

CHRISTOPH NOBBE

**Vergleich technischer Implementierungen
für GridFlow-Systeme**

BAND 86

**Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Fördertechnik und
Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)**

Christoph Nobbe

**Vergleich technischer Implementierungen
für GridFlow-Systeme**

WISSENSCHAFTLICHE BERICHTE

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

BAND 86

Vergleich technischer Implementierungen für GridFlow-Systeme

von
Christoph Nobbe

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Maschinenbau, 2015
Referenten: Prof. Dr.-Ing. K. Furmans, Prof. Dr.-Ing. T. Schmidt

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 0171-2772

ISBN 978-3-7315-0400-9

DOI: 10.5445/KSP/1000047706

Vergleich technischer Implementierungen für GridFlow-Systeme

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Maschinenbau
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christoph G. Nobbe

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung:

Hauptreferent:

Korreferent:

24. April 2015

Prof. Dr.-Ing. K. Furmans

Prof. Dr.-Ing. T. Schmidt

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie. In dieser Zeit durfte ich an vielen Forschungs- und Industrieprojekten teilnehmen. Die Erfahrungen hieraus ermöglichten es mir die Arbeit so praxisnah zu gestalten. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Fumans, Leiter des Instituts für Fördertechnik und Logistiksysteme gilt mein besonderer Dank für die Übernahme des Hauptreferats sowie für die Unterstützung meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Ich habe viel Freiheit mit der notwendigen Unterstützung genossen um meine eigenen Ideen und Ziele verfolgen zu können.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schmidt danke ich für die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Prof. Dr.sc.techn. Thomas Koch für die Übernahme des Vorsitizes meiner mündlichen Prüfung.

Den aktiven und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen gilt mein herzlicher Dank für die gute Arbeitsatmosphäre und die vielen spannenden Diskussionen. Besonders hervorheben möchte ich dabei meine ehemaligen und neuen Kolleginnen aus meinem Diss-Team, die mich Woche für Woche dazu bewegt haben am Ball zu bleiben und sich immer Zeit genommen haben, um auch Kleinigkeiten mit mir zu diskutieren.

Ebenfalls möchte ich mich bei allen Freunden und Verwandten für die investierte Zeit zum Korrekturlesen dieser Arbeit bedanken.

Mein tiefster und persönlicher Dank gilt meiner Familie und meiner Lebensgefährtin, die mich auf diesem Weg unterstützt haben, meine Launen erduldeten und so das Gelingen dieser Arbeit überhaupt erst ermöglichten.

Karlsruhe, Mai 2015

Christoph G. Nobbe

Kurzfassung

Christoph G. Nobbe

Vergleich technischer Implementierungen für GridFlow-Systeme

Bei der kompakten Lagerung von Waren wird versucht einen möglichst großen Flächennutzungsgrad zu erreichen. Die Automatisierung solcher Kompaktlager ist technisch aufwändig und oftmals mit großem finanziellen Aufwand verbunden. Bei immer teurer werdenden Grundstückspreisen, vor allem in urbanen Gegenden, stellen sie jedoch eine effiziente Möglichkeit dar, Ware platzsparend zu lagern. Diese automatisierten Kompaktlager sind aber erst ab einer bestimmten Größe und Durchsatz rentabel.

Die Alternative stellen kostengünstige Bodenlager dar. Bei der Bodenlagerung müssen Rangierflächen für Stapler oder Handhabungsgeräte vorgesehen werden, welche die für die Lagerung nutzbare Fläche einschränken. Um die Lagerdichte zu erhöhen ist es wünschenswert diese Freiräume im Lager zu eliminieren und dennoch Zugriff auf jede Ladungseinheit zu haben.

Das von Gue und Kim vorgeschlagene Modell des Lagerns in einem Raster ohne Gänge, bei dem Lagereinheiten sequenziell verschoben werden können um Zugriff auf die dahinterliegenden Einheiten zu erlangen, bietet die Möglichkeit auch kompakte Lager automatisiert zu betreiben (Gue und Kim 2007). Diese sogenannte GridFlow-Systematik bietet ein breites Einsatzspektrum, das über ein reines Vorratslager hinausgeht. So ist die Nutzung zudem z.B. im Warenein- wie -ausgang, in Lagervorzonon, im Kommissionierbereich, als Pufferlager und als Sorter realisierbar.

In dieser Arbeit werden verschiedene technische Implementierungen, mit denen es möglich ist das GridFlow-Prinzip umzusetzen, untersucht. Zunächst wird ein Überblick der Varianten gegeben und die jeweils systems-

spezifischen Parameter, wie z.B. Geschwindigkeit und Lagerplatzgröße, aufgezeigt. Mithilfe von Beispielszenarien werden die technischen Varianten beurteilt und deren Eignung für die genannten Einsatzmöglichkeiten herausgearbeitet. Augenmerk liegt dabei auf dem Platzbedarf, Durchsatz und dem Energieverbrauch.

Abstract

Christoph G. Nobbe

A Comparison of Methods for the Technical Implementation of GridFlow Systems

With the compact warehousing of goods, the main aim is to achieve the highest possible space utilisation rate. The automation of these compact warehouses is a technically sophisticated task and frequently entails considerable financial expense. However as the price of real estate steadily increases - particularly in urban locations - facilities of this type present an efficient option for the space-saving storage of goods. But these automated compact warehouses only become profitable once they exceed a particular size and throughput.

The alternative is to opt for low-cost ground storage systems. With ground storage systems it is necessary to factor in manoeuvring space for forklifts or handling equipment and this restricts the space available for storage. In order to increase the storage density it would be preferable to eliminate these open spaces within the warehouse, while still having access to every loading unit.

The storage model proposed by Gue and Kim - a grid system without aisles in which storage units can be sequentially shunted in order to access the units that lie behind them - creates the possibility of also operating compact warehouses using automated methods (Gue und Kim 2007). This so-called GridFlow system offers a wide range of applications extending over and beyond mere storage. Other conceivable uses include goods-in and goods-out applications, pre-storage zones, in the commission area, as a buffer store or as a sorting facility.

This paper will examine various technical implementation methods that can be used to realise the GridFlow principle. It will begin by presenting an overview of the various options with a description of the respective parameters specific to each particular system, such as speed and size of storage space. The technical alternatives will be evaluated with the aid of sample scenarios and their suitability for the specified possible applications described in detail. The focal points of this analysis will concentrate on the spatial requirement, throughput and energy consumption aspects.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Ziel der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen zur Kompaktlagerung	5
2.1 Technische Hilfsmittel für die Ein- und Auslagerung in Kompaktlagern	5
2.2 Bodenlagerung	6
2.3 Kanallager	8
2.3.1 Durchlaufregale	9
2.3.2 Satellitenlager	10
2.4 Verschieberegal	11
2.5 3D-Lager	11
2.6 Automatisierte Ware-zum-Mann Systeme	13
2.7 Kompakt oder hoher Durchsatz	15
3 GridFlow Konzept und technische Umsetzung	17
3.1 Definition des GridFlow Konzepts	17
3.2 Funktionsweise	18
3.3 Anforderungen an die Gestaltung	20
3.3.1 Schnittstellen der Funktionsbereiche	22
3.3.2 Bauraum	23
3.3.3 Lastaufnahme	23
3.3.4 Fahrwerk	24
3.4 Technische Implementierungen	28

3.4.1	Lagern auf Fördertechnik	28
3.4.2	Lagern auf ortsfesten Gestellen	32
3.4.3	Lagern auf mitbewegten Gestellen	33
3.4.4	Lagern auf dem Boden	34
3.5	Technische Parameter der Systeme	37
3.5.1	Beschleunigungen und Geschwindigkeiten	38
3.5.2	Bewegungsmöglichkeiten der Varianten	38
3.5.3	Flächenbedarf	39
4	Erarbeitung der Vergleichsgrundlage	41
4.1	Vergleichsgrößen	42
4.1.1	Platzbedarf	43
4.1.2	Spielzeit	43
4.1.3	Durchsatz	44
4.1.4	Wirkungsgrad, energetisch	45
4.1.5	Energetischer Aufwand	47
4.2	Grundbewegungen im Raster	48
4.2.1	Definition der Einzelbewegungen	49
4.2.2	Verschieben einer Leerstelle, 3-move	51
4.2.3	Verschieben einer Leerstelle um n Positionen, n-move	53
4.2.4	Versetzen einer Ladungseinheit, 14-move	55
4.2.5	Richtungswechsel einer Ladungseinheit um 90°, Corner move (c-move).	59
4.3	Vergleichssituationen mit eindeutig sequentiellen Bewegungen	61
4.3.1	Vergleichssituation 1	63
4.3.2	Vergleichssituation 2	67
4.3.3	Vergleichssituation 3	69
5	Vergleich der technischen Implementierungen	75
5.1	Platzbedarf	76
5.1.1	Flächennutzung	76
5.2	Bewegungen im Raster	77
5.2.1	Zeitliche Betrachtung 3-move	80
5.2.2	Zeitliche Betrachtung n-move	81
5.2.3	Zeitliche Betrachtung 14-move	83
5.2.4	Zeitliche Betrachtung c-move	84
5.3	Energieaufwand	86
5.3.1	Grundlast des Systems	87

5.3.2	Energieberechnung	88
5.3.3	Grundbewegungen	88
6	Analytische Auswertung der Vergleichssituationen	93
6.1	Situation 1	93
6.2	Situation 2	99
6.3	Situation 3	102
6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	110
6.5	Überlegungen zur Zugriffszeit und dem Durchsatz	112
7	Parallelisierung der Bewegungen und die sich daraus ergeben Möglichkeiten	117
7.1	Analytische Betrachtung – Segmentierung der Ausgangssituationen.	117
7.1.1	Aufteilung des Rasters	117
7.1.2	Beispielrechnung	119
7.2	Entnahmeszenarien mit der Strategie LivePath	123
7.2.1	Systemgestaltung und Simulationsparameter	124
7.2.2	Laufzeit und Durchsatz	125
7.2.3	Energiebedarf	129
7.3	Einsatz der GridFlow Konzepts in der Lagerhaltung	130
7.3.1	Vorratslager mit der GridFlow-Systematik	133
7.3.2	Pufferlager mit der GridFlow-Systematik	135
7.3.3	Sortieren, Sequenzieren mit der GridFlow-Systematik	136
8	Zusammenfassung	141
	Literaturverzeichnis	145
	Symbolverzeichnis	155
	Anhang	

1 Einleitung

In einem Distributionszentrum oder einer Produktionsstätte gibt es keine universelle Struktur nach der die verschiedenen Arbeitsbereiche angeordnet sind. Je nach Aufgabengebiet laufen die Prozesse in unterschiedlicher Reihenfolge und Ausprägung ab. Die individuelle Realisierung eines Distributionszentrums hängt von den jeweils geforderten Leistungswerten wie z.B. der Art sowie der Menge der Waren selbst, dem notwendigen Durchsatz und dem vorhandenen Budget ab. Ebenso sind bei Produktionsstätten die Prozesse individuell miteinander verknüpft um das jeweilige Produkt herzustellen (Bullinger und ten Hompel 2007). Oftmals wird eine Vielfalt an Fördertechnik eingesetzt um den Anforderungen gerecht zu werden. Deren Einsatzmöglichkeiten können sehr flexibel, wie bei einem Stapler oder auf bestimmte Bereiche wie bei einem Regalbediengerät, festgelegt sein. Die Systeme, welche heute zum automatischen Handling von Paletten eingesetzt werden, eignen sich vor allem für den Bereich des Lagerns und Kommissionierens. Für die Bereitstellung im Warenausgang wird hauptsächlich noch auf den manuell geführten Stapler oder ähnliche Geräte gesetzt. Dies liegt unter anderem daran, dass die heute am Markt befindlichen Systeme spezialisierte Sonderlösungen sind und nicht die notwendige Flexibilität liefern, die für einen effizienten, automatisierten Warenumschat in einem sich schnell ändernden Umfeld notwendig ist.

Die Notwendigkeit für einen schnellen und effizienten Warenumschat belegt auch das Forschungsprojekt LogoTakt (Weiblen, Breier und Furmans 2010). Der effiziente Umschat der Waren stellt hierbei eine Schlüsselfunktion dar. Bisher kann solch eine flexible Aufgabe nur manuell mit Staplern erledigt werden. Eine automatische Sortierung der Ladung ist mit der heute nutzbaren Technik nicht rentabel, da automatische Systeme bisher ausschließlich für den Einsatz zum Lagern und Kommissionieren entwickelt wurden. Bei einem getakteten Palettenumschat von der Straße auf die Schiene verbleibt die Ware nur sehr kurz in den jeweiligen Umschlagestellen, bevor sie dann direkt weiterverladen wird.

Ein ähnlicher Vorgang findet in einem Crossdock statt. Es besteht im Grunde nur aus einem Wareneingang, dem Sortierbereich und dem Warenausgang. Es dient dem Umschlag von Waren. Lkws mit sortenreiner Ladung werden auf Lieferungen mit gemischtem Sortiment für Filialen verteilt. Hierbei docken die sortenreinen Lkws an einer Seite des Crossdocks an und werden entladen. Zeitlich in sehr engem Abstand docken auf der gegenüberliegenden Seite leere Lkws an, welche nun aus den verschiedenen sortenreinen Lkws ihre Ladung zusammengestellt bekommen. Eine Lagerung der Waren findet nur in einem kurzen Zeitraum (ein paar Stunden) statt (Blunck 2005; Stickel 2006).

Hinzu kommt, dass durch immer teurer werdende Grundstückspreise, vor allem in den Städten, Firmen verstärkt gezwungen sind den vorhandenen Platz effektiv zu nutzen. Im Umkehrschluss heißt dies, dass immer mehr Produkte auf immer kleinerem Raum gelagert (Gue 2006) und beim Warenumschlag sortiert werden müssen. Der Kostendruck ist in der Logistikbranche sehr hoch, da hier keine wertschöpfende Tätigkeit stattfindet. Auch durch das verstärkte Aufkommen des Online-Handels wollen die Kunden immer individuellere Produkte und dies möglichst ohne große Wartezeit, was eine Verlagerung der Verteillager näher zu den Kunden notwendig macht.

1.1 Problemstellung

In größeren Unternehmen kommen für die Lagerung von Großladungsträgern meist automatische Hochregallager zum Einsatz. Speziell die mehrfachtiefen Hochregallager weisen dabei ein sehr gutes Verhältnis von nutzbarer zu benötigter Fläche auf. Sie sind allerdings erst ab einer bestimmten Größe und einem bestimmten Durchsatz rentabel zu betreiben. In vielen Bereichen ist es aus Kosten- oder Platzgründen nicht möglich, solch eine Anlage aufzubauen. Andere automatisierte Lösungen, wie beispielsweise ein Paternosterregal für Paletten, sind ebenfalls kostenintensiv, unflexibel und liefern nicht den notwendigen Durchsatz. Dies führt oftmals zu einer personalintensiven, manuellen Lagerhaltung, die aufgrund von menschlichen Einflüssen fehlerintensiver als eine automatisierte Lösung ist.

In einem Lager kann eine hohe Flächennutzung klassisch durch das Weglassen von Gängen erreicht werden. Damit können auf gleicher Fläche mehr

Ladungseinheiten untergebracht werden. Die Zugriffszeit auf einzelne Ladungsstücke nimmt dabei jedoch zu, da die Ladungseinheiten nun teilweise nicht mehr direkt zugänglich sind. So kann es vorkommen, dass zuerst andere Ladungsträger aus dem Weg geräumt werden müssen um Zugriff auf die gewünschte Ladung zu erhalten. Hierfür müssen dann wiederum Rangierflächen vorgesehen werden, welche den Vorteil der höheren Flächennutzung zum Teil wieder aufwiegen.

1.2 Ziel der Arbeit

GridFlow ist eine Systematik für die platzsparende und kompakte Lagerung von Ladungseinheiten in einem Raster nach dem Vorbild eines Verschiebepuzzles. Dabei kann der Zugriff auf jede Ladungseinheit erreicht werden, indem durch sequenzielles Verschieben andere Ladungseinheiten aus dem Weg geräumt werden. Des Weiteren kann eine Sortierung der Ladeeinheiten erfolgen, indem sie im Raster entsprechend positioniert werden.

Ziel der Arbeit ist der Vergleich technischer Varianten für die Palettenlagerung unter Verwendung der GridFlow-Systematik. Zunächst werden hierzu verschiedene technische Varianten aufgezeigt, mit denen sich ein solches Konzept umsetzen lässt. Anhand von logistischen Größen werden diese verschiedenen technischen Ausprägungen miteinander verglichen. Zu diesem Zweck werden analytische Beispielszenarien definiert und die Vergleichsgrößen berechnet. Dadurch können für die verschiedenen Techniken Einsatzempfehlungen aufgezeigt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Als Grundlage wird im folgenden Kapitel 2 ein Überblick über die derzeitigen Möglichkeiten zur Kompaktlagerung und die dabei eingesetzte Technik gegeben. Gleichzeitig wird der Zielkonflikt zwischen Kompaktheit und Durchsatz detaillierter beleuchtet.

Kapitel 3 führt in die GridFlow-Thematik ein und zeigt die Möglichkeiten auf, die sich hieraus ergeben. Des Weiteren werden mittels Analyse bestehender, fördertechnischer Elemente generische Varianten erzeugt und eine

Systematisierung dieser vorgenommen. Diese derzeit denkbaren Lösungen werden mit ihren technischen Spezifikationen vorgestellt.

Kapitel 4 definiert die Grundlage für den Vergleich der technischen Varianten. Zunächst werden die Vergleichsgrößen erarbeitet. Zudem wird eine Notation für die Bewegungsbeschreibung definiert. Mit dieser werden die möglichen Grundbewegungen in der GridFlow-Systematik beschrieben. Weiterhin werden analytische Ausgangszustände vorgestellt, bei denen immer nur genau eine Ladeinheit entnommen wird. Anhand dieser Situationen wird der eigentliche Vergleich der technischen Varianten durchgeführt. In Kapitel 5 werden die technischen Implementierungen anhand der Vergleichsgrößen einander gegenüber gestellt und bewertet.

Kapitel 6 befasst sich mit den analytisch behandelbaren Ausgangssituation. Es werden die Spielzeiten und Durchsätze der sequentiellen Bewegungen ermittelt. Ebenso wird der energetische Aufwand der Entnahmevorgänge berechnet und in Bezug zum Durchsatz gesetzt.

In Kapitel 7 wird das Potential in Relation zum Durchsatz der Systeme aufgezeigt und zwar für den Fall, dass die Aufgaben in einem Raster parallelisiert werden. Hierzu werden analytische Überlegungen angestellt sowie weitere Entnahmevorgänge untersucht, die mit der Strategie LivePath und zufällig erstellten Szenarien simuliert wurden. Abschließend wird auf den Einsatz verschiedener technischer GridFlow Varianten für Anwendungsfälle in der Lagerhaltung eingegangen.

2 Grundlagen zur Kompaktlagerung

Ein Merkmal von Kompaktlagern ist der hohe Raumnutzungsgrad. Hierbei stehen mehrere Lagereinheiten hintereinander, entweder als Blöcke oder in Kanälen (ten Hompel und Heidenblut 2011). Dies ist vor allem dann wichtig, wenn der umbaute Raum teuer oder limitiert ist. Gerade bei energieintensiven Tiefkühlslagern werden daher beispielsweise Kompaktlager eingesetzt.

2.1 Technische Hilfsmittel für die Ein- und Auslagerung in Kompaktlagern

Die verbreitetsten Flurförderzeuge sind Gabelhubwagen, Deichselhubwagen, Hochhubwagen und Stapler (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007). Besonders geeignet sind elektrische Antriebssysteme, von denen keine Abgase und somit keine Beeinträchtigungen für das Bedienungspersonal und die Waren ausgehen (Martin 2011). Die Ladeeinheiten können dabei von denselben Fördermitteln vom Lkw auf die Pufferplätze und von dort zum nachgelagerten Prozess transportiert werden.

Gabelhubwagen sind aufgrund ihrer universellen Einsetzbarkeit weit verbreitet. Die Ladeeinheiten werden mit den Gabeln unterfahren und mittels einer mechanischen oder hydraulischen Hubvorrichtung auf eine Höhe von rund 125 mm angehoben. Dies wird über die Auf- und Abwärtsbewegung der Deichsel durchgeführt. Durch den geringen Hub können Ladeeinheiten nicht gestapelt werden. Der Antrieb erfolgt durch einen Mitarbeiter (Koether 2007).

Deichselhubwagen: Im Gegensatz zum GHW sind die Deichselhubwagen (DHW) elektrisch angetrieben.

Deichselstapler: Er bildet das Bindeglied zwischen Gabelstapler und Handhubwagen. So sind Varianten sogar in der Lage die Ladeinheit bis zu 5 m anzuheben.

Gabelstapler: Gabelstapler sind für eine breitgefächerte Anzahl von Aufgaben einsetzbar. Sie sind sowohl im Freien wie auch in geschlossenen Hallen nutzbar und stellen somit oftmals das Bindeglied zwischen Lkw-Be- und Entladung und der automatisierten Fördertechnik dar. Die Funktionalität ist ähnlich dem Gabelhubwagen, jedoch kann eine Hubhöhe von bis zu 10 m (Martin 2011) mit dem Anbau von Teleskopen erreicht werden. Dies ermöglicht eine Stapelung der Waren. Sie sind mit drei oder vier Rädern erhältlich (Martin, Römisch und Weidlich 2008). Gabelstapler sind als Ausführungen mit Elektro- und Verbrennungsmotor verfügbar.

Schmalgangstapler: Sie kommen bei Hochregalen in den Ausprägungen mit fester oder beweglicher Kabine zum Einsatz. Sie erreichen Arbeitshöhen von bis zu 15 m.

Deckenkran: Der Deckenkran stellt eine flurfreie Variante für den innerbetrieblichen Transport von Waren dar. Die Tragfähigkeit variiert je nach Bauart von einigen hundert Kilo bis zu mehreren Tonnen. Große Hallenkrane können die gesamte Produktionshalle überspannen und somit jeden Punkt erreichen. Die meisten werden mittels Kabelschlepp- oder Funksteuerung manuell bedient. Automatisierte Varianten kommen in der Praxis meist als Prozesskran für die Ver- oder Entsorgung von Produktionsprozessen zum Einsatz.

2.2 Bodenlagerung

Das Lagern der Ware auf dem Boden ist die einfachste und älteste Form der Lagerhaltung (ten Hompel, Beck und Sadowsky 2011). Hierfür werden keine Regale oder zusätzlichen Gestelle benötigt. Hinzu kommt die hohe Flexibilität auch bei schwankenden Durchsätzen. Manuelle Konzepte mit maschinellem Einsatz stellen die gängigsten Realisierungen im Warenein- und -ausgang dar (Martin 2012) (Abb. 2.1). Sie verursachen in der Regel hohe Personalkosten, die bei automatisierten Systemen entfallen. Durch den weitverbreiteten Einsatz der Fördermittel ist die Kompatibilität mit den vor- und nachgelagerten Prozessen sowie den Quell- und Zielstellen in der Regel gegeben.



Abbildung 2.1: Wareneingang (Quelle: Internet)

Bei der **ungestapelten Lagerung** werden die Ladeeinheiten direkt auf dem Boden auf einer Ebene abgestellt. Insbesondere die Zugriffszeiten sind gering, da bei einem Zugriff keine Waren oberhalb der gesuchten Einheit umgeschlagen werden müssen (Arnold und Furmans 2009). Ebenso erlaubt die ungestapelte Lagerung den Transport mit Fördermitteln, deren Hub für eine Stapelung zu gering ist wie z.B. bei Handgabelhubwagen. Ein großer Nachteil besteht in dem hohen Flächenbedarf.

In einem **Bodenblocklager** (Abb. 2.2) werden die Waren in einem geschlossenen Block nebeneinander gelagert. Hierbei lassen sich sehr hohe Raumnutzungsgrade bei geringen Investitionskosten und hoher Flexibilität hinsichtlich der Flächengestaltung erreichen (ten Hompel, Beck und Sadowsky 2011). Da keine Bediengänge eingebaut werden und die Güter unter Umständen von allen Seiten zugestellt sind, ist lediglich der Zugriff auf die obersten Ladeeinheiten der äußeren Stapel möglich, wodurch die Zugriffszeit einen entscheidenden Nachteil darstellt.

Bodenzeilenlager sind ähnlich dem Bodenblocklager aufgebaut (Abb. 2.2), werden jedoch in Zeilen angelegt. Grundsätzlich bestehen dieselben Charakteristika wie beim Bodenblocklager. Sie weisen allerdings eine schnellere Zugriffszeit und damit höhere Umschlagleistungen (Koether 2007) auf. Durch die Zwischengänge wird jedoch mehr Fläche benötigt (Arnold und Furmans 2009).

