-ZUORDNUNG

Eine Optimierung der Fahr- und Hubwege lässt sich durch angepasste Lagerstrategien umsetzen. Ziel muss es dabei sein, die auftragsbezogene Weglänge in Fahr- und Hubbewegung derart zu beeinflussen, dass der durchschnittliche Energiebedarf des aHRL reduziert wird. Aus dem oben beschriebenen Grundmodell des Energiebedarfs ergibt sich, dass eine Reduktion der mittleren Fahr- und Hubwege Einsparungen in kinetischer, potentieller und Reibenergie nach sich zieht. Somit sorgt ein häufiges Anfahren von LP nach den ÜPs für einen geringeren mittleren Energiebedarf bei Ein- und Auslagerungen. Dieser Effekt stimmt mit den Überlegungen zur Erzielung geringer mittlerer Fahrzeiten überein. Aus einer zeitlich optimierten LP-Zuordnung ist daher grundsätzlich auch eine Energieeinsparung zu erwarten.

Von besonderer Bedeutung zur Reduktion des Energiebedarfs von Ein- und Auslagerungen ist die Masse der ein- und ausgehenden LE. Zum Zwecke einer energieoptimalen Masseverteilung in einer Regalwand ist daher grundsätzlich anzustreben, relativ schwere LE möglichst ohne Hubbewegung einzulagern. LP mit einer großen vertikalen Entfernung zum Übergabepunkt sollten hingegen relativ leichten LE vorbehalten bleiben. Im Falle eines Lagerfüllgrads $\ll 1$ wäre es zudem möglich, energetisch ungünstige LP unbelegt zu lassen und nur im Fall eines steigenden Lagerfüllgrads zu belegen. Diese Überlegungen sollen im Folgenden in die Entwicklung einer energieeffizienten Strategie zur LP-Zuordnung einfließen.

Durch die Überlagerung der horizontalen und vertikalen Bewegung der LE während einer zweidimensionalen Fahrt, z. B. während einer Einlagerfahrt, weisen meist mehr als ein LP die gleiche Fahrzeit auf. Dieser Fall tritt bei LP in der gleichen horizontalen Reihe oder der gleichen vertikalen Spalte der Regalwand auf. Dies liegt darin begründet, dass ihre zeitbestimmende Komponente den gleichen Wert aufweist, während die nicht zeitbestimmende Komponente variiert. LP mit einer gleichen Fahrzeit bilden eine Isochrone einer Regalwand. Die LP einer Isochrone unterscheiden sich nicht in ihrer Fahrzeit, jedoch in dem Energiebedarf zum Anfahren der jeweiligen LP. Dies liegt an den horizontalen und vertikalen Abständen zu den ÜP und somit an der potentiellen, kinetischen

und Reibungsenergie, die zum Anfahren jedes LP aufgewendet werden muss. Dieser Umstand wird im Folgenden genutzt, um die benötigte Energie zur Durchführung von Ein- und Auslagerungen zu reduzieren, ohne die Fahrzeit zu erhöhen.

Der entwickelte Algorithmus ordnet alle LP einer Isochrone nach ihrer Eignung für die Lagerung schwerer LE. Dem liegt die Überzeugung zu Grunde, dass relativ schwere LE auf LP gelagert werden sollten, die eine hohe Eignung für schwere LE aufweisen. Die Eignung für die Lagerung schwerer LE wird dabei über einen Strafindikator bestimmt. Der Strafindikator eines LP ist die Differenz der benötigten Energie zur Ein- und Auslagerung einer schweren LE (hier: 1.200 kg) abzüglich der Energie zur Ein- und Auslagerung einer leichten LE (hier: 100 kg). Durch Messung oder approximative Berechnung des Strafindikators jedes LP kann für jede Isochrone der Regalwand eine Rangfolge ihrer LP anhand des Strafindikators erfolgen. Der Strafindikator weist folgenden Verlauf auf:

- LP einer Zeile haben mit zunehmender horizontaler Entfernung zum EP/AP steigende Strafindikatoren.
- LP einer Spalte haben mit zunehmender vertikaler Entfernung zum EP/AP steigende Strafindikatoren.

Eine eingehende, relativ schwere LE sollte demnach einem LP mit geringem Strafindikator zugeordnet werden, während LP mit hohen Strafindikatoren relativ leichten LE vorbehalten sein sollten.

Die entwickelte Strategie MVI („Masseverteilung innerhalb der Isochrone“) zur LP-Zuordnung bestimmt im ersten Schritt für die eingehenden LE einen zeitlich passenden, freien LP, dessen Fahrzeitquantil den betragsmäßig geringsten Abstand zum Verweildauerquantil der eingehenden LE aufweist (Dieser erste Schritt erfolgt analog zur Strategie DYN [Gla08]). Alle benachbarten LP mit gleichen Fahrzeiten wie der Ziel-LP (Isochrone) werden im zweiten Schritt in die Bestimmung des aus Massesicht optimalen LP einbezogen. Die somit in Frage kommenden LP (z. B. 8 Stück) werden im dritten Schritt nach absteigendem Strafindikator sortiert. Durch Multiplikation des Massequantils der eingehenden LE (z. B. 0,8) mit der Anzahl in Frage kommender LP (hier: 8) ergibt sich im vierten Schritt der Index des aus Massesicht optimalen LP (hier: $0,8 \times 8 = 6,4$; gerundet: 6) der Isochrone. Für diesen LP wird der Strafindikator ausgelesen. Im fünften Schritt wird aus den freien LP der Isochrone derjenige ausgewählt, dessen Strafindikator die geringste absolute Abweichung zum Strafindikator des in Schritt 5 gewählten LP aufweist.

5.5 SIMULATIONSERGEBNISSE

Je Strategie werden durch Auswertung von jeweils 50.000 Ein- und Auslagerungen die mittleren Fahrzeiten und Energiebedarfe pro Ein-/Auslagerung ermittelt. Tabelle 2 illustriert die Ergebnisse.

#	Strategie	Mittlere Fahrzeit [s]	Mittlerer Energiebedarf [Wh]
1	RND	54,4	162,3
2	COL1	51,5	152,4
3	COL2	44,6	131,8
4	DYN	42,9	125,8
5	MVI-0	42,9	123,8
6	MVI-10	42,3	115,4

Tabelle 2. *Simulationsergebnisse*

Wie die Simulationsergebnisse zeigen, lassen sich durch die bekannten, zeitbezogenen Strategien zur LP-Zuordnung (#2-4) bereits deutliche Einsparungen in Fahrzeit und Energiebedarf im Vergleich zur zufallsbasierten LP-Zuordnung (#1) erzielen. Insbesondere die dynamische Zonierung nach Glass erzielt mit 21 % Zeiteinsparung und 22 % Energieeinsparung die besten Ergebnisse.

Die Anwendung der MVI-Strategie brachte als Ergebnis 24 % Energieeinsparung bei einer Zeiteinsparung von ebenfalls 21 %. Die relativ geringe Verbesserung gegenüber der DYN-Strategie liegt darin begründet, dass bei einem Lagerfüllgrad von 0,87 der aus Massesicht optimale LP der Ziel-Isochrone im Mittel nur in 13 % der Fälle frei ist.

Hier bietet sich die Einführung eines Toleranzfaktors z [%] an. Damit werden im zweiten Schritt der MVI-Strategie nicht nur LP der gleichen Isochrone berücksichtigt, sondern auch angrenzende LP, deren Fahrzeit um höchstens $\pm z$ % von der Fahrzeit des zeitlich passenden Ziel-LP abweicht. Im vorliegenden Fall ergibt sich bei einem Toleranzfaktor von 10 % (MVI-10, #6) eine Energieeinsparung von 29 % bei ebenfalls leicht verbesserter mittlerer Fahrzeit. Die Verbesserung des Energiebedarfs gegenüber der DYN-Strategie beträgt dabei 8,3 %.