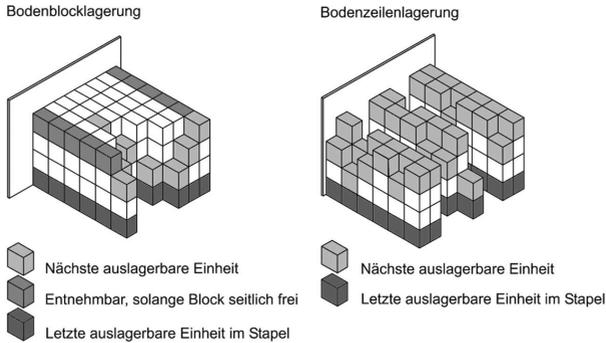


Abbildung 2.2: Bodenlagerungsarten (Quelle: Taschenlexikon Logistik)

Die Stapelhöhe ist sowohl beim Bodenblock- als auch beim Bodenzeilenlager von der Art der Ladegüter (Empfindlichkeit, Stapeldruck) sowie von der verwendeten Fördertechnik (max. Hubhöhe) abhängig.

Eine Variante der automatisierten Bodenlagerung wurde am Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik in Dortmund mit dem System **Block-It** (Abb. 2.3) entwickelt, wobei es sich um ein automatisiertes Bodenblocklager handelt. Der Vorteil liegt auch hier in der hohen Raumnutzung und der automatisierten Zugriffsmöglichkeit auf die einzelnen Paletten. Der Zugriff auf die Paletten ist jedoch entweder nach dem FIFO- oder nach dem LIFO-Prinzip möglich. Einen direkten Zugriff auf eine bestimmte Ladungseinheit kann hiermit allerdings nicht erreicht werden.

2.3 Kanallager

Bei hohen Beständen einzelner Artikel innerhalb einer Produktgruppe ist die Kanallager-Technik besonders geeignet. In einem Kanallager werden mehrere Ladeeinheiten hintereinander in sogenannten Kanälen auf Schienen positioniert und entweder mittels Schwerkraft oder spezieller Fördertechnik ein- und ausgelagert. Der Vorteil liegt, im Vergleich zu einem konventionellen Palettenhochregallager, in der höheren Raumnutzung, weshalb hier bei der Behandlung von Kompaktlagern detaillierter darauf eingegangen werden soll.

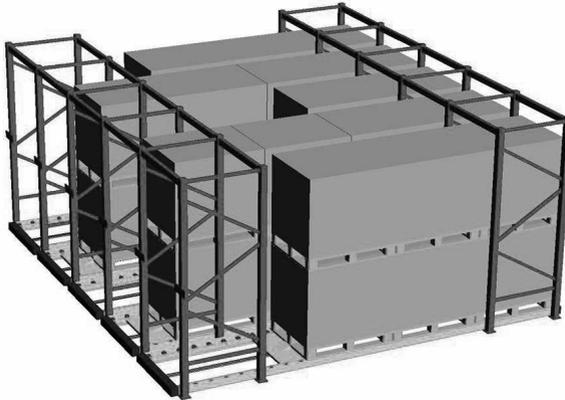


Abbildung 2.3: Block-It (Quelle: IML)

2.3.1 Durchlaufregale

Hierbei wird die Ware auf der einen Regalseite eingelagert und auf der anderen Seite entnommen (Abb. 2.4). Die Waren werden auf der einen Seite auf passive, geneigte oder auf angetriebene Rollenbahnen abgesetzt (VDI-3584 2003). Die Entnahme findet dann auf der anderen Seite statt. Solche Lager können entweder manuell mittels Stapler oder auch automatisch durch Verschiebewagen oder Regalbediengeräte bedient werden. Eingesetzt werden solche Lager als schnelle Pufferlager oder Warenausgangslager zur Warenbereitstellung oder bei Firmen mit hoher Umschlagleistung unter strenger Einhaltung des FIFO-Prinzips (Fischer und Dittrich 2004). Eine klassische Anwendungsbranche bildet die Getränke- oder Lebensmittelindustrie, da hier die Variantenvielfalt, bei gleichzeitig hohem Volumen der Güter, relativ gering ist. Die Kanallängen können dabei etliche Palettenplätze betragen. Laut Herstellerangaben werden Anlagen mit bis über 40 Plätzen hintereinander pro Kanal gebaut.

Als Variante des Durchlaufregals gibt es auch **Einschubregale**. Bei ihnen wird die Ware von derselben Seite ein- wie auch ausgelagert. Hierbei kommt das LIFO-Prinzip zum Einsatz und die Anzahl der Stellplätze pro Kanal ist geringer.

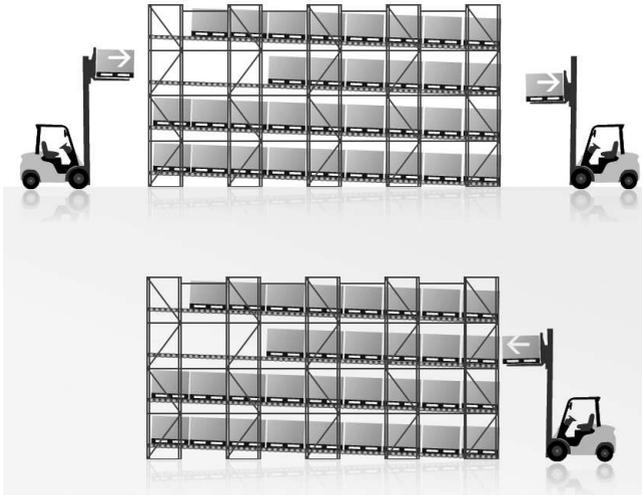


Abbildung 2.4: Durchlauf- und Einschubregal (Quelle: Interroll)

2.3.2 Satellitenlager

Das Satellitenlager stellt eine Sonderform des Kanallagers dar. Die Lagerkanäle sind hier nicht geneigt und verfügen auch nicht über eine eigene Fördertechnik wie es bei Durchlaufregalen der Fall ist. Die Ladeeinheiten, vorwiegend Paletten, werden in Kanälen auf Schienen gelagert und mittels eines Kanal- oder Satellitenfahrzeugs (Abb. 2.5) ein- bzw. ausgelagert. Das Fahrzeug unterfährt dabei die Ladeeinheit und hebt sie an, um sie an den Anfang des Kanals zu bringen. Die Arbeitsweise ist immer dieselbe. Beim Auslagern holt das Fahrzeug die erste Palette im Kanal und bringt sie für die Entnahme an die Entnahmeposition (E/A-Punkt). Beim Einlagern wird die Palette soweit wie möglich in den Kanal transportiert und dort abgestellt. Die derzeit größte Lagerungstiefe sind ca. 20 Palettenplätze hintereinander.

Wird ein Lager manuell bedient, so wird das Kanalfahrzeug durch die Zuhilfenahme von Staplern in den jeweiligen Kanal gesetzt und per Funksteuerung aktiviert. Hierbei gibt es Varianten mit und ohne Dockingstation am Anfang des Kanals. Arbeiten solche Lager vollautomatisch, so werden die



Abbildung 2.5: Kanalfahrzeug (Quelle: BitO)

Fahrzeuge mittels Regalbediengerät oder einer Kombination aus Senkrechtförderer und Verfahrwagen zu dem jeweiligen Kanal gebracht.

2.4 Verschieberegale

Die Regale werden quer zur Regalfront verschoben. Sie laufen zumeist auf Schienen und können entweder manuell oder per Antriebe bewegt werden. Dabei wird lediglich vor dem nächsten zu entnehmenden Artikel ein Bediengang frei gemacht (Abb. 2.6). Dadurch lässt sich eine sehr kompakte Lagerung erzielen. Jedoch ist der Durchsatz solcher Systeme nicht sehr hoch, weshalb sie vor allem für langsam drehende Güter oder zur Archivierung eingesetzt werden. Im Normalfall werden Lagerhöhen bis 10 m gebaut (ten Hompel und Heidenblut 2011). Die Ein- und Auslagerung bei einem Verschieberegale erfolgt meistens manuell mittels Gabelhubwagen oder Stapler. Es gibt jedoch auch vollautomatische Varianten, welche z.B. durch einen automatischen Brückenkran (VDI-3656 1998) oder einen automatisierten Schmalgangstapler bedient werden.

2.5 3D-Lager

Als neue Varianten der Kompaktlager wurden in letzter Zeit einige dreidimensionale Lagervarianten vorgestellt. Die meisten befinden sich noch in der Entwicklungs- und Testphase, wobei schon einige den Weg auf den Markt gefunden haben. Nennenswert sind vor allem Entwicklungen wie die

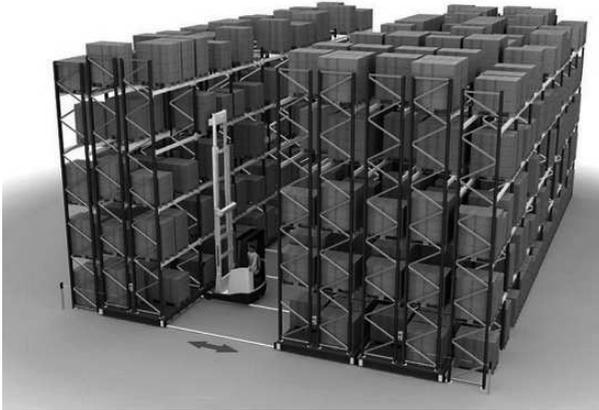


Abbildung 2.6: Verschieberegal (Quelle: Jungheinrich)

Magic Black Box von ODTN oder **SmooV ASRV** (Abb. 2.7). Zaerpour (Zaerpour 2013) hat sich mit effektiven Strategien für die Steuerung dieser Lager auseinandergesetzt. In seiner Arbeit hat er die optimale Form und Konfiguration eines solchen, von ihm genannten „Live-cube“, untersucht.

ODTH hat ein System entwickelt, welches den Zugriff auf beliebige Ladeeinheiten in einem kompakten Würfel erlaubt. Die Lagerung erfolgt dabei wie bei einem klassischen Kanallager nach dem FIFO Prinzip. Um Zugriff auf eine bestimmte Ladeeinheit zu erlangen, werden die nicht benötigten Ladeeinheiten mittels Fördertechnik umgelagert. Dazu sind an der Vorder- und Rückseite des Würfels jeweils Kombinationen aus Verfahrwagen und Liften installiert.

Bei SmooV ASRV handelt es sich um ein vollautomatisches Kanallager, welches mit Shuttles bedient wird. Die Fahrzeuge können dabei sowohl in Palettenlängs- als auch in Palettenquerrichtung fahren, was eine flexible Layoutgestaltung ermöglicht ohne zusätzliche Querverschiebewagen einplanen zu müssen. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die Fahrzeuge auch die Aufgaben einer klassischen Lagervorzone übernehmen können.

Bei den 3D-Kompaktlagern ist vor allem ein Beispiel aus dem Behälterbereich zu nennen. Die norwegische Firma Hatteland hat das System "Auto-



Abbildung 2.7: SmooV ASRV (Quelle: Internet)

Store" (Abb. 2.8) entwickelt und bereits erfolgreich auf dem Markt platziert. Hierbei bedienen autonom fahrende Roboter die in einem Würfel aufgestapelten Behälter von oben und erreichen so eine sehr große Raumausnutzung, da auf die Gassen eines Regalbediengerätes vollständig verzichtet werden kann. Hierbei wurde eine Art Kanallager mit vertikalen Kanälen aufgebaut. Die Waren werden in den Kanälen nach dem LIFO Prinzip gelagert. Muss auf einen weiter unten lagernden Behälter zugegriffen werden, so müssen die darüber stehenden Behälter umgelagert werden.

Besonders interessant sind solche Systeme für enge, verwinkelte Gebäude, denn die Lagerung der Ladeeinheiten kann sehr einfach um die bestehenden Strukturen herum erfolgen. Befindet sich beispielsweise eine Säule innerhalb der geplanten Fläche, so kann sehr leicht an dieser Stelle ein Lagerplatz ausgespart werden ohne das Regal in seiner Position verschieben zu müssen, da keine gassengebundenen Regalbediengeräte zum Einsatz kommen.

2.6 Automatisierte Ware-zum-Mann Systeme

Um die Produktivität beim Kommissionieren zu steigern, wurden in den vergangenen Jahren neue Systeme nach dem Ware-zum-Mann Prinzip entwickelt. Dabei erfolgt die Lagerung der Ware nicht mehr auf statischen Lagerplätzen, sondern auf beweglichen Gestellen. Wird ein Artikel benötigt, so transportiert ein mobiler Roboter den entsprechenden Regalabschnitt

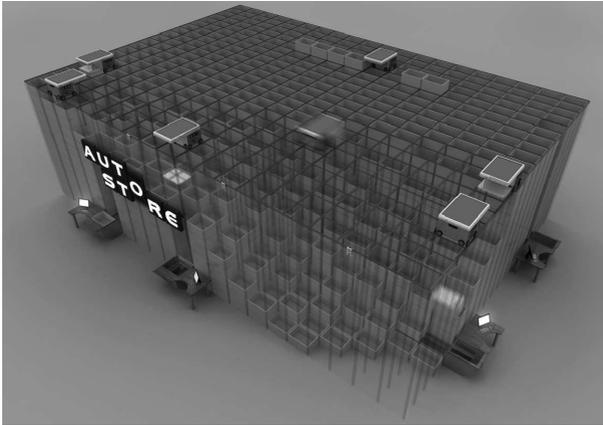


Abbildung 2.8: AutoStore (Quelle: Swisslog)



Abbildung 2.9: Kiva Mobile Fulfillment (Quelle: Kiva)

oder die benötigte Palette zum Kommissionierer. Die Roboter (Abb. 2.9) sind dabei gerade so groß, dass sie unter eine Palette passen und diese entweder mitsamt ihrem Untergestell anheben oder ziehen können. Solche Systeme bieten eine hohe Flexibilität sowie einen geringen Installationsaufwand. Erste Systeme werden laut Herstellerangaben in Europa voraussichtlich Ende 2014 in Betrieb genommen.

2.7 Kompakt oder hoher Durchsatz

Der mit Kompaktlagern zu erzielende Durchsatz hängt sehr stark vom gelagerten Artikelspektrum ab. Bei einer sehr homogenen Artikelstruktur kann mit einem Kanallager platzsparend ein hoher Durchsatz erreicht werden. Dies setzt jedoch sortenreine Kanäle voraus. Nimmt die Artikelvielfalt zu, muss daher die Anzahl der Kanäle ebenfalls zunehmen. Folglich wird die Regalf front größer und damit die Transportwege länger. Um die Transportwege bei einem breiten Artikelspektrum kurz zu halten, kann mit gemischt befüllten Kanälen gearbeitet werden. Dies hat zur Folge, dass Umlagerungsvorgänge notwendig werden können um an bestimmte Artikel zu gelangen. Nach VDI 3561 (2009), Blatt 4 (VDI-3561.4 2009) ist ein Einfachspiel für die Auslagerung bei einer Kombination aus Regalbediengerät (RBG) mit Kanalfahrzeug (KFZ) bei automatischen Kanallager-Systemen wie folgt festgelegt:

- Zyklusbeginn
- Fahrt RBG von A nach P_{1k}
- Fahrt KFZ von P_{1k} nach $P_{1k,n}$
- Übernahme LE
- Fahrt KFZ von $P_{1k,n}$ nach P_{1k}
- Fahrt RBG von P_{1k} nach A
- Abgabe LE auf Auslagerpunkt A
- Zyklusende

Die mittlere Fahrzeit des KFZ ist beim Einfachspiel einschließlich der Übernahme- und Abgabezeiten folgendermaßen definiert:

$$t_{01} = \frac{1}{2} \{t(P_{1k,1}) + t(P_{1k,n})\} \quad (2.1)$$

$P_{1k,n}$ ist dabei der Einlagerungsplatz und n die Anzahl der Stellplätze im betrachteten Kanal.

Das Lagervolumen eines Kanallagers errechnet sich aus der Anzahl der Kanäle und den Lagerplätzen pro Kanal. Je mehr Stellplätze pro Kanal vorgesehen werden, desto kompakter wird die Lagerung. Um das Lagervolumen konstant zu halten, bei erhöhter Anzahl an Kanälen, sind die Lager-

plätze pro Kanal zu verringern. Für extreme Werte nähert sich der Aufbau somit wieder dem eines klassischen Hochregals an. Es lässt sich erkennen, dass bei längeren Kanälen die mittlere Fahrzeit des KFZ zunimmt, was eine längere Zykluszeit zur Folge hat. Mithin ist ein reziproker Zusammenhang zwischen Kompaktheit und Durchsatz festzustellen.

Die möglichen Umschlagleistungen der heute gängigen Fördertechniksysteme wurden von Schumann (2008)(Schumann 2008) näher untersucht. Dabei ist er auch auf die Lagerorganisation und den daraus resultierenden Einfluss eingegangen. Da jedes Lager in Form und Größe anders gestaltet ist, kann kein einzelner Leistungswert je Technik angegeben werden. Der Durchsatz hängt vielmehr von vielen Faktoren ab. Allen voran vom verfügbaren Platz, von der notwendigen Kapazität und natürlich von den Kosten. Die hochdichten Lager (z.B. Kanallager) haben dabei im Vergleich zu weniger dichten Lagern (z.B. Hochregallager mit RBG) einen signifikant niedrigeren Durchsatz erzielen können.

3 GridFlow Konzept und technische Umsetzung

Um den Flächennutzungsgrad bei der Lagerung von Gütern zu erhöhen, haben Gue und Kim (Gue und Kim 2007) ihr Konzept des Puzzle-Based Storage veröffentlicht. Dabei sollen Güter auf kleinem Raum sehr eng, ohne explizite Verkehrswege, gelagert werden. Als Vorbild dient hier das aus Kindheitstagen bekannte Verschiebepuzzle (Abb. 3.1). Dabei müssen Kacheln durch einzelnes Verschieben in die richtige Reihenfolge gebracht werden. Gue und Kim gehen dabei auf analytische Ergebnisse ein, wenn solch ein System eine oder auch mehr Leerstellen besitzt.

3.1 Definition des GridFlow Konzepts

Der Begriff GridFlow wurde 2011 von Schwab (Schwab, Nobbe und Furmans 2011) eingeführt, um Systeme mit unstetiger von jenen mit orstfester, stetiger Fördertechnik abzugrenzen. Inzwischen dient dieser Begriff als allgemeiner Oberbegriff für die ursprünglich als Puzzle-Based Storage vorgestellte Lagerungsart, wobei Gue ursprünglich von einer Umsetzung mit orstfester Fördertechnik (Flexförderer) ausgegangen ist.

Somit ist unter GridFlow keine spezifizierte Maschine, sondern viel mehr eine Systematik für ein automatisches Materialflusssystem zur Förderung, Pufferung, Sortierung sowie Lagerung von Paletten zu verstehen, welches auf einem Raster (Grid) basiert, in dem die Ladungseinheiten angeordnet sind. Die Ladeeinheiten können jeweils in vier Förderrichtungen transportiert werden. Durch sequentielle Verschiebung der Ladeeinheiten kann auch auf jene zugegriffen werden, die nicht direkt zugänglich sind. Mögliche technische Umsetzungen müssen in der Lage sein, diese Kriterien zu erfüllen.

Durch die Automatisierung ist das System fehlerminimierend, da menschliche Einflüsse ausgeschlossen werden. Wird das System dezentral gesteuert



Abbildung 3.1: Verschiebepuzzle

(Gue und Furmans 2011), weist es auch nicht alle typischen Nachteile automatisierter Systeme auf. So ist die Funktionalität des Gesamtsystems nicht abhängig von der Funktionalität einer einzelnen Ressource. Ebenso lässt sich solch ein System durch die Einbringung weiterer Komponenten einfach erweitern oder umkonfigurieren.

3.2 Funktionsweise

Aufgrund der Anordnung der Ladeeinheiten in einem Raster wird eine hochdichte Lagerung bzw. Sortierung erzielt, da keine Gänge benötigt werden, um die Ladeeinheiten zu erreichen. Befindet sich mindestens eine Leerstelle im System, kann auf jede gewünschte Ladeeinheit zugegriffen werden. Für diesen Zugriff müssen ggf. andere Ladeeinheiten verschoben werden. Je weniger Leerstellen im System vorhanden sind, desto mehr Bewegungen anderer Ladeeinheiten müssen durchgeführt werden, um die gewünschte Ladeeinheit zu bewegen. Dies beeinflusst die Zugriffszeiten und damit den Durchsatz des Systems. Sind viele Bewegungen von Ladeeinheiten notwendig, steigen die Zugriffszeiten auf die Ladeeinheiten. Dadurch kann der Betriebspunkt des Systems sehr flexibel zwischen den beiden Extremen:

- Hochdichte Lagerung mit einer Leerstelle: längste Zugriffszeit
- Flächenintensive Lagerung mit nur sehr wenigen Ladeeinheiten: kürzeste Zugriffszeit

gewählt werden.

Die Zugriffszeiten können zusätzlich über die Parameter:

- Größe und Layout des einzelnen Rasters
- Systemgestaltung (technische Umsetzung)
- Anzahl der Fahrzeuge im Raster (je nach Variante)
- Anzahl der Übergabepunkte pro Raster
- Füllgrad des Rasters
- Position der Übergabepunkte
- Abarbeitungsstrategie der Zugriffsaufträge
- Nachschubstrategie

beeinflusst werden.

Ein GridFlow-System verfügt weiterhin über ein breites Einsatzspektrum hinsichtlich des Füllgrades und eignet sich somit für eine Vielzahl von Anwendungen. Das System ist hochflexibel hinsichtlich:

- **Durchsatz:** Durch die Wahl des Füllgrades kann das System auf den geforderten Durchsatz angepasst werden. Somit sind auch tagessgenaue Anpassungen auf den jeweiligen Bedarf möglich, ohne die Einsatzfähigkeit zu verlieren.
- **Layout:** Es ist prinzipiell jedes Layout, welches sich aus rechteckigen Einzelplätzen aufbauen lässt, möglich.
- **Wege:** Durch die Bewegung der Ladeeinheiten kann auf mehreren Wegen auf eine bestimmte Ladeeinheit zugegriffen werden, da die Ladeeinheiten Bewegungen in alle vier Richtungen der Ebene ausführen können sollen.

Insbesondere ist die Verwendung im Bereich des Wareneingangs (WE) und Warenausgangs (WA) zu betrachten. Meist wird hier noch auf eine Automatisierung verzichtet, da konventionelle Systeme nicht die notwendige Flexibilität bieten und daher nicht effizient und kostendeckend eingesetzt werden können.

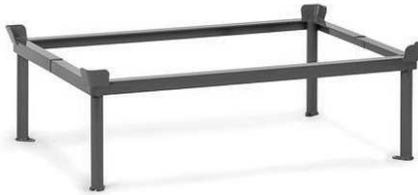


Abbildung 3.2: Palettengestell

Die Leistungsfähigkeit eines GridFlow-Systems wurde bereits mehrfach untersucht (DePuy und Taylor 2007; Furmans, Schönung und Gue 2011; Rohit, Taylor und Gue 2010). Diese Untersuchungen berücksichtigen allerdings nicht die einzusetzende Technik. Die berechneten Durchsätze sind nur theoretischer Natur, da nicht von einer bestimmten Technik ausgegangen wurde. Die hier vorgestellten Berechnungen berücksichtigen die Besonderheiten der eingesetzten Fördertechnik.

3.3 Anforderungen an die Gestaltung

Die Ausgestaltung eines GridFlow-Systems kann auf verschiedene technische Arten erfolgen. Der Transport der Ladeeinheiten kann zum einen mit klassischer Fördertechnik wie z.B. Rollenbahnen mit Quergurten oder auch mit Fahrzeugen stattfinden. Je nach Systemgestaltung sind dabei unterschiedliche Maßnahmen zu treffen, um die Randbedingungen eines solchen Systems zu erfüllen.

Um Fahrzeuge einsetzen zu können, die unterhalb der Paletten zweidimensionale Bewegungen ausführen können, ist es notwendig Paletten mit einem speziellen Ladungsträger unterzupalettieren (Abb. 3.2) oder Paletten/Gitterboxen zu verwenden, die nur über vier Füße in den Ecken verfügen. Sollen Euro-Pool-Paletten ohne eine Unterpalettierung verwendet werden, so müssen Fahrzeuge genutzt werden, die in den Palettenkanal einfahren können. Das am IFL im Jahr 2007 von Baur entwickelte Basic Intralogistic Element (BIInE) oder das am IFT im Jahr 2011 entwickelte fahrende Brett (Wehking, Vorwerk, Schröppel und Weber 2012) sind Beispiele für solche Fahrzeuge.

Um die Vielzahl der Möglichkeiten zu strukturieren und anhand der eigenen Anforderungen das beste System für die eigenen Anforderungen auswählen zu können, muss zunächst eine Anforderungsliste oder ein Lastenheft erstellt werden.

Nach Pahl, Beitz, Feldhusen und Grote (Pahl, Beitz, Feldhusen und Grote 2006) sind hier vor allem folgende Fragen zu klären:

- Welchen Zweck muss die beabsichtigte Lösung erfüllen?
- Welche Eigenschaften muss sie aufweisen?
- Welche Eigenschaften darf sie nicht haben?

In der Anforderungsliste wird bewusst nicht auf technische Lösungen eingegangen, sondern davon losgelöst die zu erfüllende Aufgabe beschrieben. Die Ausarbeitung und Umsetzung in ein technisches Produkt erfolgt später. Um diese Fragen zu klären, sind zunächst die Rahmenbedingungen abzustecken und das Einsatzspektrum festzulegen. Die hier betrachteten Varianten sollen die nach DIN EN 13698 (DIN-EN-13698 2004) spezifizierten Europaletten handhaben können. Sollen andere Ladungsträger zum Einsatz kommen, sind die Schnittstellen zu überprüfen und ggf. anzupassen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich solche Anpassungen auch auf die nachstehende Beurteilung auswirken und somit zu anderen Ergebnissen führen können. Als wichtigste Anforderung steht dabei die Umsetzung des GridFlow Konzepts. Dies bedeutet, dass sich die Ladungseinheiten auf einem Raster solange bewegen können, wie noch mindestens eine Position im Raster frei ist.

Dadurch sind folgende feste Kriterien definiert und bei der Systemgestaltung zu berücksichtigen:

- Abmaße der Last (1200 x 800 mm)
- maximale Tragfähigkeit (1000 kg)
- Aufnahmepunkte der Last
- Bewegung der Last im Raster (X- und Z-Richtung)

Darüber hinaus sind noch weitere Punkte wünschenswert: Die Installation und Inbetriebnahme soll möglichst einfach gestaltet sein. Das bedeutet, dass möglichst wenig Eingriffe in die vorhandene Infrastruktur notwendig sein sollen. Ebenso soll das System auf sich ändernde Anforderungen einfach angepasst werden können. Dies betrifft vor allem die Größe und den

Durchsatz des Systems. Des Weiteren soll das System energieeffizient für den Anwendungsfall sein.

3.3.1 Schnittstellen der Funktionsbereiche

Die Ausgestaltung der Funktionsbereiche kann nur teilweise unabhängig voneinander erfolgen. In vielen Bereichen sind Abhängigkeiten verschiedener technischer Komponenten untereinander zu berücksichtigen. Dabei sind folgende Bereiche zu beachten (ein Bereich ist nicht zwangsläufig auch mit einer technischen Komponente gleich zu setzen, da dies von der jeweiligen Ausprägung abhängt):

- Bauraum
- Unterbau / Ladehilfsmittel
- Lastaufnahme
- Fahrwerk
- Spurführung
- Energieversorgung

Der **Bauraum** ist der für den Transporteur zur Verfügung stehende Raum. Der geringste Bauraum steht bei einer Palette ohne weitere Auflagen oder Untergestelle zur Verfügung. Hierbei sind lediglich die beiden Palettenkanäle frei. Der Bauraum kann mit Hilfe von Ladehilfsmitteln oder einem Unterbau entsprechend vergrößert werden. Ein vergrößerter Bauraum bedeutet im Gegenzug jedoch wieder ein schlechteren Flächennutzungsgrad/Raumnutzungsgrad.

Mit dem **Unterbau** sind alle zusätzlichen in das System eingebrachten Installationen gemeint. Sollen Fahrzeuge zum Einsatz kommen, so kann der Unterbau statisch wie auch dynamisch sein. Ein statischer Unterbau ist mit heutigen Regalen oder fest installierten Stützen zu vergleichen. Ein dynamischer Unterbau oder auch Ladehilfsmittel ist zum Beispiel eine sich mit der Ladung mitbewegende Unterpalette, welche eine freie Bewegung der Fahrzeuge unter den Ladungseinheiten ermöglicht. Hier muss dann weiter unterschieden werden, ob es sich um ein reines Hochsetzen der Palette handelt oder um ein rollendes Gestell. Dem zur Folge ist feststellbar, dass die **Lastaufnahme** nicht unabhängig vom Ladehilfsmittel betrachtet werden kann, da eine gemeinsame Schnittstelle für die sichere Aufnahme sorgen muss.

Wird ein statischer Unterbau betrachtet, der den Lagerplatz beispielsweise nicht verlässt, auch wenn die Ladung sich bewegt, so muss unterschieden werden, ob der Unterbau selbst für den Transport der Ladung sorgt oder nur als Ablage dient. Genauso kann es aber auch eine Kombination aus statischem und dynamischen Unterbau geben. Eine Variante hierfür ist ein Schienensystem auf dem Boden zu verlegen, an dem sich Transporteure orientieren können. Dies wiederum hat direkten Einfluss auf die **Spurführung** und die Positionsbestimmung. Dementsprechend ist das **Fahrwerk** zu wählen. Es muss in der Lage sein die notwendigen Bewegungen mit der entsprechenden Genauigkeit ausführen zu können.

Bei der **Energieversorgung** muss zunächst die Art der Speicherung (Akkus oder PowerCaps) geklärt sein. Dies kann nicht losgelöst vom Bauraum geschehen, da zu klären ist wie viel Platz zur Verfügung steht. Kommt ein Schienensystem beim Unterbau zum Einsatz, kann auch über eine Energieversorgung unter Zuhilfenahme der Schienen nachgedacht werden.

3.3.2 Bauraum

Die Bodenfläche pro Stellplatz und somit auch pro Transporteinheit ist durch die Palette vorgegeben (Abb. 3.3). Da für Bewegungen unter der Palette und der Palette selbst noch Freiraum notwendig ist, schränkt dieser den Bauraum weiter ein. Die Freimaße innerhalb der Palette (Palettenkanäle) sind in der DIN EN 13698 (DIN-EN-13698 2004) definiert und werden hier übernommen. Mittels Gestellen oder Regalen kann zusätzlicher Raum unter der Ladung geschaffen werden, indem eine Transportebene vorgesehen wird. Bei höhenbeschränkten Räumen ist darauf zu achten, dass diese zusätzliche Ebene nicht zu hoch ausfällt und somit den nutzbaren Raum für die Ladung einschränkt.

3.3.3 Lastaufnahme

Die Lastaufnahme kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Die Ladung kann für den Transport entweder angehoben werden oder mittels kraft- oder formschlüssiger Verbindung gezogen werden.

Steht die Palette ohne Unterbau auf dem Boden, so bleiben als Angriffspunkte nur die beiden Palettenkanäle, wie sie auch von Gabelstaplern oder

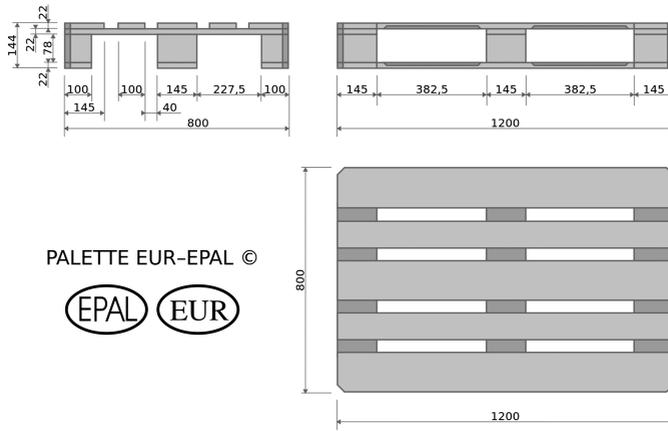


Abbildung 3.3: Abmaße Europoolpalette
(GNU Free Documentatation License)

anderer Fördertechnik verwendet werden. Dies setzt voraus, dass das Lastaufnahmemittel in diesem Bauraum vollständig Platz findet (Abb. 3.4).

Werden Untergestelle eingesetzt, so können auch andere Varianten der Lastaufnahme zum Einsatz kommen. Beispielsweise kann die Ladung zusammen mit dem Untergestell angehoben werden, wobei die Kraftansatzpunkte durch das Gestell bereitgestellt werden. Eine einfache Variante ist das Unterpalettieren der Ladung mit einer Stahlpalette, welche ein flächiges Aufliegen auf einem Hubtisch ermöglicht. Eine wichtige Voraussetzung ist dabei, dass die Verbindung zwischen Untergestell und Lastaufnahmemittel ein unabsichtliches Verdrehen der Ladung verhindert. Abhängig vom Fahrwerk kann es aber notwendig sein, dass die Ladung während der Fahrt gezielt ausgerichtet werden muss, um die Lage im Raster auch bei Richtungswechseln beizubehalten.

3.3.4 Fahrwerk

Das Fahrwerk bildet die Basis der Transporteinheit. Hier kommen sowohl Fahrtrieb, Lastabstützung und Lenkung zusammen. Gemäß VDI 4451-



Abbildung 3.4: Lastaufnahmemittel für Paletten (Quelle: Mias)

3 (VDI-4451 2000) kommen heutzutage bei innerbetrieblich eingesetzten fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) vor allem kompakte Radnabenantriebe als Fahrtrieb zum Einsatz. Ebenso werden Richtwerte für die zu erzielenden Geschwindigkeiten angegeben. Dabei handelt es sich jedoch immer um den Einsatz als klassische FTF.

Einen Überblick über die verschiedenen Antriebe liefert die VDI 2510 (VDI-2510 2005) (Abb. 3.5) sowie Ullrich (Ullrich 2011). Beide gehen dabei auch auf flächenbewegliche Antriebe ein. Im Falle von GridFlow ist eine besondere Bewegungsart notwendig. Die Möglichkeit der Rasterbewegung kann als eine Unterfunktion der flächenbeweglichen Fahrtriebe verstanden werden. Während flächenbewegliche Antriebe in beliebigen Winkeln auf der Fläche fahren können, muss bei der Rasterbewegung nur entlang der Koordinatenachsen gefahren werden. Die Fahrbewegung wird dabei entweder rewersiert oder um 90° geändert. Für die GridFlow-Systematik besteht darüber hinaus die Besonderheit, dass sich dabei die Orientierung der Ladung nicht ändern darf. Dies kann durch die Kombination zweier linienbeweglicher Antriebe zu einem Fahrtrieb oder aus Kombination von Fahrtrieb und Lastaufnahme erfolgen.

Möglich sind demnach:

- mehrere unabhängige Fahr- /Lenkeinheiten
- Differentialantrieb mit Drehachse
- Omniwheel-Antrieb (z.B. Mecanum-Antrieb)

Die Fahrwerke müssen darüber hinaus so aufgebaut sein, dass Positionskorrekturen möglich sind, um Ungenauigkeiten beim Fahren auszugleichen.

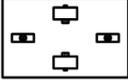
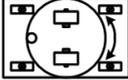
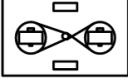
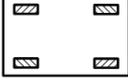
Fahrwerk	mögliche Fahrbewegung	Fahrwerk	mögliche Fahrbewegung
 <p>Dreirad</p>	<ul style="list-style-type: none"> • linienbeweglich • Geradeausfahrt und Drehen um Hinterachse • Vorzugsfahrrichtung vorwärts, Rückwärtsfahrt möglich 	 <p>mehrere unabhängige Fahr-/Lenkeinheiten</p>	<ul style="list-style-type: none"> • flächenbeweglich
 <p>Differentialantrieb</p>	<ul style="list-style-type: none"> • linienbeweglich • Geradeaus- und Rückwärtsfahrt • Drehen um Mittelachse möglich 	 <p>Differentialantrieb mit Drehachse</p>	<ul style="list-style-type: none"> • flächenbeweglich
 <p>gegenseitig gekoppelter Lenkantrieb</p>	<ul style="list-style-type: none"> • linienbeweglich • Geradeaus- und Rückwärtsfahrt • Drehen um Mittelachse möglich 	 <p>Mecanum-Antrieb</p>	<ul style="list-style-type: none"> • flächenbeweglich
<p>Symbole:</p>  <p>  Fahr-antrieb  Stütz-rolle  drehbare Stützrolle  Lenk-antrieb  Mecanum-Rad </p>			

Abbildung 3.5: Übersicht Fahrantriebe nach VDI 2510

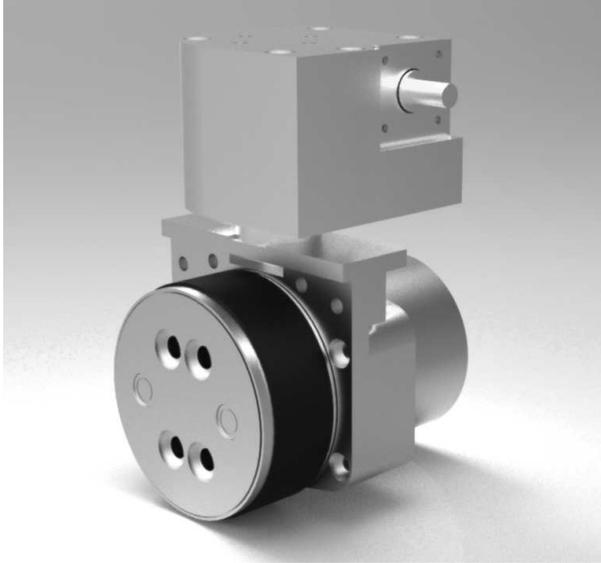


Abbildung 3.6: Fahr-/Lenkeinheit KARIS

Bei Servicerobotern, wie z.B. dem Care-O-bot des Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, kommen kleine, drehbare Antriebseinheiten zum Einsatz, um die notwendige Beweglichkeit sicher zu stellen. Dasselbe Prinzip wird auch beim Forschungsprojekt KARIS des IFL angewandt (Abb. 3.6).

Alternativ ist die Kombination zweier um 90° zueinander versetzter starrer Antriebe denkbar. Dann muss die Spurführung allerdings zwangsgeführt mittels Schienensystem erfolgen. Diese Variante kommt z.B. bei den Transportrobotern von AutoStore (siehe Kap. 2) zum Einsatz. Dies macht den Zusammenhang von Fahrwerk und Spurführung deutlich. Mithin ist die Unterscheidung in selbstlenkende Antriebe und nicht selbstlenkende Antriebe notwendig.

3.4 Technische Implementierungen

Lagern ist das geplante Unterbrechen des Materialflusses über einen bestimmten Zeitraum (VDI-2411 1970). Es dient zur Verkettung von Arbeitsschritten, die zeitlich nicht exakt aufeinander abgestimmt werden können. Nach ten Hompel und Schmidt unterteilen sich die Aufgaben der Lager in Bevorratung, Pufferung und Verteilung bzw. Sammlung von Gütern (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007). Die organisatorischen Grundfunktionen eines Lagers sind in der VDI 3629 (VDI-3629 2005) zusammengefasst.

Anhand der genannten Anforderungen kann, in Anlehnung an die Einteilung von ten Hompel, Schmidt und Nagel (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007), eine Einteilung der verschiedenen möglichen Varianten für ein Grid-Flow System im ersten Schritt nach der Lagerungsart vorgenommen werden (Abb. 3.7). Generell handelt es sich bei GridFlow um ein dynamisches Lager, da die Waren nach dem Einlagern systembedingt nicht statisch an einem Platz verbleiben, sondern je nach Verweilzeit im System durch das Raster „wandern“.

Die erste Variante ist die Lagerung auf der Fördertechnik selbst. Hierfür wird jeder Platz im Raster mit Fördertechnik bestückt, welche in der Lage ist, die notwendigen Bewegungen der Ladung durchzuführen. Alternativ hierzu ist die Lagerung auf einem Hilfsunterbau. Hierbei ist zu unterscheiden, ob es sich um ein ortsfestes oder ein mitbewegtes Untergestell handelt. Bei letzterem ist zudem die Art des Mitführens zu unterscheiden, z.B. ob die Ladung mitsamt dem Untergestell angehoben oder nur gezogen wird. Als letzte Variante ist die Lagerung direkt auf dem Boden möglich. Hierfür muss die Fördertechnik entweder vollständig im Palettenkanal Platz finden oder oberhalb der Ladung angebracht sein.

3.4.1 Lagern auf Fördertechnik

Soll ein System so aufgebaut werden, dass die Fördertechnik den Lagerplatz darstellt, so ist jeder Platz mit einem multidirektionalen Palettenförderer auszustatten. Dabei muss jeder Platz selbständig in der Lage sein, eine Palette in vier Richtungen zu befördern und entweder an ein benachbartes Modul oder an anschließende Fördertechnik zu übergeben bzw. von dort zu übernehmen. Dies geschieht nach dem Vorbild des am IFL entwickelten Flex-Förderers (Mayer und Furmans 2009; Berbig, Mayer, Furmans

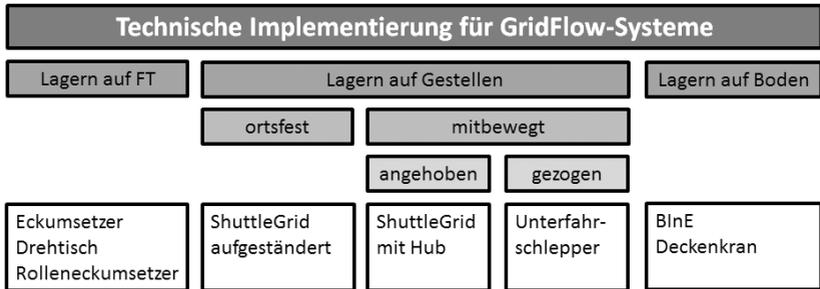


Abbildung 3.7: Systematisierung GridFlow



Abbildung 3.8: Flex-Förderer (Quelle: IFL)

und Stryja 2010) für Kleinladungsträger (Abb. 3.8). Dabei wird im Gegensatz zum Flex-Förderer keine reine Förderstrecke mit den Modulen gebildet, sondern diese werden zu einer Fläche zusammengebaut. Die für diese Aufgabe notwendige Fördertechnik ist Stand der Technik, wird allerdings bisher nur als Verzweigung, Zusammenführung oder an Kreuzungen von Sortier- und Verteilsystemen eingesetzt (Jodin und ten Hompel 2005; VDI-2340 1997). Die Kopplung vieler solcher Elemente und deren Einsatz in der Ebene nach der GridFlow-Systematik ist ein neuer Anwendungsfall.

Der Transport von Paletten erfolgt in Längsrichtung am häufigsten mit Rollenförderern. Die Rollendurchmesser liegen hierbei je nach Gewicht zwi-

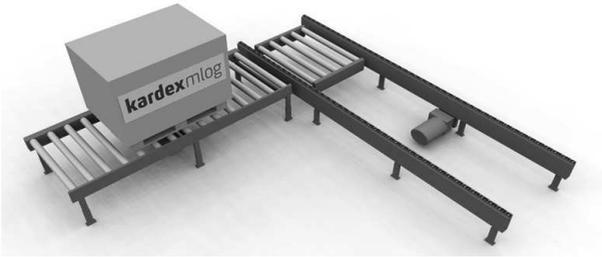


Abbildung 3.9: Eckumsetzer Rolle-Kette (Quelle: mlog)

schen 60 und 120 mm (DIN-15207 2000). Die Paletten rollen dabei auf ihren Kufen. Die Spurführung erfolgt mittels Spurkränzen auf den Rollen. Der Quertransport erfolgt meist mit Hilfe von Ketten. Dabei steht die Palette mit ihren seitlichen Füßen jeweils außen auf einer Kette auf. Bei sehr schweren Paletten kann eine zusätzliche Kette in der Mitte unterstützen. Die Geschwindigkeiten heutiger Palettenfördertechnik liegen je nach Ausführung und Gewicht der Ladung zwischen 0,2 und 0,6 m/s (VDI-4440 2007). Um ein skalierbares System zu erhalten, ist es notwendig die Einzelmodule unabhängig von einander zu belassen. Dies ermöglicht das unkomplizierte Austauschen, Erweitern oder auch das Zurückbauen einzelner Einheiten.

Paletteneckumsetzer (Abb. 3.9) Der Transport der Paletten erfolgt in Längsrichtung mittels Förderrollen aus Stahl oder per Kette. Die Förderrollen haben üblicherweise einen Durchmesser von min. 80 mm und einen Achsabstand von ca. 200 bis 300 mm. Die Palette läuft dabei auf ihren Kufen. Um die Querbewegung zu ermöglichen werden Ketten, welche in Querrichtung verlaufen, bis über das Ursprungsniveau angehoben und damit die Palette in Querrichtung transportiert. Heutige Systeme erreichen beim Umsetzen der Ladung um 90° ca. 200 LE/h. Die Orientierung der Palette wird dabei während des Quertransport nicht verändert. Typische Geschwindigkeiten liegen zwischen 0,2 bis 0,6 m/s.

Palettendrehtisch (Abb. 3.10) Alternativ können Palettendrehtische eingesetzt werden. Diese sind Rollenförderer, welche um ihre Hochachse um

min. 90° , besser 180° gedreht werden können. Damit lässt sich ein Feld von Palettenförderern aufbauen. In Längsrichtung können die Paletten wie auf normalen Rollenbahnen transportiert werden. Um eine Querbewegung durchzuführen, schwenkt der Förderer, auf dem die Palette steht, und der, auf den die Palette übergeben werden soll, um 90° zur Seite. Die Paletten können nur in Z-Richtung bewegt werden und müssen ggf. mit dem Förderer in die richtige Richtung gedreht werden. Aufgrund der notwendigen Schwenkbewegung können Durchsätze bis ca. 170 LE/h erreicht werden. Die Fördergeschwindigkeiten sind vergleichbar mit denen von Paletteneckumsetzern in der Regel zwischen 0,3 bis 0,6 m/s. Wichtig ist, dass die Orientierung der Palette bei jedem Richtungswechsel mit dem gesamten Förderer verändert wird und der Förderer sich für die nächste Palette zuerst neu orientieren muss.

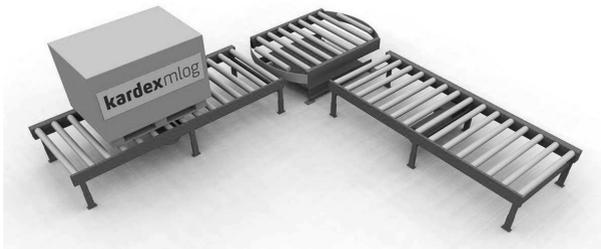


Abbildung 3.10: Palettendrehtisch (Quelle: mlog)

Rolleneckumsetzer (Abb. 3.11) Der Rolleneckumsetzer ist eine weitere Variante, um die Palette in der Ebene zu bewegen. Auf ihm können die Paletten, wie bei einem Palettendrehtisch, nur in Z-Richtung befördert werden und müssen für eine Seitwärtsbewegung gedreht werden. Anders als beim Palettendrehtisch muss der Förderer selber dabei nicht mitbewegt werden. Somit ist auch ein anschließendes Orientieren für die nächste Palette nicht notwendig. Damit können Durchsätze von bis zu 250 LE/h erreicht werden. Die Fördergeschwindigkeiten liegen bei den für Rollenförderern üblichen 0,3 bis 0,6 m/s. Die Schwenkbewegung der Palette ist normalerweise nach ca. zwei Sekunden abgeschlossen. Damit es nicht zu einem Verhaken oder Verklemmen kommt, setzt der Rolleneckumsetzer eine gute Palettenqualität voraus.

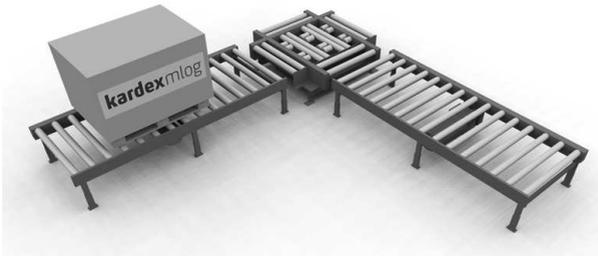


Abbildung 3.11: Rolleneckumsetzer (Quelle: mlog)

3.4.2 Lagern auf ortsfesten Gestellen

Shuttlefahrzeuge aufgeständert (Abb. 3.12) Ein ortsfestes Ständerwerk mit oder ohne Schiene bildet das Raster für das System. Die Ladung ruht dabei auf der regalähnlichen Konstruktion und kann von Transportfahrzeugen von allen Seiten unterfahren werden. Durch den Aufbau als abgeschlossenes System sind auch höhere Fahrgeschwindigkeiten möglich. Der Vorteil der Konstruktion liegt darin, dass die elektrische Versorgung der Shuttle und die Spurführung bereits in das Ständerwerk integriert werden können. Je nach Aufbau muss die Ladung nicht weiter unterpalettiert werden, so dass auf ein Leerbehälterhandling verzichtet werden kann. Die Konstruktion schränkt allerdings auch die Bewegung der Shuttle ein. Aufgrund des Aufbaus der Euro-Palette (Abb. 3.3), ist bei der Lagerung die kurze Seite vollständig zu unterstützen, um ein Durchbiegen zu verhindern. Dies kann daran hindern die geforderten Bewegungen für die GridFlow-Systematik auszuführen, da Stützen der Lagerplätze im Weg sein können. Ebenso kommt der Mehraufwand durch den Aufbau des Ständerwerks, welches das Raster bildet, bei der Inbetriebnahme hinzu. Dies erschwert den Umbau (Grote und Feldhusen 2007) und schränkt damit die Flexibilität ein.