6 FAZIT UND AUSBLICK

Bisherige wissenschaftliche Untersuchungen zur LP-Zuordnung in aHRL beschäftigten sich fast ausschließlich mit der Verbesserung des Umschlags. Dabei zeigt sich, dass verweildauerbasierte LP-Zuordnungen beim Vorlie-

gen einer schiefen Nachfrageverteilung zu geringen Fahrzeiten führen.

Im vorliegenden Beitrag wurde eine Strategie vorgestellt, die unter Beibehaltung geringer Fahrzeiten eine Reduktion des mittleren Energiebedarfs je Ein-/ Auslagerung ermöglicht. In Simulationsexperimenten konnten, trotz eines relativ hohen Lagerfüllgrads von 0,87, signifikante Energieeinsparungen erzielt werden.

Gegenwärtig wird an der Bestimmung des optimalen Toleranzfaktors z je nach Anwendungsfall geforscht. Zudem wird das einfache Energiemodell durch ein genaueres Modell auf Basis einer zeitkontinuierlichen Mehrkörpersimulation des RBG ersetzt.

7 DANKSAGUNG

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts Green-RBG des Instituts für Fördertechnik und Logistik (IFT) und des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart. Das Projekt GreenRBG wird von der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH finanziert und von der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH betreut.

LITERATUR

- [AF07] Arnold, Dieter; Furmans, Kai: *Materialfluss in Logistiksystemen*. Springer, Berlin et al., 5. Auflage, 2007.
- [Bol08] Boltz, Walter: *Energieeffizienz als Voraussetzung für nachhaltige Energieversorgung*. In: *Elektrotechnik & Informationstechnik* 125 (9): 309-311, 2008.
- [CKH07] Cantner, Uwe; Krüger, Jens; Hanusch, Horst: *Produktivitäts- und Effizienzanalyse*. Springer, Berlin, 2007.
- [DIN05] DIN 55510-1: *Verpackung - Modulare Koordination im Verpackungswesen - Grundlagen*. Beuth, Berlin, 2005.
- [EG13] Ertl, Rainer; Günthner, Willibald A.: *Energieeffiziente Bahnplanung von Regalbediengeräten*. In: *Hebezeuge Fördermittel* 53 (1-2): 26-29, 2013.
- [EW10] Ernst, Björn; Wehking, Karl-Heinz: *Einsatz von hochfesten Faserseilen für Hubbewegungen in der Lagertechnik*. Abschlussbericht für das AiF-Vorhaben # 15370, 2010.
- [FEM81] FEM 9.221: *Leistungsnachweis für Regalbediengeräte*, 1981.
- [FEM97] FEM 9.101: *Terminologie - Regalbediengeräte - Definitionen*, 1997.
- [FL11] Furmans, Kai; Linsel, Peter: *Leichtbau bei Unstetigförderern durch Einsatz moderner Werkstoffe*. In: Vojdani, Nina (Hrsg.): *7. Fachkolloquium der WGTL*, Praxiswissen, Dortmund, 2011, 14-25.
- [Gla08] Glass, Michael: *Schnellläuferstrategien in Lagern und Dynamische Zonierung*. Dissertation, TU Dresden, 2008.
- [GR90] Goetschalckx, Marc; Ratliff, H.: *Shared Storage Policies Based on the Duration Stay of Unit Loads*. In: *Management Science* 36 (9): 1120-1132, 1990.
- [Gud10] Gudehus, Timm: *Logistik*. Springer, Berlin, 2010.
- [HSG76] Hausman, Warren; Schwarz, Leroy; Graves, Stephen: *Optimal Storage Assignment in Automatic Warehousing Systems*. In: *Management Science* 22 (6): 629-638, 1976.