Abbildung 3.12: SmooV ASRV im Einsatz in der Lagervorzone

3.4.3 Lagern auf mitbewegten Gestellen

ShuttleGrid mit Hub (Abb. 3.13) Die Ladung wird auf Untergestelle gesetzt, welche das Unterfahren der Ladung mit kleinen Transportfahrzeugen (Shuttle) von allen vier Seiten ermöglicht. Dabei stehen lediglich in den Ecken noch Füße auf dem Boden. Hierdurch wird der Raum unter den Paletten nicht mehr durch Querträger versperrt und die Transportshuttle können sich, auch ohne Last, frei unter den Ladungsstücken bewegen und damit die Reihen im Raster wechseln. Durch die entsprechende Gestaltung der Untergestelle ist somit auch ein System für unterschiedliche Waren, unabhängig von der Europalette, realisierbar. Denkbar sind beispielsweise auch Regalaufbauten nach dem Vorbild von Kiva. Fahrgeschwindigkeiten für solche Systeme liegen derzeit zwischen 0,5 bis maximal 1,3 m/s. Es ist jedoch zu beachten, dass ein Handling der leeren Ladehilfsmittel notwendig ist. Ebenso ist die Ladungsübergabe am Rand des Systems sicher zu stellen. Dabei muss ein sicheres Absetzen auf den Gestellen und das Herunternehmen von den Gestellen möglich sein. Dies sollte automatisch erfolgen, da sonst die Vorteile der Automatisierung an der Schnittstelle zur restlichen Anlage teilweise wieder aufgebraucht werden.

Unterfahrschlepper (Abb. 3.14) Ähnlich der ShuttleGrid Variante werden die Ladungen auf Untergestelle mit vier Standfüßen gestellt, welche hier zusätzlich mit Rollen ausgestattet sind. Dies schafft ebenfalls wieder den für die Bewegungen der Fahrzeuge notwendigen Freiraum unterhalb



Abbildung 3.13: ShuttleGrid

der Ladung. Für den Transport wird die Ladung nun aber nicht mitsamt den Ladehilfsmitteln angehoben sondern über eine Mechanik miteinander verbunden. Dies kann entweder formschlüssig oder reibschlüssig passieren. Die Rollen an den Standfüßen ermöglichen, dass die Ladung gezogen werden kann. Somit entfällt der energetisch und zeitlich aufwändige Schritt die Ladung anzuheben. Finden die Fahrbewegungen nur innerhalb des Rasters statt, so ist auch die Abschattung durch die Standfüße kein Sicherheitsproblem. Die Fahrgeschwindigkeiten sind ähnlich zu denen eines Shuttle-Systems und liegen zwischen 0,5 bis 1,3 m/s.

3.4.4 Lagern auf dem Boden

BInE (Abb. 3.15) BInE ist ein Akronym für Basic Intralogistic Element. Hierbei handelt es sich um einen von Baur am IFL entwickelten fahrenden Gabelzinken. Die BInE ist ein kleines autonomes Fahrzeug, welches gerade so breit ist, dass es in einen Palettenkanal einer Europalette einfahren kann. Die Ausführungen gelten analog für das am IFT entwickelte Doppelkufensystem.

Im Verbund von mindestens zwei Elementen kann dann eine Palette vom Boden ohne weitere Hilfsmittel angehoben und transportiert werden. Zur Nutzung dieser Technik für die GridFlow-Systematik ist keine aufwändige



Abbildung 3.14: Unterfahrschlepper (Quelle: Grenzebach)

Infrastruktur notwendig. Die Paletten stehen dabei direkt auf dem Boden, wodurch ein sehr einfaches Inbetriebnehmen und Verändern einer Anlage möglich wird. Es müssen keine weiteren Eingriffe in die Umgebung erfolgen. Die Elemente werden dabei elektronisch gekoppelt und koordiniert. Ohne Last können sich die Fahrzeuge nur entlang der Palettenkanäle bewegen und müssen, wenn keine ausreichend große Leerstelle vorhanden ist, notfalls das Grid an einer Seite verlassen um die Reihe zu wechseln. Die Fahrgeschwindigkeiten mit Last liegen bei 0,3 bis 0,5 m/s.

Deckenkran (Abb. 3.16) Eine weitere Möglichkeit, den Transport innerhalb des Rasters umzusetzen, ist der Einsatz eines schienengeführten Deckenkranes. Im Gegensatz zu einer klassischen Anordnung, bei der über dem Ladegut viel Platz bleibt und die Ladungseinheiten über dem Boden bzw. über den gelagerten Gütern transportiert wird, ist eine Anordnung des Krans knapp oberhalb der höchsten Ladung möglich, womit er auch in höhenbeschränkten Bereichen wie z.B. Schiffen einsetzbar ist.

Als Unterscheidung zu herkömmlichen, mittels Kran bedienten Lagern, muss der Kran nur eine sehr geringe Hubbewegung ausführen, da die Ladung dank der GridFlow-Systematik nicht mehr komplett über die restlichen Ladungen angehoben werden muss. Dies ermöglicht auch den Einsatz in höhenbeschränkten Umgebungen. Die Lastaufnahme muss so gestaltet



Abbildung 3.15: Basic Intralogistics Element - BiInE (Quelle: IFL)



Abbildung 3.16: Deckenkran am IFL

sein, dass im Gegensatz zu heutigen Anwendungen, die Ladung ohne großen Platzverlust aufgenommen und wieder abgegeben werden kann, was für den Einsatz eines Brückenkrans mit die größte Herausforderung darstellt (Bambynek 2001). Die Geschwindigkeiten sind bei Brückenkränen richtungsabhängig. In Schienenrichtung entlang der Halle liegen die Geschwindigkeiten zwischen 30 und 60 m/min. In Ausnahmefällen auch bei 80 m/min. Die Katzensgeschwindigkeit liegt bei 20 bis 40 m/min (VDI-3573 2010). Krane werden in unterschiedlichen Gewichtsklassen angeboten.

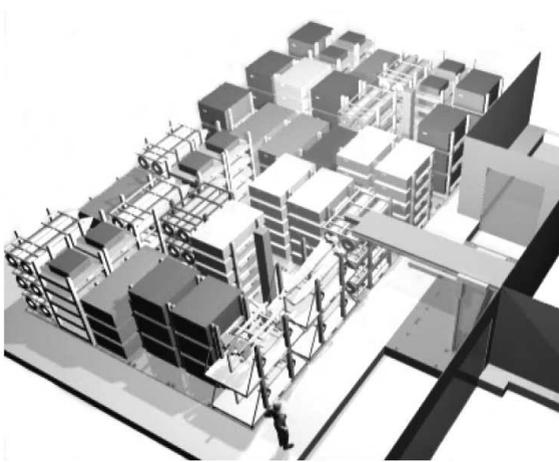


Abbildung 3.17: Navstore (Quelle: Gue)

NAVSTORE (Abb. 3.17) Alternativ hierzu wurde für die amerikanische Navy von der Firma Agile Systems Inc. das System NAVSTORE (Naval Stowage & Retrieval System) (Agile-Systems 2003) entwickelt, welches basierend auf kleinen kompakten Regalbediengeräten eine dichte Lagerung auf Schiffen ermöglicht. Technische Daten zu diesem System sind leider nicht veröffentlicht, weshalb das System der Vollständigkeit halber hier nur genannt wird, bei den folgenden Vergleichen aber keine weitere Berücksichtigung findet.

3.5 Technische Parameter der Systeme

Die technischen Parameter der verschiedenen Systeme bestimmen maßgeblich die zu erzielende Leistung. Da die aufgeführten Systeme auf bestehender Technik basieren, welche mit neuer Systematik anders eingesetzt werden, sind die relevanten Parameter gut zu ermitteln. Die Zusammenstellung stützt sich auf verschiedene Herstellerangaben, unabhängige Experten und Werte, die in der Praxis vorzufinden sind. Die aufgeführten Werte sind als Richtwert zu verstehen. Einzelne Firmen können durchaus Systeme herstellen, deren Leistungsdaten die aufgeführten Parameter überschreiten.

	beladen		leer	
	v	a	v	a
	[m/s]	[m/s ²]	[m/s]	[m/s ²]
Eckumsetzer	0,3	0,2	n.n.	n.n.
Drehtisch	0,3	0,2	n.n.	n.n.
Rolleneck	0,3	0,2	n.n.	n.n.
ShuttleGrid	0,4	0,3	1,0	0,8
Unterfahrschlepper	0,4	0,3	1,0	0,8
BInE	0,4	0,2	0,5	0,5
Deckenkran	0,3	0,1	0,3	0,1

Tabelle 3.1: Fahrgeschwindigkeiten der Varianten nach Art der Bewegung

3.5.1 Beschleunigungen und Geschwindigkeiten

Die in Tabelle 3.1 aufgeführten Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Zeiten spiegeln den derzeitigen Stand der Technik solcher am Markt befindlicher Systeme wider (VDI-2510 2005; VDI-3573 2010; VDI-4440 2007). Bei den ortsfesten Systemen kann dabei auf die Angabe der Leergeschwindigkeiten verzichtet werden, da die Systeme im GridFlow-System nur unter Last benutzt werden. Die un stetigen Systeme orientieren sich wertemäßig an bestehenden FTF und Shuttle-Systemen für den Palettenbereich. Hier ist die Unterscheidung von Lastfahrt (beladen) zu Leerfahrt (leer) von entscheidender Bedeutung, da beide vorkommen und diese großen Einfluss auf die Fahrzeiten schon bei kleinen Strecken haben.

Die Zeiten für die Handhabung der Ladung (Last) und Lenkzeiten (Lenken) sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Hierbei handelt es sich teilweise um Schätzwerte, da die Systeme derzeit zum Teil nur als Prototypen zur Verfügung stehen.

3.5.2 Bewegungsmöglichkeiten der Varianten

Die GridFlow-Systematik (vgl. Kap. 3.3) setzt voraus, dass sich die Ladungen den Regeln gemäß im Raster bewegen können muss. Die eingesetzte Fördertechnik muss in der Lage sein, diese Bewegungen abzubilden. Somit lassen sich die notwendigen Bewegungen, ohne die zusätzlichen Bewegun-

	Last auf	Last ab	Lenken
	[s]	[s]	[s]
Eckumsetzer	0,2	0,2	1
Drehtisch	0,2	0,2	3
Rolleneck	0,2	0,2	2
ShuttleGrid	3	3	2
Unterfahrschlepper	1	1	2
BInE	5	5	2
Deckenkran	5	5	1

Tabelle 3.2: Zusatzzeiten der Varianten nach Art der Bewegung

gen des Lasthandlings, auf zwei Richtungen mit jeweils zwei Ausprägungen reduzieren.

- Querfahrt
 - beladen
 - leer
- Längsfahrt
 - beladen
 - leer

Im Fall von Paletten und einem gefüllten Raster ergeben sich hieraus einige Besonderheiten. Dies liegt an dem speziellen Aufbau der Palette, welcher beim Transport beachtet werden muss. Tabelle 3.3 fasst dies zusammen. Längsfahrt meint dabei die Fahrt entlang der langen Seite der Palette und unter Querfahrt wird die dazu um 90° gedrehte Richtung verstanden.

3.5.3 Flächenbedarf

Der erforderliche Flächenbedarf je nach Variante (Tab. 3.4) ist abhängig von der notwendigen Peripherie. Bei der Lagerung direkt auf dem Boden, wie es z.B. bei der BInE möglich ist, werden nur Sicherheitsabstände zwischen den Paletten benötigt, welche den sicheren Transport der Ladung ermöglichen. Systeme mit ortsfester Fördertechnik hingegen müssen Platz für die gesamte Technik und deren Bewegung lassen. Für Varianten mit

ortsfester Fördertechnik, bei der die Paletten lediglich in Längsrichtung transportiert werden können (Tab. 3.3), bedeutet dies, dass sowohl in X- als auch in Z-Richtung des Lagers Platz für die lange Seite der Palette mitsamt der notwendigen Technik vorgesehen werden muss. Bei den Freimaßen kann eine Orientierung an der Normung für Palettenlager erfolgen (FEM-9.831 2012). Darüber hinaus liefert Martin (Martin, Römisch und Weidlich 2008) ein umfassendes Tabellenwerk mit praxisbewährten Daten.

	Querfahrt		Längsfahrt		GridFlow Bew.
	beladen	leer	beladen	leer	
Eckumsetzer	ja	n.n.	ja	n.n.	ja
Drehtisch	nein	n.n.	ja	n.n.	ja
Rolleneck	nein	n.n.	ja	n.n.	ja
ShuttleGrid	ja	ja	ja	ja	ja
Unterfahrschlepper	ja	ja	ja	ja	ja
BInE	ja	nein	ja	ja	nein
Deckenkran	ja	ja	ja	ja	ja

Tabelle 3.3: Bewegungsmöglichkeiten der FT bei Paletten

	X-Richtung	Z-Richtung	Fläche
Eckumsetzer	1,7 m	1,3 m	2,21 m ²
Drehtisch	1,7 m	1,7 m	2,89 m ²
Rolleneck	1,7 m	1,7 m	2,89 m ²
ShuttleGrid	1,4 m	1,0 m	1,40 m ²
Unterfahrschlepper	1,5 m	1,1 m	1,65 m ²
BInE	1,3 m	0,9 m	1,17 m ²
Deckenkran	1,4 m	1,1 m	1,54 m ²

Tabelle 3.4: Flächenbedarf pro Palette nach technischer Variante für den Einsatz mit Europaletten

4 Erarbeitung der Vergleichsgrundlage

Für den Vergleich der verschiedenen Systemausprägungen sind Größen zu definieren, welche sowohl den Vergleich untereinander als auch den Vergleich zu anderen Lagern ermöglichen. Dieses Vorgehen ist ähnlich zur Planung einer neuen förder-technischen Anlage, wobei auch verschiedene Systemausprägungen miteinander verglichen werden. Da es sich bei GridFlow um ein hybrides System handelt, welches fördern, lagern und sortieren soll, müssen für einen Vergleich der Techniken die Größen überprüft und ggf. angepasst werden.

Die klassische Lagerplanung, unabhängig von Neuplanung oder Lagerumbau, ist in verschiedene Planungsphasen eingeteilt. Dabei wird der Detaillierungsgrad von Stufe zu Stufe immer feingliedriger entwickelt. Je nach Literatur (z.B. Gudehus oder Martin (Gudehus 2010; Martin 2011)) unterscheiden sich die einzelnen Phasen, wobei die generelle Vorgehensweise durchaus gleich bleibt. Angefangen bei der Zielplanung, welche entweder aus einer Analyse der Ausgangssituation hervorgeht oder von einem Kundenwunsch abgeleitet wird, erfolgt zunächst die Analyse der vorhandenen Daten. Danach wird die Struktur festgelegt, dies kann z.B. mittels Wertstromdesign erfolgen. Hierauf folgt die Erarbeitung und anschließende Bewertung von Konzepten.

Nach Martin (Martin 2012) sind bei jeder Planung andere Restriktionen, Randbedingungen und Zielsetzungen zu beachten. Viele Faktoren sind dabei oftmals durch die örtlichen Gegebenheiten, Regularien oder den Kunden mit seinem Produktspektrum vorgegeben. „Die Entscheidung welche Lösung zur Umsetzung kommt hängt in den meisten Fällen von wirtschaftlichen Gesichtspunkten ab, also von der Wirtschaftlichkeitsberechnung und somit der Amortisationszeit.“ (Martin 2012)

4.1 Vergleichsgrößen

Nach Gudehus sind für den Erfolg der Planung und Realisierung die Kenntnisse der Ziele, Leistungsanforderungen und Rahmenbedingungen sowie die Handlungsmöglichkeiten entscheidend (Gudehus 2010). Da in dieser Arbeit kein konkreter Anwendungsfall untersucht und geplant wird, wie dies in der Lagerplanung üblicherweise der Fall ist, sind auch die Planungsphasen einer klassischen Vorgehensweise nicht anzuwenden. Vielmehr wird anhand von verschiedenen Größen ein allgemeiner Vergleich der unterschiedlichen Systemgestaltungen und deren Leistung vorgenommen. Hierbei gibt es objektive und subjektive Parameter.

Die objektiven Kriterien für die in Kapitel 5 angestellten Vergleiche sind Platzbedarf, Einzelspielzeit, theoretischer Durchsatz und der Energiebedarf für die entsprechende Fördertechnik. Hierbei werden für die Vergleichbarkeit Beispielszenarien ausgewertet, welche eine objektive Beurteilung erlauben. Sie können mittels Kennzahlen für eine qualitative Bewertung herangezogen werden. Ebenso kann hier eine Mindestbefriedigung als Ausschlusskriterium dienen.

Die subjektiven Parameter dienen eher der persönlichen Einschätzung und sind individuell zu bewerten. Beispielhaft ist hier die Flexibilität zu nennen, welche schwer messbar und somit auch objektiv nicht zu vergleichen ist. Heinecker (Heinecker 2006) macht hierzu einen Vorschlag bezüglich der subjektiven Kriterien. Er merkt aber auch an, dass sich bisher keine einheitliche Beschreibung hat durchsetzen können. Im Bereich der Werkzeugmaschinen und im produzierenden Umfeld ist Flexibilität schon länger thematisiert worden und die Bewertung inzwischen teilweise üblich (Nyhuis, Reinhart und Abele 2008).

Subjektive Größen (Installationsaufwand, Wandlungsfähigkeit und Wartungsaufwand) sollen in diesem Vergleich nicht zum Tragen kommen. Im Hinblick darauf, dass derzeit kein vergleichbares System am Markt zu finden ist, sind an dieser Stelle auch keine Aussagen über Invest- und Betriebskosten möglich.

4.1.1 Platzbedarf

Die Fläche im Warenein- und Warenausgang kann in Lagerfläche, Pufferfläche und Verkehrsfläche getrennt werden. Es ist dabei zu beachten, dass die Flächendimensionierung auf die höchste zu erwartende Warenmenge ausgelegt ist, um auch Zeiten hohen Durchsatzes abzudecken. Verkehrsflächen ermöglichen den Zugriff auf die Waren und befinden sich im Falle eines Bodenblocklagers nur an den äußeren Kanten der Fläche oder trennen die Güter durch Gänge bei Bodenzeilenlagern. Die Gangbreite bestimmt dabei die Breite der Verkehrsflächen und damit den Abstand zwischen anliegenden Lagerzeilen. Nach Martin (Martin 2011) u.a. wird die Breite der Gänge durch folgende Faktoren festgelegt:

- Fördermittel (z.B. Handgabelhubwagen, Stapler, FTS)
- Ladeinheit und Ladehilfsmittel (z.B. Palette)
- Sicherheitsabstand (z.B. 200 mm)

In der VDI 2198 und VDI 2199 (VDI-2198 2002; VDI-2199 2012) sind entsprechende Formeln zur Berechnung der Gangbreiten für diverse Flurförderzeuge angegeben.

Für den Vergleich wird hingegen nur der Flächenbedarf für das GridFlow-System selbst (die Fördertechnik) berücksichtigt. Also nur die besetzten und unbesetzten Lagerplätze im Raster. Absperrzäune, weitere notwendige Verkehrswege für die Versorgung und sonstige Einrichtungen bleiben unberücksichtigt, da es sich lediglich um fiktive Layouts handelt und sie für alle Systeme mit gleichen Anforderungen als vergleichbar aufwändig angesehen werden.

4.1.2 Spielzeit

Bei der Spielzeit handelt es sich um die zeitliche Summe aller Vorgänge, die notwendig sind, um eine Ladungseinheit beispielsweise in einem Hochregallager entweder aus- oder einzulagern. Die Spielzeit kann auch als Zugriffszeit auf einen Ladungsträger gesehen werden. Da die einzelnen Spielzeiten je nach Lagerplatz variieren, wird normalerweise von der mittleren Spielzeit gesprochen (Lippolt 2003).

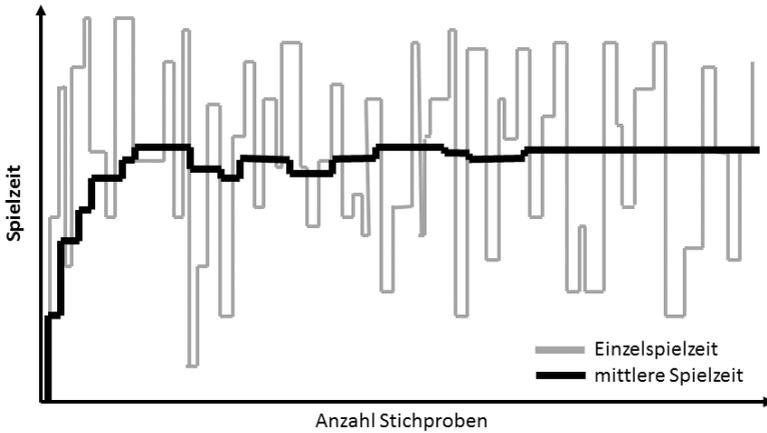


Abbildung 4.1: Berechnung der mittleren Spielzeit eines RBGs (Quelle: Arnold und Furmans 2009)

$$t_{s,(n)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{s,i} \quad (4.1)$$

Die Ermittlung der mittleren Spielzeit erfolgt oftmals durch Stichproben. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Anzahl n der Stichproben nicht zu klein gewählt wird (siehe Abb. 4.1), da sonst Ausreißer nicht ausgeglichen werden können.

4.1.3 Durchsatz

Der Durchsatz ist ein wichtiges Kriterium zur Auslegung eines Lagerbereiches. Er ist, im Gegensatz zu anderen Größen, oftmals ein Faktor, der durch den Kunden vorgegeben wird und vom Anlagenbauer zu erfüllen ist. Der geforderte Durchsatz und damit verbundene Schwankungen geben somit die Leistung an, die ein System zu erfüllen hat.

Nach Arnold und Furmans (Arnold und Furmans 2009) berechnet sich der Durchsatz einer Förderstrecke im einfachsten Fall mit:

$$\lambda = \frac{v}{s} \quad (4.2)$$

v ist dabei die Geschwindigkeit der Fördereinheit und s der Abstand der Fördereinheit (Freiraum zwischen FEs + Länge FE) zueinander. Für Unstetigförderer kann der Durchsatz über die mittlere Spielzeit berechnet werden (Arnold, Isermann, Kuhn, Tempelmeier und Furmans 2008).

$$\lambda = \frac{1}{t_s} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{s,i}} \quad (4.3)$$

Der Durchsatz bei einem rasterbasierendem System wie GridFlow hängt dagegen von mehr als nur der Geschwindigkeit und dem Abstand der Ladungseinheiten (LE) zueinander ab. Interessant ist im Fall von GridFlow wie viele LE pro Zeiteinheit durch das System bearbeitet werden können. Die Zeit, welche die LE dabei im System benötigt (Einzelzugriffszeit oder Reaktionszeit) ist teilweise losgelöst hiervon. Je nach Füllgrad des Systems erfolgt der Zugriff auf eine bestimmte LE nicht direkt, sondern es müssen zunächst andere LE verschoben werden. Je nach Strategie und Füllgrad können sich die Systemdurchsätze unterscheiden.

4.1.4 Wirkungsgrad, energetisch

Der Wirkungsgrad ist eine dimensionslose Größe, welche die Energie in Relation setzt:

$$\eta = \frac{P_{\text{Nutzen}}}{P_{\text{Aufwand}}}$$

Eine anschauliche Darstellung bietet ein Sankey Diagramm. Dabei werden unterschiedliche Ströme gemäß ihrem Anteil am Gesamtstrom mit mengenproportional dicken Pfeilen sichtbar gemacht. So können Energie- oder Materialflüsse veranschaulicht werden. Ein einfaches Beispiel ist die Glühlampe, welche eine elektrische Anschlussleistung von 100% hat, wovon lediglich ca. 5% in Licht umgesetzt wird. Die restliche Energie geht in Form von Wärme verloren (Abb. 4.2).

Bei der Gestaltung bzw. der Konstruktion eines technischen Systems ist immer ein möglichst hoher Wirkungsgrad anzustreben, da Verluste in der Regel durch Reibung entstehen und somit als Wärme abgeführt werden

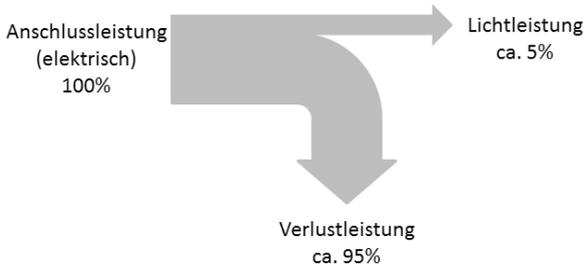


Abbildung 4.2: Wirkungsgrad einer Glühlampe

müssen. Ebenso kann bei einem hohen Wirkungsgrad die Anschlussleistung gering gehalten werden. Nach Pahl, Beitz, Feldhusen und Grote (Pahl, Beitz, Feldhusen und Grote 2006) handelt es sich beim Konstruieren um einen Optimierungsprozess mit gegebenen Zielsetzungen und sich zum Teil widersprechenden Bedingungen.

Im Fall eines GridFlow-Systems bedeutet dies beim Gesamtsystem z.B. die generelle Frage zu klären, wie das Einzelelement mit den unterschiedlichen Bedingungen der Leistung und der Kosten aufgebaut ist. Eine Palettenhubvorrichtung lässt sich beispielsweise auf unterschiedliche technische Arten umsetzen. Eine gängige Variante im Bereich der Palettenfördertechnik ist das Anheben mittels Nocken. Dies setzt einen kräftigen Motor samt Getriebe voraus. Die gleiche Aufgabe kann jedoch auch mit einem Spindeltrieb durchgeführt werden. Da die mechanische Übersetzung deutlich größer ist, kann auf einen kleineren und günstigeren Motor zurückgegriffen werden. Gleichzeitig bedeutet die hohe mechanische Übersetzung aber auch einen geringeren Wirkungsgrad und macht sogar im Extremfall die Energierückgewinnung beim Absenken der Last aufgrund der Selbsthemmung unmöglich.

Da der Wirkungsgrad eines Systems von der technischen Ausgestaltung und hierbei von vielen kleinen Details abhängt, soll lediglich von der mechanisch zu verrichtenden Arbeit ausgegangen und die mechanischen und elektrischen Verluste nicht berücksichtigt werden. Durch das konsequente Weglassen des Wirkungsgrades wird zwar das reale Ergebnis verfälscht, nicht aber die Verhältnisse der Systeme zueinander.

4.1.5 Energetischer Aufwand

Die Berechnung der notwendigen Energie für ein GridFlow-System unterliegt verschiedenen Restriktionen. Mittels der Mechanik kann jeder Einzelbewegung einer hierfür notwendige mechanische Leistung zugeordnet werden und somit ein Leistungsschrieb $P(t)$ über die Gesamtbewegung ermittelt werden. Dies ermöglicht eine erste Abschätzung über das zu erwartenden energetischen Aufkommen in einem System. Analog zum Platzbedarf werden hier nur das GridFlow-System ohne Peripherie betrachtet. Um den Fehler in der Abschätzung klein zu halten sind die veränderlichen Größen der verschiedenen technischen Ausführungen möglichst genau zu erfassen.

Je nach ausgeführter Variante können unterschiedliche Bewegungsstrategien zu einem besseren energetischen Ergebnis führen. So ist zu Beginn noch nicht klar, wie groß der Einfluss einer möglichen Hubbewegung auf die Gesamtenergiebilanz ist. Entscheidend ist auch, dass die energetische Grundbelastung eines Systems nicht vernachlässigt wird. Die Steuerungen, Kommunikationsschnittstellen und Sensoren verbrauchen permanent Energie, welche als Grundlast auf die aus der Bewegung stammenden Leistungsaufnahme addiert werden muss. Von daher ist ebenfalls zu überlegen, wie viele Elemente (FTF oder Stetigförderer) pro Raster parallel zum Einsatz kommen. Dies wird insbesondere dann interessant, wenn das GridFlow-System auch zum Lagern von Waren eingesetzt werden soll und eventuell längere Zeit keine oder nur sehr eingeschränkte Bewegungen stattfinden.

GridFlow mit unetstetiger Fördertechnik Wird eine Konstellation mit unetstetiger Fördertechnik gewählt, so kann der Energieverbrauch der Einzelbewegungen der Fahrzeuge addiert werden, um auf die Gesamtbilanz zu kommen. Da die Bewegungen unabhängig von einander erfolgen, ist diese Vereinfachung zulässig. Jeder Einzeltransport trägt in seinem vollen Umfang zur Gesamtenergiebilanz bei. Hierfür ist eine genaue Kenntnis über die Bewegungen notwendig. So muss zwischen Leerfahrt und beladener Bewegung unterschieden werden, wird die Ladung angehoben oder nicht, welche Lenkbewegungen sind notwendig und in welcher Zeit läuft der Vorgang ab. Je nach System kann eine Leerfahrt durchaus mit höherer Geschwindigkeit erfolgen als der Transport eines Ladungsträgers. Werden weitere Überlegungen angestellt, ist es sogar denkbar die Fahrgeschwindigkeit der jeweiligen Beladungssituation anzupassen und leichte Ladungsträger, im

Vergleich zu schweren, schneller oder unstabile, im Vergleich zu stabilen langsamer zu bewegen.

Die Hubbewegung der Varianten, welche die Ladung anheben, kann als Arbeit gegen die Erdbeschleunigung modelliert werden. Der Einfluss der Mechanik muss in einem ersten Schritt mittels Wirkungsgrad abgeschätzt werden, da dieser je nach technischer Gestaltung unterschiedlich stark ausfallen kann. Dies gilt auch im Besonderen für eine mögliche Energierückgewinnung beim Absenken der Last. Ein möglichst direkter Kraftfluss ohne große Getriebestufen ist hierbei von Vorteil.

GridFlow mit ortsfester Fördertechnik Wird für das GridFlow-System ortsfeste Stetigfördertechnik ähnlich der eines Flexförderers eingesetzt, so lassen sich die Grundbewegungen um die Komponente der Leerfahrten reduzieren. Denn hierbei können die Ladungsträger stets direkt bewegt werden. Zudem sind die Bewegungen nicht mehr so leicht isoliert voneinander zu betrachten. Der Aufbau mittels ortsfester Fördertechnik bietet den entscheidenden Vorteil die Bewegungen zu parallelisieren und für mehrere Ein- und Auslagerungsvorgänge gemeinsam zu nutzen. Dadurch kann eine deutlich größere Anzahl an Ladungsträgern auf einmal bewegt werden, im Vergleich zu einer Ausführung mit unstetigen Transportfahrzeugen. Der Koordinationsaufwand in der Steuerung ist in diesem Fall allerdings höher. Am IFL wurden bereits erste Untersuchungen zum Energieverbrauch in Lagern und Kommissionierbereichen (Braun, Linsel, Schönung und Furmans 2012) gemacht auf deren Ergebnisse aufgebaut werden kann. Dabei wurden Messungen an Regalbediengeräten und unterschiedlichen Stetigförderern für Kleinladungsträger durchgeführt.

4.2 Grundbewegungen im Raster

Um eine einheitliche Darstellung zu erhalten, müssen zu Anfang einige Begriffe und deren Bedeutung eingeführt werden. Die einheitliche Notation vereinfacht die Darstellung und sorgt für ein einheitliches Verständnis. Da es sich um Bewegungen in der Fläche handelt, kann eigentlich nicht von horizontalen und vertikalen Bewegungen gesprochen werden. Aufgrund der einfacheren Darstellung wird dies hier dennoch gemacht, wobei horizontal

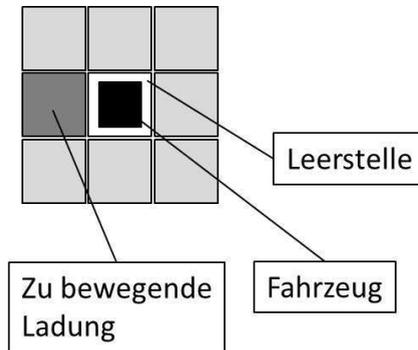


Abbildung 4.3: Element im Raster

für eine Bewegung in der Ebene von links nach rechts und vertikal für eine Bewegung in der Ebene von oben nach unten steht.

4.2.1 Definition der Einzelbewegungen

Das Raster selbst ist in Form von quadratischen Feldern mit unterschiedlichen Schattierungen in Anlehnung an die Darstellung von Schwab (Schwab, Nobbe und Furmans 2011) dargestellt. Die belegten Felder im Grid sind grau eingefärbt. Die zu bewegende Ladungseinheit ist dabei als großes dunkles Quadrat definiert. Das Transportfahrzeug, nur bei Systemen mit unstetiger Fördertechnik, ist ein kleineres schwarzes Quadrat. Die Leerstellen sind weiß (Abb. 4.3).

Jede Bewegung wird dabei von der transportierenden Fördertechnik ausgeführt. „H“ steht für eine Bewegung in horizontaler und „V“ für eine Bewegung in vertikaler Richtung. Die Bewegung wird dann mittels Index genauer spezifiziert. Angefangen mit einer Zahl, welche die Entfernung in Feldern des Rasters angibt. So bedeutet eine „2“, dass sich die Bewegung über zwei Felder hinweg erstreckt (Abb. 4.4). Danach steht für die Fahrzeugbewegungen, bei unstetiger Fördertechnik, entweder „voll“ oder „leer“. Dies erklärt, ob es sich dabei um eine Lastfahrt, also beladen, oder um eine Leerfahrt handelt. Für Systeme mit ortsfester Fördertechnik werden alle „leer“-Anteile, sei es Zeit oder Energieaufwand, auf null gesetzt, da

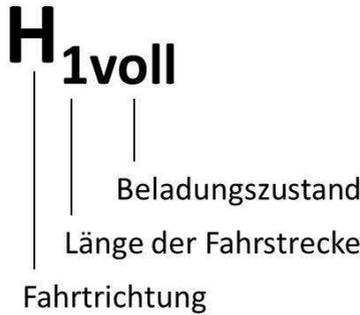


Abbildung 4.4: Notation Fahrbewegung

H_{1voll}	horizontale Fahrt über ein Feld, beladen
V_{3leer}	vertikale Fahrt über drei Felder, unbeladen
L	Lenkbewegung
Auf	Aufnehmen der Ladung
Ab	Abgeben der Ladung

Tabelle 4.1: Notationsbeispiele für die Bewegungsbeschreibung

diese Bewegungen hier nicht vorkommen. Mechanisch betrachtet beginnt eine Einzelbewegung immer mit einem Beschleunigungsvorgang und endet mit einer Verzögerung.

Zusätzlich zu den reinen Fahrbewegungen müssen Lenkvorgänge und Zeiten für das Aufnehmen und Abgeben der Ladung bei den Bewegungen berücksichtigt werden. Lenkvorgänge werden mit einem „L“ gekennzeichnet. Das Aufnehmen der Ladung wird mit „Auf“ und das Abgeben der Ladung mit „Ab“ notiert. Beispiele für die Notation sind in Tabelle 4.1 gegeben.

Die so definierten **Einzelbewegungen** bilden die Grundlage für die eigentlichen **Grundbewegungen** im Raster. Dabei setzen sich die Grundbewegungen aus unterschiedlichen Einzelbewegungen zusammen.

Die Notation ist unabhängig von der technischen Variante. Bei der Auflistung der Bewegungen geht es ausschließlich um die Art, Richtung und

Anzahl der einzelnen Bewegungen. Je nach technischer Variante kann dies andere Zeiten für die jeweilige Bewegung bedeuten (siehe Kapitel 5).

Die Grundbewegungen haben Gue und Kim (Gue und Kim 2007) bereits ausführlich beschrieben. Jedoch geht er dabei nicht auf die zu verwendende Fördertechnik ein. Gue geht davon aus, dass alle im System befindlichen Elemente zu jeder Zeit, wenn sich eine Leerstelle in direkter Nachbarschaft befindet, bewegt werden können. Die von ihm entwickelten Bewegungen wurden zunächst von Schwab (Schwab, Nobbe und Furmans 2011) für Bewegungen mit Fahrzeugen weiterentwickelt. Hierbei wurde allerdings noch nicht auf die Besonderheiten von un stetiger Fördertechnik Rücksicht genommen und von sequentiellen Bewegungen ausgegangen. Dabei dauert jeder Bewegungsschritt gleich lang, unabhängig von der Richtung. Auch werden Bewegungen über mehrere Felder im Raster in Bewegungen von Feld zu Feld aufgeteilt.

Die nachfolgenden Bewegungsmuster, die Grundbewegungen, setzen das freie Fahren des Transportfahrzeuges sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung unterhalb der Paletten voraus. Dies bedeutet, dass die gezeigten Bewegungsmuster nicht ohne weitere Anpassungen auf die technische Variante der BInE anzuwenden ist. Für die Varianten mit festinstallierter Einzelplatzfördertechnik werden durch die betrachteten Grundbewegungen die technischen Möglichkeiten (Block Movement (Gue und Kim 2007)) nicht vollständig ausgereizt. Diese Besonderheiten würden eine weitere Verbesserung der Zugriffszeiten und des Durchsatzes zur Folge haben. Da bei diesen theoretischen Betrachtungen jedoch nicht alle möglicherweise auftretenden Randbedingungen berücksichtigt werden können, wird diese Vereinfachung im Rahmen des Vergleichs vorgenommen.

Die für den Vergleich interessanten Einzelspiele, die für das Auslagern einer bestimmten Palette notwendigen Bewegungen, ergeben sich dann wiederum aus den Grundbewegungen. Im Folgenden sollen diese näher betrachtet werden.

4.2.2 Verschieben einer Leerstelle, 3-move

Um eine Leerstelle ein Feld zu verschieben, sind verschiedene Bewegungen notwendig. Der von Gue und Kim beschriebene „single-Move“ bedarf mit Fahrzeugen bereits drei Bewegungen und wird von Schwab als 3-move (Schwab, Nobbe und Furmans 2011) eingeführt. Weiterhin muss bei La-

dungen mit einem Seitenverhältnis ungleich eins noch die Unterscheidung in horizontaler und vertikaler Richtung gemacht werden. Die Anzahl der Bewegungen ist zwar gleich, jedoch ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Längen andere Zeitanteile. Hinzu kommen noch die notwendigen Bewegungen der Lastaufnahme und Lastabgabe, welche weder Gue und Kim (Gue und Kim 2007) noch Schwab (Schwab, Nobbe und Furmans 2011) in ihren Modellen berücksichtigt haben. Ebenso wurde bis jetzt nicht zwischen Lastfahrt und Leerfahrt unterschieden.

Die in Abbildung 4.5 dargestellte Bewegung des 3-move setzt sich somit aus den Komponenten der Fahrbewegung (fahren) und die zur Lastaufnahme (Last) notwendigen Bewegungen zusammen. Eine Lenkbewegung wird dabei nicht benötigt, da es sich bei den Richtungswechseln immer um eine Bewegungsumkehr um 180° handelt:

$$3move_H = 3move_{fahrenH} + 3move_{Last} \quad (4.4)$$

$$3move_V = 3move_{fahrenV} + 3move_{Last} \quad (4.5)$$

Für den 3-move muss eine Ladungseinheit einmal aufgenommen und einmal wieder abgegeben werden. Damit ergibt sich:

$$3move_{Last} = Auf + Ab \quad (4.6)$$

Die notwendigen Fahrbewegungen (um eine Leerstelle zu verschieben und danach für die nächste Bewegung wieder in der selben Ausgangslage zu sein) sind dann das Fahren von der Leerstellenposition unter die Ladung in die Richtung, inwelche die Leerstelle verschoben werden soll. Anschließend das Fahren mit der Ladung zurück auf die Position der Leerstelle und danach das Fahren ohne Last auf die Position der verschobenen Leerstelle:

$$3move_{fahrenH} = 2 * H_{1leer} + H_{1voll} \quad (4.7)$$

$$3move_{fahrenV} = 2 * V_{1leer} + V_{1voll} \quad (4.8)$$

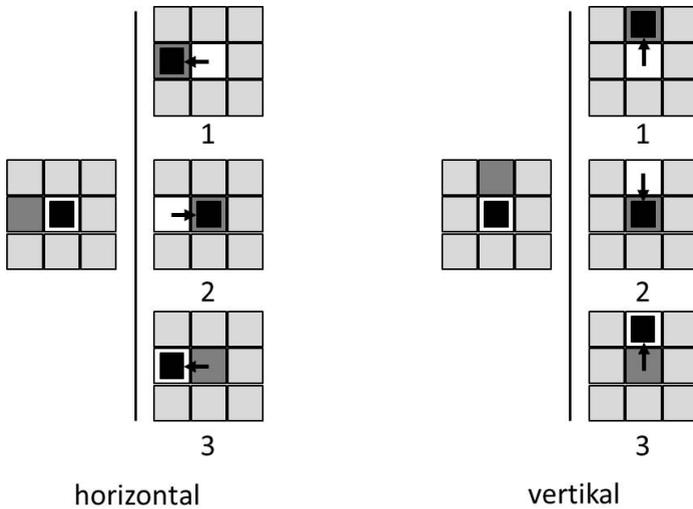


Abbildung 4.5: 3-move

Daraus ergeben sich die notwendigen Bewegungen zu:

$$3move_H = 2 * H_{1leer} + H_{1voll} + Auf + Ab \quad (4.9)$$

$$3move_V = 2 * V_{1leer} + V_{1voll} + Auf + Ab \quad (4.10)$$

4.2.3 Verschieben einer Leerstelle um n Positionen, n-move

Muss eine Leerstelle um mehr als eine Stelle verschoben werden, liegt die Vermutung nahe dieses durch mehrfaches Wiederholen des 3-move durchzuführen. Bei den bisherigen Simulationsmodellen (Gue und Schwab) ist dies zutreffend, da bislang immer von Einzelschritten ausgegangen wurde:

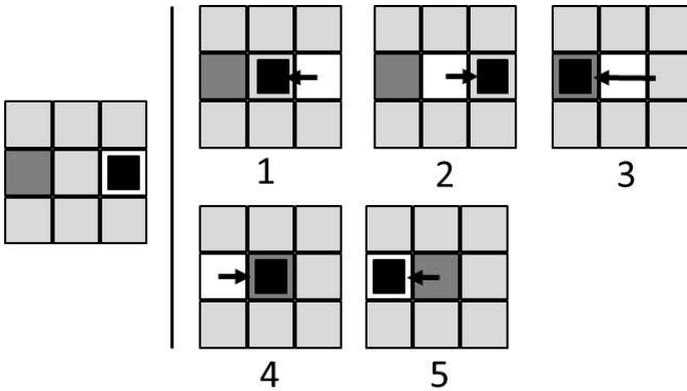


Abbildung 4.6: Verschieben der Leerstelle um zwei Positionen mittels n -move

$$n * 3move_H = n * (2 * H_{1leer} + H_{1voll} + Auf + Ab) \quad (4.11)$$

$$n * 3move_V = n * (2 * V_{1leer} + V_{1voll} + Auf + Ab) \quad (4.12)$$

Wird nun aber ein technisches System betrachtet, so erfolgt beim Verschieben der Leerstelle um zwei Positionen zweimal hintereinander eine Bewegung um eine Position in dieselbe Richtung. Schritt 3 in Abbildung 4.6 verdeutlicht dies. Fahrtechnisch bedeutet dies, dass das Fahrzeug zweimal beschleunigt würde. Sinnvoller ist es jedoch, die Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit länger beizubehalten und nur einmal kurz vor Erreichen der Endposition zu verzögern. Durch diese Koppelung der Bewegungen werden aus zwei Einzelbewegungen eine Doppelbewegung, mit der Konsequenz jeweils eine Beschleunigung und eine Verzögerung einzusparen.

Wird dies nun weiter für das Verschieben einer Leerstelle um n-Positionen entwickelt, so ergibt sich folgendes Schema für den n-move:

$$\begin{aligned}
 nmove_H &= 2 * H_{1leer} \\
 &+ n * (H_{1voll} + Auf + Ab) \\
 &+ (n - 1) * (H_{2leer})
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

$$\begin{aligned}
 nmove_V &= 2 * V_{1leer} \\
 &+ n * (V_{1voll} + Auf + Ab) \\
 &+ (n - 1) * (V_{2leer})
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

Bei der Betrachtung des Ganzen für n=1 ergibt dies wieder den ursprünglichen 3-move, womit der n-move nur eine Erweiterung des ursprünglichen von Schwab entwickelten 3-move darstellt.

4.2.4 Versetzen einer Ladungseinheit, 14-move

Das Verschieben einer Ladungseinheit setzt sich dann aus dem wiederholten Verschieben einer Leerstelle und dem Umsetzen der Ladungseinheit zusammen. Ausgehend davon, dass sich das Fahrzeug unterhalb der zu verschiebenden Ladungseinheit befindet, wird aus dem von Gue und Kim (Gue und Kim 2007) beschriebenen 9-move der von Schwab (Schwab, Nobbe und Furmans 2011) beschriebene 15-move. Dabei beschränken sich die Modelle bisher auch nur auf die reine Anzahl der notwendigen Fahrbewegungen des Fahrzeuges. Auch hier gibt es keine Unterscheidung der Richtung und in Bezug auf beladen sein oder leer fahren. Ebenso werden die notwendigen Bewegungen zum Aufnehmen und Abgeben der Last sowie die Lenkbewegungen bisher vernachlässigt.

Der technische Bewegungsablauf, bei dem eine Ladungseinheit um eine Position im Raster verschoben wird, muss von daher stärker differenziert werden, um den Anforderungen gerecht zu werden. Exemplarisch für das Verschieben einer Ladungseinheit in horizontaler Richtung wird dies genauer erläutert.

Der 15-move in horizontaler Ebene setzt sich aus neun Bewegungen in horizontaler Richtung und sechs Bewegungen in vertikaler Richtung zusammen.

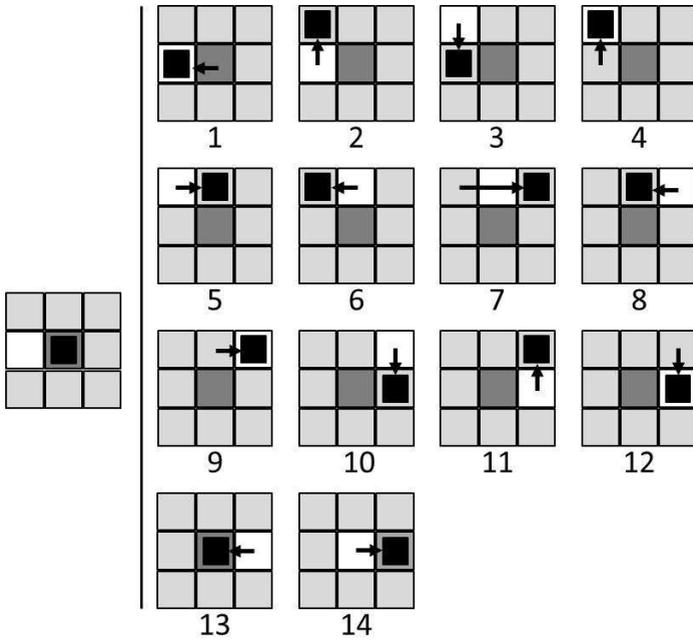


Abbildung 4.7: 14-move

Dabei können die Bewegungen noch weiter in Lastfahrten und Leerfahrten aufgeteilt werden. Bezugnehmend auf das Bewegungsmuster aus Abbildung 4.7 ist zu erkennen, dass sich die in Schritt sieben dargestellte Bewegung über zwei Felder erstreckt. Somit verringert sich der ursprüngliche 15-move zu einem 14-move mit Fahrten über mehrere Felder. Dies ist unabhängig von der technischen Ausprägung sinnvoll, da so unnötiges Abbremsen und Beschleunigen vermieden wird:

$$\begin{aligned}
 14move_{H,fahren} &= 4 * H_{1leer} + H_{2leer} + 3 * H_{1voll} \\
 &+ 4 * V_{1leer} + 2 * V_{1voll}
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Hierzu kommen jetzt die notwendigen Bewegungen um die Richtung zu wechseln sowie die Ladung zu handhaben.