- [Jün89] Jünemann, Reinhardt: *Materialfluß und Logistik*. Springer, Berlin, 1989.
- [LW87] Linn, Richard; Wysk, Richard: *An analysis of control strategies for an automated storage/retrieval system*. In: *INFOR* 25 (1): 66-83, 1987.
- [Mar09] Martin, Heinrich: *Transport und Lagerlogistik*. Vieweg, Wiesbaden, 2009.
- [MEL09] Müller, Egon; Engelmann, Jörg; Löffler, Thomas et al.: *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Springer, Dordrecht et al., 2009.
- [MM11] Meneghetti, Antonella; Monti, Luca: *Sustainable storage assignment and dwell-point policies for automated storage and retrieval systems*. In: *Production Planning & Control*, iFirst, 2011.
- [PB11] Piepenburg, Anne; Bruns, Rainer: *Ermittlung von Leistungsgrenzen verschiedener Lagerstrategien unter Berücksichtigung zentraler Einflussgrößen*. In: Vojdani, Nina (Hrsg.): *7. Fachkolloquium der WGTL*, Praxiswissen, Dortmund, 2011, 138-149.
- [RV09] Roodbergen, Kees Jan; Vis, Iris: *A survey of literature on automated storage and retrieval systems*. In: *European Journal of Operational Research* 194 (2): 343-362, 2009.
- [SMZ12] Schulz, Robert; Monecke, Jörg; Zadek, Hartmut: *Isoenergetic Shelves of Automatic Small Parts Warehouses*. In: *Logistics Journal*, 2012.
- [SS11] Schmidt, Thorsten; Schulze, Frank: *Simulationsbasierte Entwicklung energieeffizienter Steuerungsstrategien für Materialflusssysteme*. In: Vojdani, Nina (Hrsg.): *7. Fachkolloquium der WGTL*, Praxiswissen, Dortmund, 2011, 150-159.
- [SGH78] Schwarz, Leroy; Graves, Stephen; Hausman, Warren: *Scheduling policies for automatic warehousing systems: Simulation results*. In: *AIEE Transactions* 10 (3): 260-270, 1978.
- [TH11] ten Hompel, Michael; Heidenblut, Volker: *Taschenlexikon Logistik*. Springer, Heidelberg et al., 2011.
- [TS10] ten Hompel, Michael; Schmidt, Thorsten: *Warehouse Management*. Springer, Berlin et al., 2010.
- [VG00] van den Berg, Jeroen; Gademann, A: *Simulation study of an automated storage/retrieval system*. In: *International Journal of Production Research* 38 (6): 1339-1356, 2000.
- [VDI93] VDI 2681: *Übersichtsblätter Lagereinrichtungen Steuerungen für Regalbediengeräte*. Beuth, Berlin, 1993.
- [VDI00] VDI 3633-1: *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Grundlagen*. Beuth, Berlin, 2000.
- [VDI03] VDI 2516: *Flurförderzeuge für die Regalbedienung. Spielzeitermittlung in Schmalgängen*. Beuth, Berlin, 2003.
- [Wan10] Wannewetsch, Helmut: *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik*. Springer, Heidelberg et al., 4. Auflage, 2010.
- [WY97] Wang, Jih-Yau; Yih, Yuehwen: *Using neural networks to select a control strategy for automated storage and retrieval systems (AS/RS)*. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 10 (6): 487-495, 1997.
- [YD09] Yu, Yugang; de Koster, René: *Open Location Management in Automated Warehousing Systems*. Research Report, RSM, 2009, <http://hdl.handle.net/1765/14615>, aufgerufen am 05.06.2013.

Dipl.-Wi.-Ing. Tobias Sommer, research assistant at the Institute for Material Handling and Logistics (IFT), University of Stuttgart. Between 2003 and 2008 he studied industrial engineering and management at the Dresden University of Technology.

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K.-H. Wehking, director of the Institute for Material Handling and Logistics (IFT), University of Stuttgart.

Address: Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart, Holzgartenstr. 15b, D-70174 Stuttgart. Phone: +49 711 685-83743, Fax: +49 711 685-83769, E-Mail: tobias.sommer@ift.uni-stuttgart.de