Bei den Richtungswechseln wird davon ausgegangen, dass die ursprüngliche Fahrtrichtung in der zu transportierenden Richtung liegt. Diese Annahme ist zulässig, da die letzte Bewegung in einem 14-move in die angestrebte Richtung geht. Wird nun davon ausgegangen, dass die eine spezielle Ladung nicht bloß um eine Stelle verschoben wird, so ist eine Aneinanderreihung von mehreren 14-moves um diese Ladung zu bewegen erforderlich. Der Fehler, der hierdurch eventuell am Anfang auftreten kann, entspricht einer Lenkbewegung für den gesamten Vorgang. Bei der konservativen Gestaltung der Formel wird zu Beginn der Gesamtbewegung eine weitere Lenkbewegung berücksichtigt, da nicht bereits von der richtigen Orientierung ausgegangen werden kann:

$$14move_{lenken} = 4 * L \tag{4.16}$$

Die notwendigen Bewegungen für die Lasthandhabung sind einfach zu ermitteln. Da alle beteiligten Ladungseinheiten bewegt werden müssen und es sich dabei um fünf Ladungen (Schritte zwei nach drei, fünf nach sechs, sieben nach acht, zehn nach elf und 13 nach 14) und eine Leerstelle handelt, ergeben sich die notwendigen Bewegungen der Lasthandhabung zu:

$$14move_{Last} = 5 * (Auf + Ab) \tag{4.17}$$

Die Gesamtanzahl der Bewegungen für einen 14-move setzt sich danach aus den Fahrbewegungen, den Lenkbewegungen und den notwendigen Bewegungen für die Lasthandhabung zusammen und lässt sich folgendermaßen beschreiben:

$$\begin{aligned}
 14move_H &= 14move_{H,fahren} \\
 &\quad + 14move_{lenken} \\
 &\quad + 14move_{Last}
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

$$\begin{aligned}
 14move_H &= 4 * H_{1leer} + H_{2leer} + 3 * H_{1voll} \\
 &\quad + 4 * V_{1leer} + 2 * V_{1voll} \\
 &\quad + 4 * L + 5 * (Auf + Ab)
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

Die aufgeführten Bewegungen für das Verschieben der Last in horizontaler Richtung lassen sich ebenso auf die vertikale Richtung übertragen. Die richtungsunabhängigen Bewegungen, wie das Lenken und das Lasthandhaben, bleiben dabei gleich. Lediglich bei den Fahrbewegungen tauschen die horizontalen Bewegungen mit den vertikalen Bewegungen ihre Position, womit sich die Fahrbewegungen zu

$$\begin{aligned}
 14move_{V,fahren} &= 4 * V_{1leer} + V_{2leer} + 3 * V_{1voll} \\
 &\quad + 4 * H_{1leer} + 2 * H_{1voll}
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

ergeben. Die Gesamtbewegung in vertikaler Richtung setzt sich dann wieder aus den einzelnen Teilen wie folgt zusammen:

$$\begin{aligned}
 14move_V &= 14move_{V,fahren} \\
 &\quad + 14move_{lenken} \\
 &\quad + 14move_{Last}
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

$$\begin{aligned}
 14move_V &= 4 * V_{1leer} + V_{2leer} + 3 * V_{1voll} \\
 &\quad + 4 * H_{1leer} + 2 * H_{1voll} \\
 &\quad + 4 * L + 5 * (Auf + Ab)
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

4.2.5 Richtungswechsel einer Ladungseinheit um 90°, Corner move (c-move)

Eine weitere Bewegung im Raster ist das Wechseln der Richtung um 90°. Bilden die Leerstelle und die Ladungseinheit beim 14-move eine Gerade, welche die Bewegungsrichtung der Ladungseinheit anzeigt, so steht die Bewegungsrichtung der Ladungseinheit beim Umsetzen hierzu orthogonal. Bei der Betrachtung der notwendigen Einzelbewegungen stellt sich heraus, dass für den Richtungswechsel einer Ladungseinheit neun Fahrbewegungen notwendig sind. Um Verwechslungen mit dem von Gue und Kim (Gue und Kim 2007) vorgestellten 9-move zu vermeiden, wird an dieser Stelle vom c-move gesprochen. Die Ladungseinheit wird dabei genau wie bei einem 14-move von einer Position zur nächsten befördert. Der Unterschied liegt aber in der Position der Leerstelle unmittelbar vor dem Bewegen der Ladungseinheit. Zuerst ist dabei das Verschieben der Leerstelle auf die gewünschte Seite notwendig und anschließend das Verschieben der Ladung in die gewünschte Richtung (Abb. 4.8).

Aufgrund der unterschiedlichen Kantenlängen von Ladungseinheiten muss auch hier wieder zwischen dem Umsetzen von vertikaler in horizontaler Richtung und dem Umsetzen von horizontaler in vertikale Richtung unterschieden werden. Die reinen Fahrbewegungen ergeben sich je nach Richtung zu:

$$\begin{aligned} \text{cmove}_{H,\text{fahren}} &= 3 * V_{1\text{leer}} + 3 * H_{1\text{leer}} \\ &\quad + 2 * H_{1\text{voll}} + V_{1\text{voll}} \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \text{cmove}_{V,\text{fahren}} &= 3 * H_{1\text{leer}} + 3 * V_{1\text{leer}} \\ &\quad + 2 * V_{1\text{voll}} + H_{1\text{voll}} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Zusätzlich müssen noch die Lenkbewegungen und die für das Lasthandling notwendigen Bewegungen berücksichtigt werden.

$$\text{cmove}_{\text{lenken}} = 3 * L \quad (4.25)$$

$$\text{cmove}_{\text{Last}} = 3 * (\text{Auf} + \text{Ab}) \quad (4.26)$$

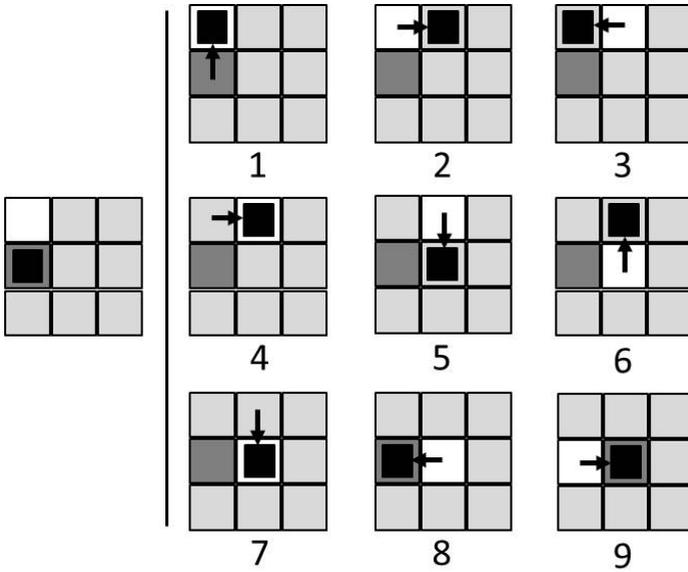


Abbildung 4.8: c-move

Die Gesamtbewegung eines c-move für das Umsetzen der Ladungseinheit von vertikaler in die horizontale Bewegungsrichtung ergibt sich somit zu:

$$\begin{aligned}
 cmove_H &= cmove_{H,fahren} \\
 &\quad + cmove_{lenken} \\
 &\quad + cmove_{Last}
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

$$\begin{aligned}
 cmove_H &= 3 * V_{1leer} + 3 * H_{1leer} \\
 &\quad + 2 * H_{1voll} + V_{1voll} \\
 &\quad + 3 * (L + Auf + Ab)
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

Entsprechend lassen sich die Bewegungen für das Umsetzen von horizontaler in die vertikale Richtung definieren:

$$\begin{aligned}
 cmove_V &= cmove_{V,fahren} \\
 &\quad + cmove_{lenken} \\
 &\quad + cmove_{Last}
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

$$\begin{aligned}
 cmove_V &= 3 * H_{1leer} + 3 * V_{1leer} \\
 &\quad + 2 * V_{1voll} + H_{1voll} \\
 &\quad + 3 * (L + Auf + Ab)
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

4.3 Vergleichssituationen mit eindeutig sequentiellen Bewegungen

Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Varianten zu ermöglichen werden unterschiedliche, generische Anfangssituationen erstellt. Wichtig bei den Anfangssituationen ist die Möglichkeit, die Anzahl und Arten der Bewegungen rechnerisch bestimmen zu können, um nicht auf Simulationen

ausweichen zu müssen. Die Größe der jeweiligen Fläche kann dabei (fast) beliebig variiert werden. Es wird davon ausgegangen, die Ladung mit der größten Entfernung aus dem Raster (Lagerfläche) herausbefördern zu wollen. Die Vergleiche betrachten somit immer einen Auslagerungsvorgang einer bestimmten Ladungseinheit. Untersucht wird, welchen Einfluss die Größe der Lagerfläche auf die vorgestellten Parameter hat und wie sich die Parameter bei unterschiedlichen Lagergrößen entwickeln. Die Vergleichssituationen werden zunächst unabhängig von spezifischen Ladungseinheiten oder Fördertechnik definiert.

Die für die jeweilige Ausgangslage spezifischen Gesamtbewegungen oder Einzelspiele bilden sich aus den Grundbewegungen und werden mit „S“ und einer zur Ausgangslage gehörigen Zahl gekennzeichnet (Abb. 4.9). Im Index kann eine Teilbewegung innerhalb der Ausgangslage weiter spezifiziert werden.

Die Ausgangssituationen werden über dieselbe Anzahl an Stellplätzen in X- wie in Z-Richtung verfügen. Aufgrund der Palettenform kann dies je nach Variante zu unterschiedlich langen Kanten der Lagerfläche führen. Auf die Ausrichtung der Lagerfläche wird in Kapitel 5 näher eingegangen.

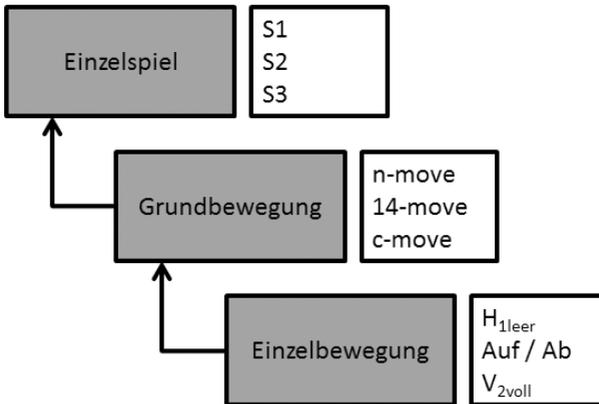


Abbildung 4.9: Bewegungsstruktur in GridFlow

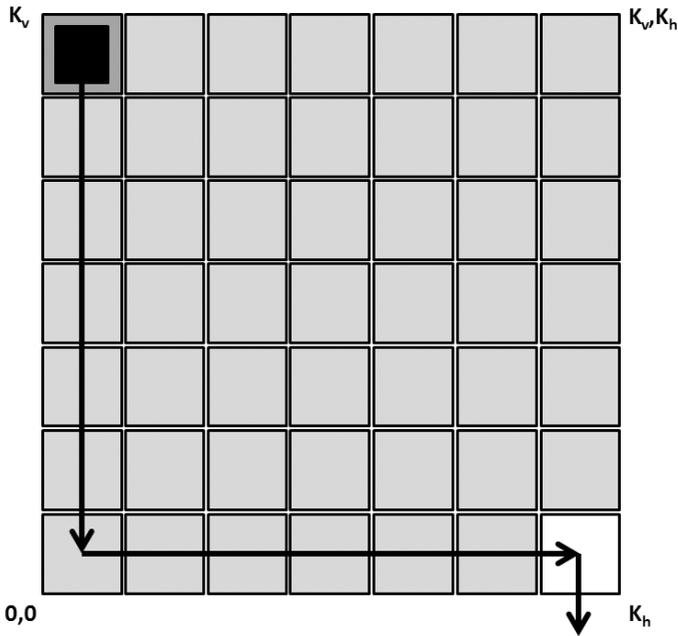


Abbildung 4.10: Situation 1

4.3.1 Vergleichssituation 1

Betrachtet wird ein der Felderanzahl nach quadratisches Raster mit der Kantenlänge K_h in horizontaler Richtung und K_v in vertikaler Richtung. Die zu entnehmende Ladung befindet sich in der oberen Ecke an der Position $(0, K_v)$. Der Entnahmepunkt ist in der rechten unteren Ecke an der Position $(K_h, 0)$. Hier wird die Ladung vertikal nach unten aus dem Raster ausgelagert. Die für den Transport notwendige Leerstelle befindet sich ebenfalls hier (Abb. 4.10).

Das Raster ist sehr stark gefüllt. Der Füllgrad errechnet sich in Abhängigkeit der Kantenlänge mit:

$$f = \frac{(K_h * K_v) - \text{Leerstellen}}{K_h * K_v} * 100[\%] \quad (4.31)$$

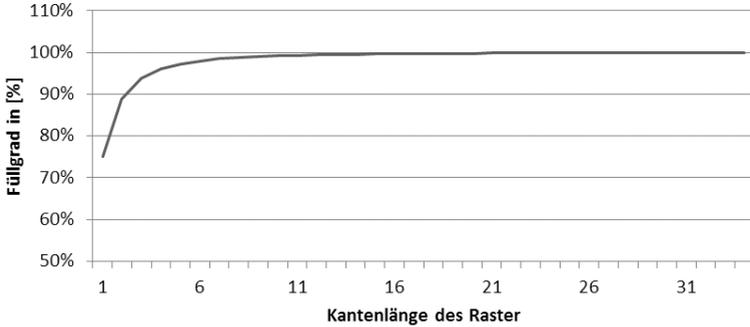


Abbildung 4.11: Füllgrad Situation 1 bei quadratischer Form (H=V)

Das kleinstmögliche Raster mit einer Kantenlänge von 2x2 weist somit einen Füllgrad von 75% auf. Für größer werdende Raster nimmt der Füllgrad schnell zu und strebt gegen 100% (Abb. 4.11).

Die Entfernung der Ladung zum Entnahmepunkt entspricht der rechtwinkligen Distanz.

$$d = |(x_2 - x_1)| + |(z_2 - z_1)| \quad (4.32)$$

Für Vergleichssituation 1 berechnet sich die Distanz wie folgt:

$$d = (K_h - 1) + K_v \quad (4.33)$$

Der Unterschied liegt daran, dass es nicht ausreichend ist die Ladung nur an das andere Ende des Grids zu transportieren, sondern sie auch auszuschleusen. Dieser Schritt wird hier mitbetrachtet. So ist es zunächst notwendig, die Leerstelle vor der zu entnehmenden Ladeinheit zu positionieren. Es ist dabei nicht egal, welche Strecke (horizontal oder vertikal) zuerst mit der Leerstelle überbrückt wird. Wird aber davon ausgegangen, dass der Vorgang nur einer von vielen ist, so erscheint es sinnvoll, mit der Leerstelle zuerst die vertikale Distanz zu überbrücken, um bei dem Transport mit einem Fahrzeug bspw. einen Richtungswechsel und somit einen Lenkvorgang einzusparen. Die Räder des Transportfahrzeuges stehen bereits vom vorangegangenen Auslagervorgang in der richtigen Richtung. Beim Auslagern

der Ladungseinheit wird dann zuerst die horizontale Strecke überbrückt, da so die Ladung anschließend direkt vertikal aus dem Raster herausbefördert werden kann. Da sich die Leerstelle schon auf der ersten Position befindet, verkürzt sich die Entfernung für den Leerstellentransport auf:

$$d_{leer} = (K_h - 1) + (K_v - 1) \quad (4.34)$$

Wird die Leerstelle jedoch zuerst in horizontaler Richtung bewegt, so muss anschließend in vertikaler Richtung eine Ebene weniger überbrückt werden, da der Transport der Ladung in umgekehrter Reihenfolge abläuft. Somit ergibt sich die Entfernung für die Leerstelle zu:

$$d_{leer} = (K_h - 1) + (K_v - 2) \quad (4.35)$$

So lange der Transport der Leerstelle um eine Position im Raster mehr Zeit benötigt als eine Lenkbewegung (davon kann im Allgemeinen ausgegangen werden), ist der Transport der Leerstelle beginnend mit der horizontalen Richtung zu bevorzugen. Damit ergeben sich die Bewegungen zu:

$$S1_{leer} = (K_h - 1) * nmove_H + (K_v - 2) * nmove_V \quad (4.36)$$

Die Leerstelle befindet sich somit genau unterhalb der zu entnehmenden Ladung. Die Ladungseinheit kann nun mittels Aneinanderreihung von 14-moves in vertikaler und horizontaler Richtung zum Entnahmepunkt transportiert werden. Da sich die Leerstelle schon direkt bei der Ladungseinheit befindet, ist kein vollständiger 14-move für die erste Bewegung in vertikaler Richtung notwendig. Hier reicht es aus die Ladungseinheit einfach zu unterfahren und zu versetzen. Da die Leerstelle mittels n-move vor die Ladungseinheit transportiert wurde, befindet sich das Fahrzeug nun auch direkt vor der Ladungseinheit und die Ausrichtung der Lenkung ist ebenfalls bereits erfolgt. Somit ist für das Versetzen der Ladungseinheit auf die erste Position lediglich folgendes notwendig:

$$V_{leer} + V_{voll} + Auf + Ab \quad (4.37)$$

Auch ist für die horizontale Bewegung ein 14-move weniger als die Distanz notwendig, da durch das Ändern der Förderrichtung mittels c-move

die Ladeinheit bereits um eine weitere Position in Richtung Entnahmepunkt verschoben wird. Die notwendigen Bewegungen um die Ladeinheit zu transportieren ergeben sich somit zu:

$$\begin{aligned}
 S1_{voll} &= (V_{1leer} + V_{1voll} + Auf + Ab) \\
 &+ (K_v - 2) * 14move_V + cmove_H \\
 &+ (K_h - 2) * 14move_H \\
 &+ (L + Auf + V_{1voll})
 \end{aligned} \tag{4.38}$$

Der letzte Term ergibt sich aus der Notwendigkeit die Ladungseinheit noch aus dem Raster hinaus zu transportieren. Da für die Vergleichssituation angenommen wurde, dass die Ausschleusrichtung in vertikaler Richtung liegt, ist eine zusätzliche Lenkbewegung notwendig. Dies kann somit als Abschätzung nach oben dienen, da sich bei horizontaler Ausschleusrichtung die Zeit um den Faktor

$$Ab + L + Auf \tag{4.39}$$

und den Zeitgewinn, den der kontinuierliche Transport einer Ladungseinheit über zwei Felder in horizontaler Richtung gegenüber zweier Einzeltransporte in horizontaler Richtung ergibt, verkürzt.

Die Ausgangslage ist nicht auf einen quadratischen Aufbau limitiert. Mit den aufgeführten Formeln lassen sich die für das Auslagern notwendigen Bewegungen jedes rechteckigen Rasters berechnen, vorausgesetzt, es befindet sich nur eine Leerstelle im System und diese befindet sich zu anfangs am Entnahmepunkt:

$$S1_{Auslagern} = S1_{leer} + S1_{voll} \tag{4.40}$$

$$\begin{aligned}
 S1_{Auslagern} &= (h - 1) * nmove_H + (v - 2) * nmove_V \\
 &+ (V_{1leer} + V_{1voll} + Auf + Ab) \\
 &+ (K_v - 2) * 14move_V + cmove_H \\
 &+ (K_h - 2) * 14move_H \\
 &+ (L + Auf + V_{1voll})
 \end{aligned} \tag{4.41}$$

4.3.2 Vergleichssituation 2

Eine andere Strategie, um die Ladungseinheit in Situation 1 auszulagern, besteht darin sie einen diagonalen Weg durch das Raster nehmen zu lassen. Dies beinhaltet auf den ersten Blick deutlich mehr Richtungswechsel (Abb. 4.12), welche nach der klassischen Lehrmeinung in einem Förderstrom zu vermeiden sind. Für die Ladungseinheit selber trifft dies auch zu. Werden allerdings die zum Auslagern notwendigen Einzelbewegungen betrachtet, so lassen sich hierdurch sogar einige Bewegungen und auch Richtungswechsel der Fahrzeuge einsparen.

Die für den Leerstellentransport notwendigen Bewegungen ändern sich nicht und können direkt aus Situation 1 übernommen werden:

$$S2_{leer} = (K_h - 1) * nmove_H + (K_v - 2) * nmove_V \quad (4.42)$$

Die für die Auslagerung notwendigen Bewegungen ändern sich jedoch und sind getrennt zu betrachten. Da sich die Leerstelle unterhalb der Ladungseinheit befindet, kann analog zu Situation 1 die erste Bewegung der Ladungseinheit auf den freien Platz mittels

$$V_{1leer} + V_{1voll} + Auf + Ab \quad (4.43)$$

erfolgen. Vorausgesetzt es handelt sich um ein quadratisches Raster, bezogen auf die Anzahl der Stellplätze und nicht auf die räumlichen Abmaße, so ergeben sich die notwendigen Bewegungen zum Transport der Ladungseinheit zum Entnahmepunkt folgendermaßen:

$$\begin{aligned} S2_{voll} &= (V_{1leer} + V_{1voll} + Auf + Ab) \\ &+ (K_h - 1) * cmove_H \\ &+ (K_v - 2) * cmove_V \\ &+ (L + Auf + V_{1voll}) \end{aligned} \quad (4.44)$$

Auch hier tritt wieder der letzte aus Situation 1 bekannte Term, welcher zum Auslagern der Ladungseinheit aus dem Raster heraus notwendig ist, auf. Die notwendigen Bewegungen ergeben sich somit für ein quadratisch aufgebautes Raster zu:

$$\begin{aligned}
 S2_{Auslagern} &= (K_h - 1) * nmove_H + (K_v - 2) * nmove_V \\
 &+ (V_{1leer} + V_{1voll} + Auf + Ab) \\
 &+ (K_h - 1) * cmove_H \\
 &+ (K_v - 2) * cmove_V \\
 &+ (L + Auf + V_{1voll})
 \end{aligned} \tag{4.45}$$

Ist die Grundform des Rasters nicht quadratisch nach Anzahl der Stellplätze, so muss eine Fallunterscheidung eingeführt und die für eine Auslagerung notwendigen Bewegungen entsprechend ergänzt werden:

$$S2_{recht.} = \begin{cases} (K_h - K_v) * 14move_H & \text{für } K_h > K_v \\ (K_v - K_h - 1) * 14move_V + cmove_V & \text{für } K_v > K_h \end{cases} \tag{4.46}$$

Somit gilt dann:

$$S2_{Auslagern, recht.} = S2_{Auslagern} + S2_{recht.} \tag{4.47}$$

4.3.3 Vergleichssituation 3

In dieser Ausgangssituation wird das Raster durch eine diagonal verlaufende Reihe von Leerstellen unterbrochen. Der Füllgrad in dieser Situation ist somit geringer als in Situation 1 und 2, was einen höheren Durchsatz erwarten lässt. Das Raster ist quadratisch aufgebaut und hat die Kantenlänge K . Die Vorgehensweise ist immer die, dass zuerst die Leerstellen vor die Ladung verschoben werden und danach die Ladung aus dem Raster herausgebracht wird. Dies ist angelehnt an die von Gue und Furmans (Gue und Furmans 2011) vorgestellte Strategie der „Virtual Aisles“.

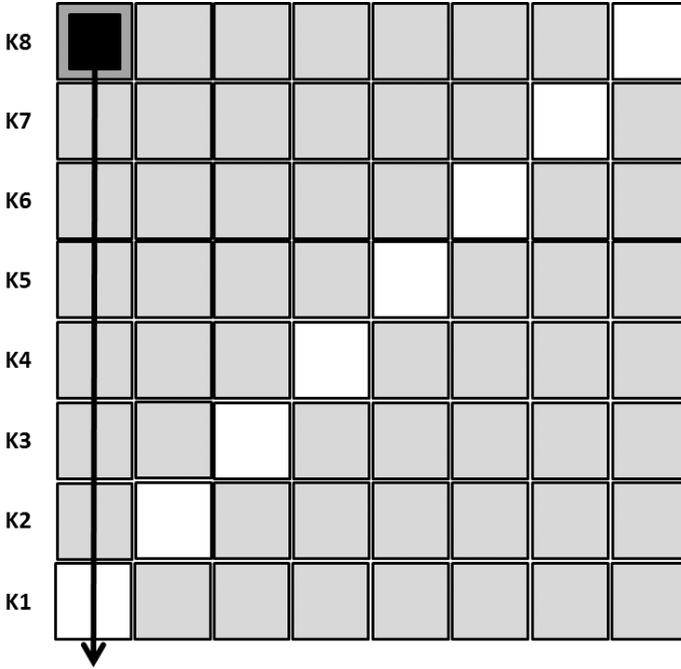


Abbildung 4.13: Situation 3

Situation 3 bildet die Bewegungen ab, wenn Ladungseinheiten nur sequenziell oder mit nur einem Transportfahrzeug bewegt werden. Die zeitgleiche Verschiebung wird in diesem Vergleich nicht betrachtet. Zunächst wird der virtuelle Gang für das Auslagern vorbereitet, um dann die Ladung herausfahren zu können. Das Transportfahrzeug befindet sich dabei unter der auszulagernden Ladungseinheit.

Die notwendigen Bewegungen, um eine Ladungseinheit aus dem oberen Eck an die gegenüberliegende Seite zu befördern, folgen einer klaren Struktur. Exemplarisch ist dies für ein Raster mit der Kantenlänge $K=8$ dargestellt. Es ist zunächst notwendig die einzelnen Leerstellen in die Spalte vor der Ladungseinheit zu bewegen um die virtuelle Gasse zu bilden. Danach wird die Ladungseinheit mit einer Bewegung aus dem Raster heraus befördert. Die Zeilenbezeichnung deutet dabei immer an wo sich das Transportfahrzeug vor dem Bewegungsbeginn befindet:

$$\begin{aligned}
 K_8 & : V_{1leer} + H_{5leer} + 5 * (H_{1voll} + H_{2leer}) + H_{1voll} + H_{1leer} \\
 K_7 & : V_{1leer} + H_{4leer} + 4 * (H_{1voll} + H_{2leer}) + H_{1voll} + H_{1leer} \\
 K_6 & : V_{1leer} + H_{3leer} + 3 * (H_{1voll} + H_{2leer}) + H_{1voll} + H_{1leer} \\
 K_5 & : V_{1leer} + H_{2leer} + 2 * (H_{1voll} + H_{2leer}) + H_{1voll} + H_{1leer} \\
 K_4 & : V_{1leer} + H_{1leer} + 1 * (H_{1voll} + H_{2leer}) + H_{1voll} + H_{1leer} \\
 K_3 & : V_{1leer} + H_{0leer} + 0 * (H_{1voll} + H_{2leer}) + H_{1voll} + H_{1leer}
 \end{aligned} \tag{4.48}$$

Damit ergeben sich die notwendigen Bewegungen in der jeweiligen Zeile um die Leerstelle aus der Diagonalen vor die Ladung zu transportieren zu:

$$\begin{aligned}
 S3_{leer} & = V_{1leer} + H_{(K-3)leer} \\
 & \quad + (K - 3) * (H_{1voll} + H_{2leer}) \\
 & \quad + H_{1voll} + H_{1leer}
 \end{aligned} \tag{4.49}$$

Sobald die virtuelle Gasse vor dem Ladungsgut gebildet wurde, muss das Transportfahrzeug zurück fahren, die Ladung holen und aus dem Raster hinaus bringen:

$$S3_{voll} = V_{(K-2)leer} + V_{Kvoll} \tag{4.50}$$

Die notwendigen Fahrbewegungen ergeben sich dann zu:

$$\begin{aligned}
 S3_{fahren} &= \sum_{i=3}^K (V_{1leer} + H_{(i-3)leer}) \\
 &\quad + (i-3) * (H_{1voll} + H_{2leer}) \\
 &\quad + H_{1voll} + H_{1leer}) \\
 &\quad + (V_{(K-2)leer} + V_{Kvoll})
 \end{aligned} \tag{4.51}$$

Zu den Fahrbewegungen kommen noch die notwendigen Bewegungen der Lasthandhabung hinzu. Je nach technischer Variante können dies zwar unterschiedliche Arten von Bewegungen sein, die Anzahl bleibt jedoch dieselbe. Für den Teil der Bewegung, in der die Leerstelle vor die Ladung geräumt wird, ergibt sich die Anzahl der notwendigen Bewegungen zu:

$$S3_{Last} = (K - 2) * (Auf + Ab) \tag{4.52}$$

Um die Ladung letztendlich aufzunehmen und aus dem Raster auszulagern, kommt ein weiterer Aufnahmevorgang hinzu.

Demnach müssen noch die notwendigen Lenkbewegungen betrachtet werden. Dabei ist davon auszugehen, dass eine Lenkbewegung immer gleich aufwändig ist, egal in welche Richtung. Dies ist zulässig, da es sich immer um eine Richtungsänderung von 90° handelt. Die Gesamtanzahl an Lenkbewegungen ergibt sich damit zu:

$$S3_{lenken} = ((K - 2) * 2 + 1) * L \tag{4.53}$$

Damit ergeben sich die notwendigen Bewegungen um die Ladung in dem Beispiel auszulagern:

$$\begin{aligned}
 S3_{Auslagern} &= \sum_{i=3}^K (V_{1leer} + H_{(i-3)leer} \\
 &\quad + (i-3) * (H_{1voll} + H_{2leer}) \\
 &\quad + H_{1voll} + H_{1leer}) \\
 &\quad + (V_{(K-2)leer} + V_{Kvoll}) \\
 &\quad + ((K-2) * 2 + 1) * L \\
 &\quad + (K-2) * (Auf + Ab) + Auf \quad (4.54)
 \end{aligned}$$

Befindet sich die Auslagerposition nicht an der direkt gegenüberliegenden Seite des Rasters, so kann der vertikale Versatz analog zu Situation 1 überbrückt werden.

Bei der Betrachtung aus Sicht der Grundbewegungen wird der n-move aus einer anderen Anfangsposition ausgeführt. Da in den definierten Grundbewegungen die Lasthandhabung schon mitberücksichtigt ist, kann die Formel entsprechend vereinfacht werden. Für das Beispielraster mit der Kantenlänge $K=8$ sehen die Bewegungen für die jeweilige Zeile dann folgendermaßen aus:

$$\begin{aligned}
 K8 &: V_{1leer} + H_{5leer} + 6 * nmove_H - H_{1leer} \\
 K7 &: V_{1leer} + H_{4leer} + 5 * nmove_H - H_{1leer} \\
 K6 &: V_{1leer} + H_{3leer} + 4 * nmove_H - H_{1leer} \\
 K5 &: V_{1leer} + H_{2leer} + 3 * nmove_H - H_{1leer} \\
 K4 &: V_{1leer} + H_{1leer} + 2 * nmove_H - H_{1leer} \\
 K3 &: V_{1leer} + H_{1voll} + 1 * nmove_H - H_{1leer}
 \end{aligned} \quad (4.55)$$

Die Fahrbewegungen inklusive der Lasthandhabungen lassen sich somit zusammenfassen zu:

$$\begin{aligned}
 S3_{fahren} &= \sum_{i=3}^K (V_{1leer} + H_{(i-3)leer} \\
 &\quad + (i-2) * nmove_H - H_{1leer}) \\
 &\quad + (V_{(K-2)leer} + V_{Kvoll} + Auf + Ab) \quad (4.56)
 \end{aligned}$$

Der angepasste Lenkaufwand aus Formel 4.54 wird auf den selben Anfangswert der Summe umgeformt und ergibt sich somit zu:

$$S3_{lenken} = (3 + (j - 3) * 2) * L \quad (4.57)$$

Diese Umformung erlaubt es die beiden Summierungen zusammen zu führen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass für die letzte Bewegung eine zusätzliche Lenkbewegung anfällt, welche zu den Fahrbewegungen addiert wird. Der Gesamtaufwand für das Auslagern in Situation 3 ergibt sich damit zu:

$$\begin{aligned}
 S3_{Ausl.,beliebig} &= \sum_{i=3}^K (V_{1leer} + H_{(i-3)leer} \\
 &\quad + (i-2) * nmove_H - H_{1leer}) \\
 &\quad + (3 + (i-3) * 2) * L \\
 &\quad + (V_{(K-2)leer} + V_{Kvoll} + Auf + Ab + L) \quad (4.58)
 \end{aligned}$$

5 Vergleich der technischen Implementierungen

Die in Kapitel 3 vorgestellten technischen Varianten basieren auf der Idee, bestehende Fördertechnikelemente für den Einsatz in einem GridFlow-System zu nutzen. Die hierfür notwendigen Bedingungen wurden ebenfalls in Kapitel 3 aufgezeigt. Besonderes Augenmerk lag dabei auf den E/A-notwendigen Bewegungen. Bei unstetiger Fördertechnik ist ein wichtiger Faktor, dass sich die Fahrzeuge ohne Ladung unter den Paletten frei bewegen können.

Bei der BInE ist dies aufgrund der Bauform der Paletten nur in Längsrichtung möglich. Da das Prinzip darauf beruht in den Palettenkanal einzufahren, ist eine Querfahrt nur an Leerstellen oder außerhalb des Rasters möglich.

Bei der Variante des ShuttleGrids mit ortsfesten Gestellen ist ebenfalls keine Längsfahrt unter den Ladungen möglich, da beladene Paletten aufgrund der Bauform an der kurzen Seite vollständig aufliegen müssen und somit baulich die Längsfahrt durch die Gestelle verhindert wird. Für die Längsfahrten müssen somit Gänge vorgesehen werden, was dem GridFlow-Prinzip widerspricht.

Deshalb werden in den weiteren Vergleichen nur noch die Varianten näher betrachtet, mit denen der uneingeschränkte Einsatz in einem GridFlow-System, unabhängig vom Systemzustand möglich ist. Dies sind:

- Eckumsetzer
- Drehtische
- Rolleneckumsetzer
- ShuttleGrid
- Unterfahrschlepper
- Deckenkran

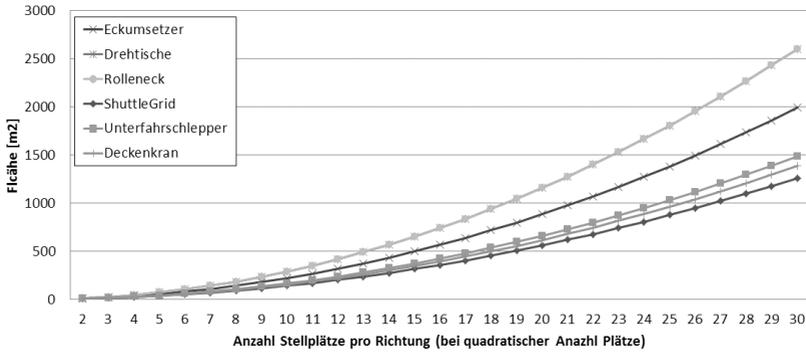


Abbildung 5.1: Platzbedarf der technischen Varianten

5.1 Platzbedarf

Die Berechnung des Platzbedarfs erfolgt aufgrund der in Kapitel 3 festgelegten Abmaße für einen Lagerplatz (Tab. 3.4). Für die reale Auslegung eines Systems ist vorrangig interessant, wie viele Lagerplätze in einem zur Verfügung stehenden Bereich platziert werden können. Dabei spielt die Ausrichtung der Lagerplätze eine entscheidende Rolle. Aufgrund der nicht rechteckigen Form einer Palette lassen sich in einem gegebenen Bereich eventuell je nach Ausrichtung unterschiedlich viele Paletten platzieren.

Ein exemplarisches Beispiel ist hierfür die Lkw Beladung. Bei einer Standardladefläche von $13,6 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$ können in Längsrichtung $11 \times 3 = 33$ Paletten oder quer $17 \times 2 = 34$ Paletten untergebracht werden.

Da es sich um theoretische Überlegungen handelt und kein reales Szenario vorliegt, ist es ausreichend, sich auf den reinen Platzbedarf, welcher sich aus den Abmaßen der Lagerplätze ergibt, zu beschränken (Abb. 5.1). Dabei wird weiterhin von einem rechteckigen Layout bezüglich der Anzahl der Lagerplätze ausgegangen.

5.1.1 Flächennutzung

Je nach eingesetzter Technik ist mehr oder weniger Freiraum zwischen den einzelnen Lagerplätzen vorzusehen. Dies ergibt sich aufgrund von benötig-

	Platz pro Stellplatz	Flächennutzungsgrad
Eckumsetzer	2,21 m ²	43 %
Drehtisch	2,89 m ²	33 %
Rolleneck	2,89 m ²	33 %
ShuttleGrid	1,40 m ²	69 %
Unterfahrschlepper	1,65 m ²	58 %
Deckenkran	1,21 m ²	53 %

Tabelle 5.1: Flächennutzungsgrad je eingesetzter Technik

tem Platz für Traggestelle, Technik und Freiraum, welcher bei der Bewegung der Ladung erforderlich ist (vgl. Kapitel 3, Flächenbedarf).

Wird die benötigte Fläche auf die reine Stellfläche der Palette bezogen, so ergibt dies den Flächennutzungsgrad für das jeweilige System. Hierbei sind die notwendigen Abstände zum benachbarten Stellplatz und die Freiräume für die Handhabung der Ladungseinheiten bereits eingerechnet:

$$f_n = \frac{\text{Fläche Palette}}{\text{Fläche Variante}} * 100 [\%] \quad (5.1)$$

Systeme mit einfachen Untergestellen sind hier denen mit aufwändiger Technik gegenüber im Vorteil. Wird kein Platz für Antriebe und Mechanik benötigt, ist lediglich noch das für das sichere Bewegen der Ladungseinheiten notwendige Freimaß zu berücksichtigen. Somit können die Ladungseinheiten sehr eng beieinander stehen. Die hier verwendeten Abmaße für Fördertechnik sind Herstellerangaben (siehe Anhang). Das ShuttleGrid erreicht so einen Flächennutzungsgrad von 69%. Auf der anderen Seite benötigen Rolleneckumsetzer und der Palettendrehtische sehr viel Bewegungsfreiraum, um die Schwenkbewegungen durchführen zu können. Beide erreichen gerade noch 33% Flächennutzungsgrad und fallen somit deutlich zurück; sie bilden die Schlusslichter in diesem Vergleich (Tab. 5.1).

5.2 Bewegungen im Raster

Jeder Zugriff auf eine Ladungseinheit im Raster setzt sich aus den in Kapitel 4 beschriebenen Grundbewegungen zusammen. Die Dauer der einzelnen

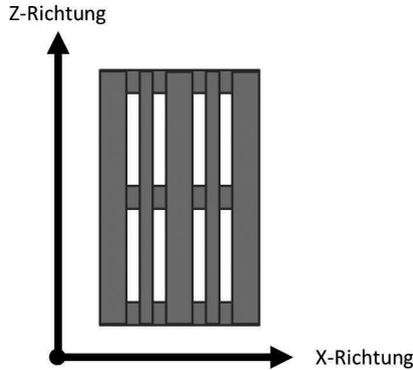


Abbildung 5.2: Palettenausrichtung

Bewegung ist wiederum abhängig von der technischen Ausführung des Systems und den eingestellten Parametern. Vor allem sind hierbei

- Fördergeschwindigkeit
- Lasthandhabungszeiten
- Lenkzeiten
- Förderentfernung
- Ausrichtung (horizontal, vertikal)

zu nennen. Zeiten für die Feinpositionierung sind nicht gesondert aufgeführt, sondern prozentual in die Fahrzeiten eingerechnet.

In Anlehnung an die FEM 9831.1 (FEM-9.831 2012) ist definiert, dass die kurze Palettenseite die X-Richtung und die lange Seite die Z-Richtung der Palette sind (Abb. 5.2).

Die generelle Ausrichtung der Paletten im Raster spielt eine große Rolle. Da im Fall der Europalette keine quadratische Form vorliegt, sondern ein Rechteck mit dem Seitenverhältnis von 1 : 1,5, muss unterschieden werden, ob die X-Richtung der Palette in horizontaler oder vertikaler Richtung des Rasters angeordnet ist. Dementsprechend wird bei gleicher Anzahl von Paletten in horizontaler wie in vertikaler Richtung entweder ein eher schmales, langes Raster oder eben ein flaches, breites Raster entstehen (Abb. 5.3). Unter der horizontalen Richtung wird die Ausrichtung von links nach rechts

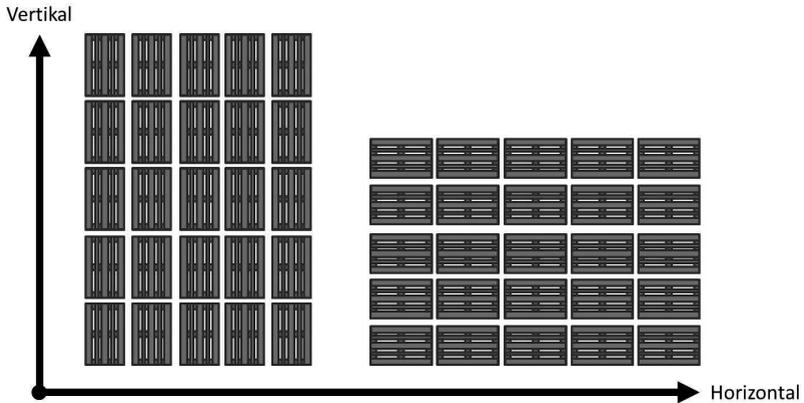


Abbildung 5.3: vertikale und horizontale Ausrichtung der Paletten

	Lager horizontal	Lager vertikal
Bewegung horizontal	lange Seite	kurze Seite
Bewegung vertikal	kurze Seite	lange Seite

Tabelle 5.2: Einfluss der Ausrichtung auf die Fahrstrecken

und unter vertikaler Richtung die Ausrichtung von oben nach unten verstanden.

Je nachdem wo sich die E/A Punkte im Raster befinden, kann dies zu einer Verkürzung oder Verlängerung der Transportwege führen.

Bei den Bewegungen muss ebenfalls zwischen horizontaler und vertikaler Bewegung im Lager unterschieden werden. Je nach Ausrichtung der Paletten ist somit die vertikale Richtung entweder die kurze oder die lange Seite der Palette (Tab. 5.2).

In den weiteren Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die Paletten mit ihrer langen Seite horizontal im Lager ausgerichtet sind und sich der Entnahmepunkt an der unteren, breiten Seite des Lagers befindet.

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben lassen sich die Grundbewegungen bis hin zu den verschiedenen Einzelbewegungen weiter aufteilen. Ebenso ist die Einteilung der Bewegungen nach Funktionen möglich. Bei der Auswertung

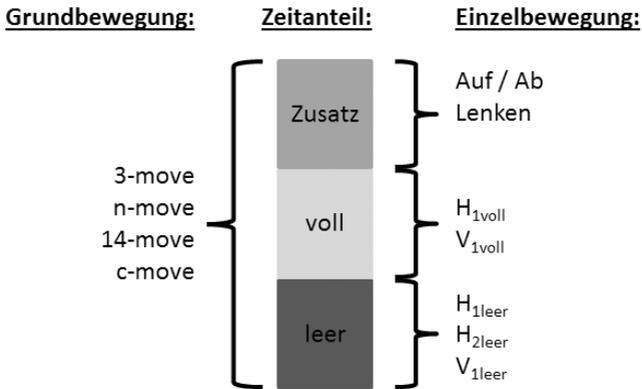


Abbildung 5.4: Bewegungsgliederung

wird innerhalb der Grundbewegungen, sofern möglich, zwischen den unterschiedlichen Zeitanteilen unterschieden. So werden alle Bewegungen der Fördertechnik ohne Ladung (Leerfahrten) als „leer“ bezeichnet. Entsprechend werden die Anteile der Fahrten mit Ladung (Lastfahrten) als „voll“ bezeichnet. Unter „Zusatz“ sind alle zusätzlich notwendigen Schritte, wie das Aufnehmen und Abgeben der Ladung sowie Lenkbewegungen zusammengefasst (Abb. 5.4).

Die für die Berechnung verwendeten Parameter der technischen Systeme entsprechen dem heutigen Stand der Technik (Tab. 3.1). Bei zukünftigen leistungsverbesserten Varianten dieser technischen Systeme, ist eine neue Betrachtung notwendig.

5.2.1 Zeitliche Betrachtung 3-move

Bei den Systemen mit ortsfester Fördertechnik fällt zunächst die deutlich kürzere Gesamtzeit ins Auge (Abb. 5.5). Das liegt vor allem daran, dass systembedingt keine Leerfahrten notwendig sind. Ebenfalls fällt auf, dass diese Systeme in horizontaler Richtung die identischen und in vertikaler Richtung nahezu identische Zeiten aufweisen. Dies ist damit zu erklären, dass für einen 3-move keine Lenkzeiten zu berücksichtigen sind. Lediglich das System aus Drehtischen ist bauartbedingt sowohl in horizontaler als

auch in vertikaler Richtung gleich schnell. Der größte Zeitanteil wird für die Bewegung und somit den eigentlichen Transport der Ladung benötigt. Die Systeme mit unstetiger Fördertechnik weisen eine völlig andere Verteilung der Zeiten auf. Der Anteil für die Lastfahrt ist ähnlich ausgeprägt wie bei den Systemen mit ortsfester Fördertechnik. Dazu kommen aber deutlich größere Anteile im Bereich der Lasthandhabung und die Anteile an Leerfahrten. So ist der Zeitanteil der Lastfahrt nur ca. ein Drittel der gesamten Zeit.

Die kürzesten Zeiten werden mit ortsfester Fördertechnik erreicht, was durch den Wegfall der Leerfahrten nicht überrascht. Bei den Systemen mit unstetiger Fördertechnik erzielt der Unterfahrschlepper die theoretisch besten Zeiten. Hier kann vor allem bei den Zusatzbewegungen gespart werden. Das Schlusslicht bildet der Deckenkran. Das liegt an den geringen Fahrgeschwindigkeiten und der aufwändigen Lasthandhabung. Die Zeiten reichen von 5 Sekunden beim Eckumsetzer in vertikaler Richtung bis zu 32 Sekunden beim Deckenkran in horizontaler Richtung. Der Unterschied zwischen horizontaler und vertikaler Richtung liegt bei den Systemen mit unstetiger Fördertechnik im Schnitt bei 3,1 Sekunden. Die Systeme mit ortsfester Fördertechnik weisen dagegen maximal einen Unterschied von einer Sekunde auf.

5.2.2 Zeitliche Betrachtung n-move

Auch hier sind keine Lenkzeiten zu berücksichtigen, da es sich um eine lineare Bewegung entlang einer Achse handelt. Dennoch lässt sich eine größere Zeitzunahme bei der Bewegung in horizontaler (Abb. 5.6) als in vertikaler (Abb. 5.7) Richtung erkennen. Dies liegt an den längeren Fahrstrecken im Vergleich zur vertikalen Richtung (Abb. 5.3). Lediglich die Drehtische sind wieder als Ausnahme zu nennen.

Ein n-move mit $n = 2$ kann schneller durchgeführt werden als eine Kombination aus 2×3-move. Dies liegt an der Einsparung des Brems- und Beschleunigungsvorganges beim Übergang vom ersten 3-move zum zweiten. Hier wird aus zwei Einzelbewegungen in vertikaler oder horizontaler Richtung eine Bewegung über zwei Felder ohne zwischenzeitliches Anhalten. Wird beispielsweise das Verschieben einer Leerstelle um zehn Positionen in horizontaler Richtung angenommen, so kann bei einem ShuttleGrid-System bereits 7% der Zeit eingespart werden (Abb. 5.8). In vertikaler Richtung

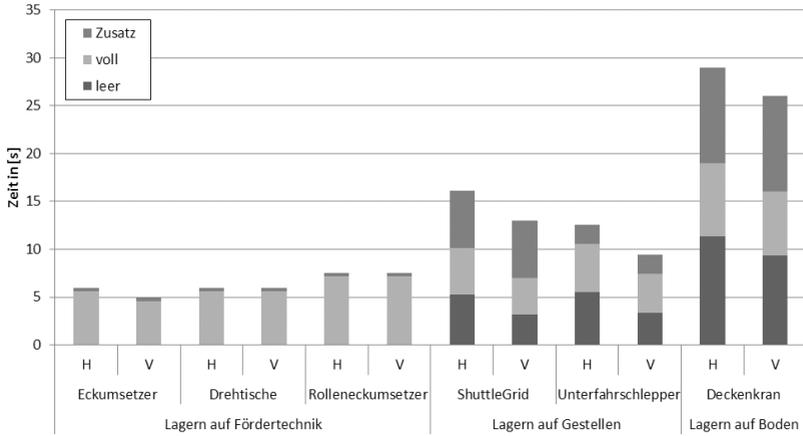


Abbildung 5.5: 3-move nach Bewegungsart

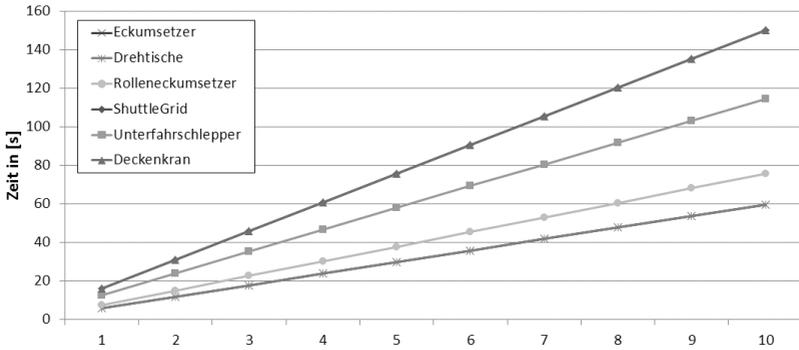


Abbildung 5.6: n-move horizontal in Abhängigkeit der Zahl der zu versetzenden Stellen

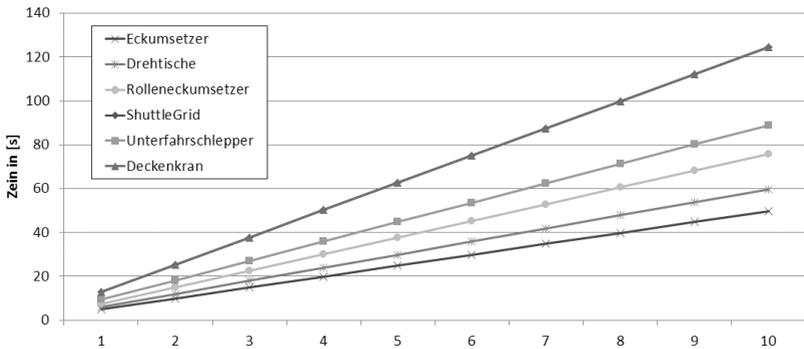


Abbildung 5.7: n-move vertikal in Abhängigkeit der Zahl der zu versetzenden Stellen

fällt dieser Vorteil aufgrund der geringeren Fahrstrecke kleiner aus und beträgt beispielsweise bei zehn Positionen 4%.

5.2.3 Zeitliche Betrachtung 14-move

Im Gegensatz zum Bewegen einer Leerstelle in eine Richtung bedarf es mehr Einzelbewegungen, um eine Ladungseinheit in einem gefüllten Raster um einen Platz zu versetzen. So ist auch die Zusatzzeit prozentual stärker ausgeprägt als bei einem 3-move (Abb. 5.9). Gerade für das ShuttleGrid sind diese Werte überproportional ausgeprägt. Dies liegt daran, dass die Hubbewegung deutlich mehr Zeit beansprucht, als z.B. ein Verriegeln, wie es bei einem Unterfahrschlepper ausreicht.

Der Deckenkran bildet in diesem Vergleich insgesamt das Schlusslicht, was auf die niedrigen Fahrgeschwindigkeiten und die aufwändige Lasthandhabung zurückzuführen ist. Auch kann er bewegungsbedingt eventuelle Vorteile, die er bei einem direkten Anfahren der Ladung hätte, nicht nutzen und fällt somit ab.

Die Systeme mit ortsfester Fördertechnik sind in Bezug auf die Gesamtzeit im Vorteil. Der Wegfall der Leerfahrten bringt im Vergleich einen Vorsprung von ca. 20 Sekunden, welcher aufgrund der niedrigeren Lasthandhabungszeit noch weiter ausgebaut werden kann. So ist das schnellste ortsfeste

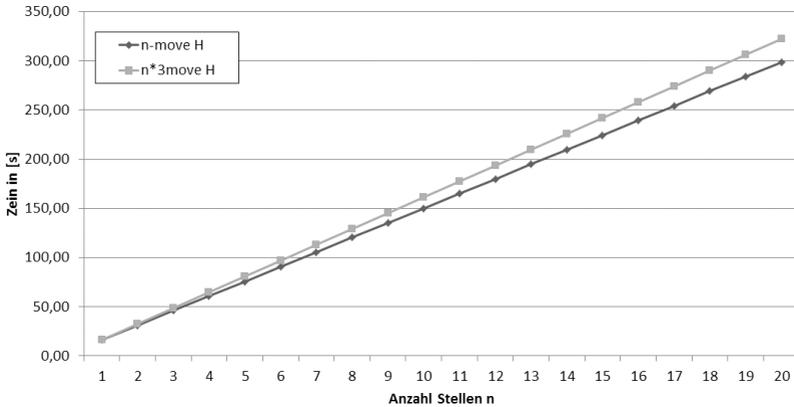


Abbildung 5.8: Vergleich n-move zu n*3-move beim ShuttleGrid in Abhängigkeit der Rastergröße in horizontaler Richtung

System (Eckumsetzer) mit 36 Sekunden in horizontaler und 30 Sekunden in vertikaler Richtung ungefähr doppelt so schnell wie das schnellste unsteigige System (Unterfahrschlepper) mit 63 Sekunden in horizontaler und 61 Sekunden in vertikaler Richtung.

5.2.4 Zeitliche Betrachtung c-move

Der c-move kann auch als Teilbewegung des 14-move gesehen werden. Diese Tatsache lässt es daher nicht verwunderlich erscheinen, dass ein c-move weniger Zeit benötigt als ein 14-move. Die Verteilung der Zeiteinheiten verhält sich ähnlich wie bei den vorangegangenen Grundbewegungen. Die ortsfesten Fördertechniken benötigen zwischen 36 und 58 Sekunden. Der Unterfahrschlepper ist mit 61 bis 63 Sekunden, je nach Richtung, nicht viel langsamer (Abb. 5.10).

Beim Vergleich der reinen Zeitanteile ist ein c-move im Schnitt 38% schneller als ein 14-move (Abb. 5.11). Allerdings sind auch hier ähnlich komplexe Fahrbewegungen durchzuführen, was die Systeme mit ortsfester Förder-technik wieder bevorzugt.

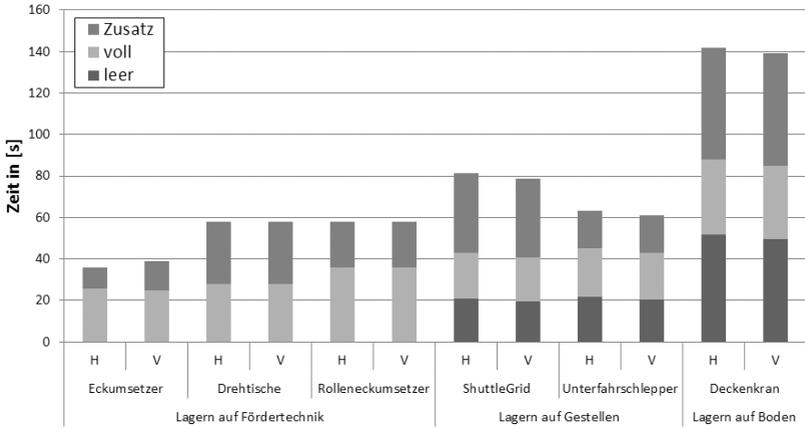


Abbildung 5.9: 14-move nach Bewegungsart

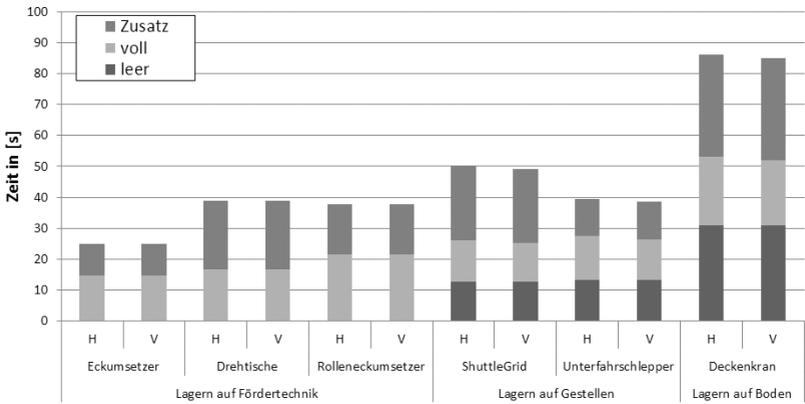


Abbildung 5.10: c-move nach Bewegungsart

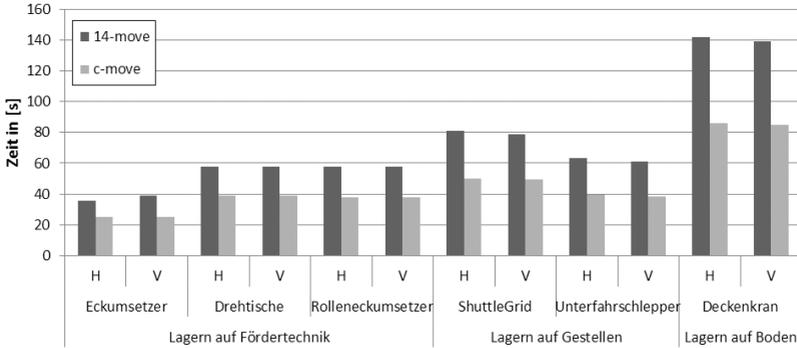


Abbildung 5.11: Zeitlicher Vergleich 14-move zu c-move

5.3 Energieaufwand

Für die energetische Betrachtung ist es notwendig, jeder Einzelbewegung einen energetischen Wert zuordnen zu können. Die in Kapitel 4 vorgestellte Notation erlaubt es, die verschiedenen Bewegungen einheitlich darzustellen. Um die für die beschriebenen Szenarien notwendigen Grundbewegungen auszuführen werden folgende Einzelbewegungen benötigt:

- $H_{1\text{leer}}$
- $V_{1\text{leer}}$
- $H_{2\text{leer}}$
- $V_{2\text{leer}}$
- $H_{1\text{voll}}$
- $V_{1\text{voll}}$
- *Lenken*
- *Auf*
- *Ab*

Die vorgestellten Grundbewegungen setzen sich dann wiederum aus den Einzelbewegungen zusammen. Dies ermöglicht die energetischen Werte der Einzelbewegungen entsprechend der geforderten Bewegung zu addieren.

Diese Addition muss für jede bewegte Ladungseinheit separat erfolgen. Werden unterschiedliche Ladeeinheiten parallel bewegt, so müssen die jeweils zugehörigen Einzelbewegungen ermittelt und addiert werden.

5.3.1 Grundlast des Systems

Jedes Gerät benötigt im Ruhezustand eine gewisse Menge an Energie, um im Einsatzfall betriebsbereit zu sein. Dieser Stand-By Zustand ist von Haushaltsgeräten bekannt. Der Fernseher kann beispielsweise mit der Fernbedienung eingeschaltet werden. Hierfür müssen eine Steuerung und verschiedene Sensoren bestromt werden, was zu einer permanenten Energieaufnahme führt. Für ein GridFlow-System bedeutet dies, dass alle beteiligten technischen Komponenten permanent eine gewisse Menge an Energie benötigen. Dies kann auch als Blindenergie verstanden werden. Je mehr einzelne Einheiten an einem System beteiligt sind, desto größer ist im Normalfall die Leistungsaufnahme, um die Betriebsbereitschaft des Systems zu gewährleisten. Aus Gesprächen mit Fördertechnikherstellern kann für ein Shuttle, welches für den Palettentransport eingesetzt wird und auf der 400 Volt Technik basiert, eine Grundlast von bis zu 70 Watt angenommen werden. Dabei wird die meiste Energie im Frequenzumrichter für die Motoren benötigt.

Bei der Betrachtung der notwendigen Leistung eines Auszugs an Komponenten in solch einem System wird schnell deutlich, woher diese große Leistungsaufnahme kommt.

Ein unverzichtbares Element für heutige, fahrerlose Transportsysteme ist ein Sicherheitssystem. Hierfür werden sehr häufig zertifizierte Laserscanner eingesetzt. Die Leistungsaufnahme solcher Systeme im Stand-by Zustand beträgt laut Datenblatt in der 24 Volt-Variante bereits sechs Watt (siehe Anhang). Des Weiteren werden Systeme benötigt mit denen die Erfassung möglich ist, wann sich eine Ladung auf der Fördertechnik befindet und wann nicht. Jede einfache Lichtschranke trägt somit ein weiteres Watt an Leistungsaufnahme bei. Diese Angaben entsprechen der Leistungsaufnahme ohne anliegende Last am Schaltanschluss. Müssen im Betrieb hiermit Schaltvorgänge ausgeführt werden, so ist diese Schaltleistung zusätzlich erforderlich.

Messungen am IFL des KIT haben an dezentral gesteuerten Fördertechnikanlagen eine Leistungsaufnahme zwischen zehn und 15 Watt pro Modul

	Grundlast
ortsfeste Fördertechnik	10 Watt
unstetige Fördertechnik	20 Watt

Tabelle 5.3: Angenommene Leistungsaufnahme im Ruhezustand pro Fördertechnikelement

im Stand-by-Zustand ergeben. Dabei entfallen auf die Microcontroller basierte Steuerung ca. drei Watt. Der Rest wird durch Sensoren und Motoren beigesteuert.

Basierend darauf wurden für die Berechnungen 10 Watt bei ortsfester Fördertechnik angenommen. Unter der Annahme, dass die un stetigen Förder techniken auf 24 V-Technik basieren und somit eine ähnliche Steuerung wie bei den ortsfesten Systemen zum Einsatz kommt, kann hier 20 Watt als Grundlast angenommen werden (Tab. 5.3). Diese Annahme bezieht sich auf jeweils ein im Gesamtsystem befindliches Förder element.

5.3.2 Energieberechnung

Für jedes technische System wurde für jede mögliche Bewegung die jeweils notwendige Bewegungsenergie berechnet. Die hierfür verwendeten Parameter sind zum einen die variablen Zeitanteile für Beschleunigung, Konstantfahrt und Verzögerung sowie konstante systemspezifischen Parameter (Tab. 5.4).

5.3.3 Grundbewegungen

Ähnlich wie bei den zeitlichen Betrachtungen ist in Abb. 5.12 wieder zu erkennen, dass die Systeme mit ortsfester Fördertechnik weniger Energie benötigen als die Systeme mit un stetiger Technik. Dies ist zum einen auf den Wegfall der Leerfahrten zurückzuführen und zum anderen auf die geringere Eigenmasse, welche bewegt werden muss. Gerade diese große zu bewegende Eigenmasse lässt auch den Deckenkran deutlich schlechter abschneiden als die übrigen Systeme. So benötigt ein System aus Eckumsetzern für einen 3-move in horizontaler Richtung 494 J, während ein ShuttleGrid hierfür 1625 J benötigt. Wird der Energiebedarf des ShuttleGrids als Referenzwert ge-

Lenkzeit	[s]	3	5	5	2	2	1
Ladungsaufnahme	[s]	0,2	0,2	0,2	0,2	1	5
Ladungsabgabe	[s]	0,2	0,2	0,2	0,2	1	5
Grundlast	[W]	10	10	10	10	20	20
Masse System	[kg]	0	200	0	200	250	3000
Masse Ladung	[kg]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Rekuperationsfaktor	[-]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Hubhöhe	[m]	0,05	0	0	0,05	0	0,1
Rollwiderstandskoeffizient	[-]	0,005	0,005	0,005	0,01	0,01	0,005

Tabelle 5.4: systemspezifische Parameter für die Energieberechnung

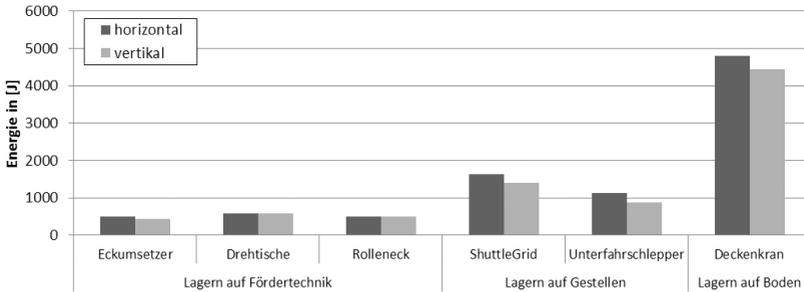


Abbildung 5.12: Energiebedarf 3-move je eingesetzter Technik und Ausrichtung

nommen, so benötigt der Deckenkran im Schnitt 320% der eingesetzten Energie für die Grundbewegungen. Der Eckumsetzer benötigt für dieselbe Aufgabe dagegen im Durchschnitt nur 33% der eingesetzten Energie des ShuttleGrid-Systems.

Die vertikale Bewegung liegt beim Energiebedarf, bis auf die Ausnahme beim Drehtisch, immer unterhalb demjenigen der horizontalen Bewegung (Abb. 5.12). Dies ist aufgrund der kürzeren Strecke in vertikaler Richtung zu der horizontalen leicht zu erklären. Bezieht sich die benötigte Energie aber auf die zurückgelegte Strecke, so dreht sich der Vorteil klar um. Da nun für eine längere Strecke weniger Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge und vor allem weniger Lasthandhabungen notwendig sind, benötigt ein ShuttleGrid-System nur 83% der Energie in horizontaler Richtung wie in vertikaler Richtung, bezogen auf die Fahrstrecke beim 3-move. Der Deckenkran benötigt dann sogar nur 69% der eingesetzten Energie in Bezug auf die Fahrstrecke.

Die zeitlichen Vorteile des c-moves gegenüber dem 14-move liegen im Schnitt bei 38% (Abb. 5.11). Bei der Betrachtung des energetischen Aufwands der zu Grunde liegenden Grundbewegungen wird ein weiterer Vorteil sichtbar. Da es sich beim c-move um einen Teil des 14-move handelt, benötigt er auch nur einen Teil der Energie. In Zahlen bedeutet dies, dass der c-move im Schnitt nur 53% der Energie des 14-move benötigt (Abb. 5.13).

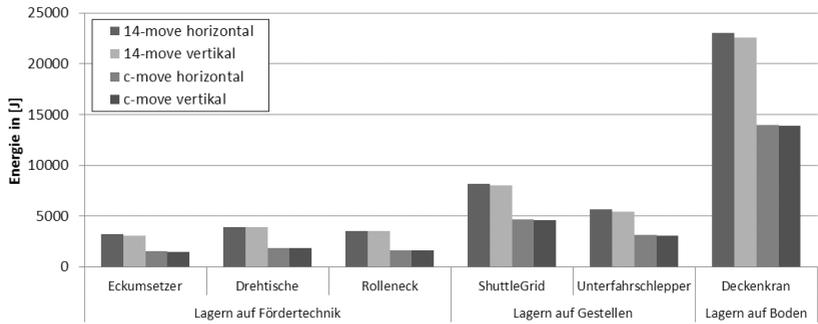


Abbildung 5.13: Vergleich des Energiebedarfs von 14- und c-move je eingesetzter Technik und Ausrichtung

6 Analytische Auswertung der Vergleichssituationen

Die in Kapitel 4 vorgestellten Anfangssituationen bilden die Grundlage für den analytischen Vergleich der Varianten. Anhand der Anfangssituationen werden für die verschiedenen Varianten Spielzeit, Durchsatz, energetischer Aufwand und Platzbedarf berechnet. Für die Rechenbeispiele wird eine Gleichverteilung der Ladung im Raster angenommen. Für die Varianten mit unstetiger Fördertechnik arbeitet in den Situationen jeweils ein Fahrzeug. Bei den Varianten mit ortsfester Fördertechnik wird für eine bessere Vergleichbarkeit auf das Verschieben von ganzen Blöcken verzichtet und immer nur eine Ladungseinheit zur Zeit bewegt.

Für die Spielzeit und Durchsatzberechnung wird darüber hinaus davon ausgegangen, dass der Zugriff auf jeden Lagerplatz gleich wahrscheinlich ist.

6.1 Situation 1

Situation 1 beschreibt eine rechteckige Lagerfläche, bei der alle Plätze bis auf einen gefüllt sind. Mit größer werdender Lagerfläche nimmt somit auch der Füllgrad zu. Angefangen bei 75% für ein rechteckiges Grid mit Kantenlänge $K = 2$ nähert sich der Füllgrad für größere Lagerraster 100% an.

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \frac{K^2 - 1}{K^2} = 100\% \quad (6.1)$$

In Situation 1 wird die Palette, welche sich auf der diagonal gegenüberliegenden Position zum Auslagerungspunkt des Lagers befindet, ausgelagert. Somit ist mit zunehmendem Füllgrad auch mit einer Zunahme der Spielzeit zu rechnen, da mehr zusätzliche Ladungseinheiten umgelagert werden

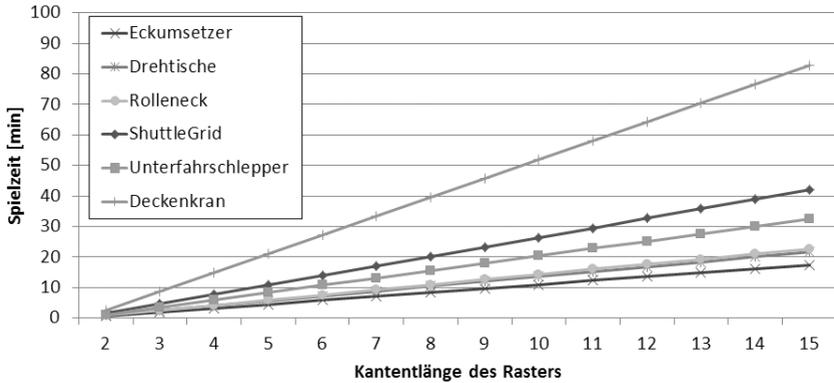


Abbildung 6.1: Spielzeit Situation 1 in Abhängigkeit der Rastergröße

müssen. Angefangen bei einer sehr kleinen Fläche liegen die verschiedenen technischen Varianten noch sehr eng beieinander. Die ortsfesten Systeme benötigen etwas unter einer Minute, während die meisten unstetigen Systeme ungefähr bei einer Minute liegen. Lediglich der Deckenkran benötigt hier schon deutlich mehr Zeit mit etwas mehr als 2,5 Minuten.

Vergrößert sich die Lagerfläche, so werden auch die zeitlichen Unterschiede zwischen den Varianten absolut gesehen deutlicher. Prozentual bleiben die Abstände jedoch gleich. Wird die Spielzeit des Unterfahrschleppers auf 100% normiert, so ergeben sich für die schnellste Variante, dem Eckumsetzer, 42% der Zugriffszeit. Der Deckenkran benötigt dagegen für dieselbe Aufgabe 197% der Zeit (Abb. 6.2).

In absoluten Zahlen bedeutet dies, dass ein System, bestehend aus Eckumsetzern, für das Auslagern der Ladung, wie in Situation 1 beschrieben, bei einer Kantlänge von 15 Plätzen über 21 Minuten und ein ShuttleGrid-System, welches die Ladung anhebt 42 Minuten benötigt. Der Deckenkran benötigt für dieselbe Aufgabe fast 83 Minuten und fällt somit noch stärker zurück (Abb. 6.1). Diese große Zugriffszeit ist auf die vielen notwendigen Einzelbewegungen zurück zu führen. Für das Auslagern mit unstetiger Fördertechnik sind bei einem 15×15 Grid, was einer Anzahl von 224 Lagerplätzen entspricht, ein n-move von 14 Feldern in horizontaler Richtung, ein n-move von 13 Feldern in vertikaler Richtung, 13 mal ein 14-move hori-

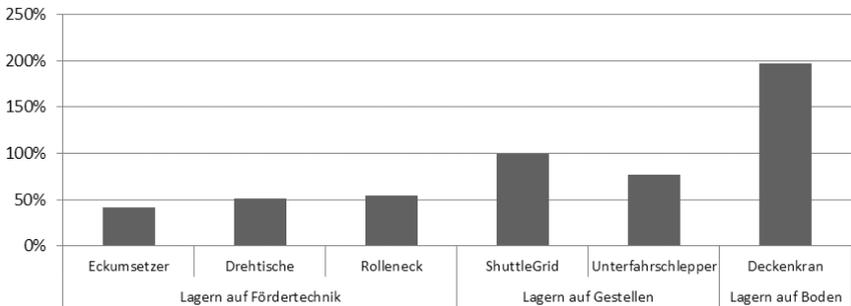


Abbildung 6.2: Spielzeit Situation 1 in Prozent - Zeit für ein ShuttleGrid auf 100% normiert

zontal, 13 mal ein 14-move vertikal, ein c-move und noch weitere einzelne Bewegungen wie das zusätzliche Aufnehmen und Abgeben der Ladung notwendig. Werden die notwendigen Bewegungen bis auf die Einzelbewegungen heruntergebrochen, so sind bei einem 15×15 Grid 863 Einzelbewegungen notwendig (Tab. 6.1).

Bei der Betrachtung des Durchsatzes lässt sich erkennen (Abb. 6.3), dass systemunabhängig die Durchsätze mit steigender Lagergröße stark abnehmen. Mit einem modernen Regalbediengerät, dessen Durchsatz vor allem von der Länge und Höhe der Regalgasse abhängig ist, können stündlich im Minimum bis zu 20 Paletten pro Gasse ausgelagert werden. Dieser Durchsatz wird für ein 4×4 Grid in Situation 1 gerade noch von einem System aus Eckumsetzern, dem in diesem Vergleich durchsatzstärksten der betrachteten Systeme, erreicht (Abb. 6.3).

Die notwendige Energie zum Bewegen der Ladungseinheit hängt stark von der Größe des Grids und damit der Anzahl der notwendigen Bewegungen ab. Für Systeme mit unstetiger Fördertechnik besteht hier ein direkter Zusammenhang. Dadurch, dass die Bewegungen durch ein einziges Fördertechnikelement ausgeführt werden, können die zugehörigen Energien addiert werden. Für Systeme mit ortsfester Fördertechnik trifft dies nicht zu. Hier benötigt jedes Fördertechnikelement, welches sich im System befindet, über die gesamte Zeit des Vorgangs Energie, welche dem Auslagerungsprozess zugerechnet werden muss. Diese Menge ist pro Element nicht sehr groß,

Bewegung	Anzahl	Einzelbewegungen
n-move H	14	57
n-move V	13	53
14-move H	13	364
14-move V	13	364
c-move H	1	18
V1-leer	1	1
V1-voll	2	2
Auf	1	1
Ab	1	1
Lenken	2	2
Einzelbewegungen gesamt:		863

Tabelle 6.1: Notwendige Bewegungen zum Auslagern in Situation 1 für ein 15×15 Grid mit un stetiger Fördertechnik

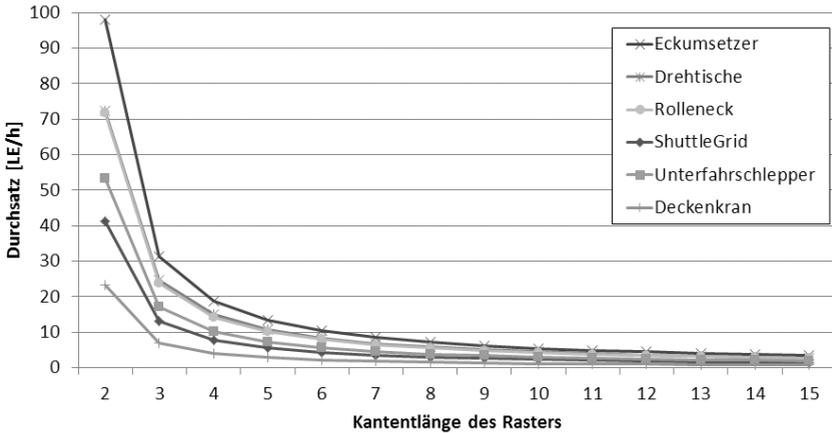
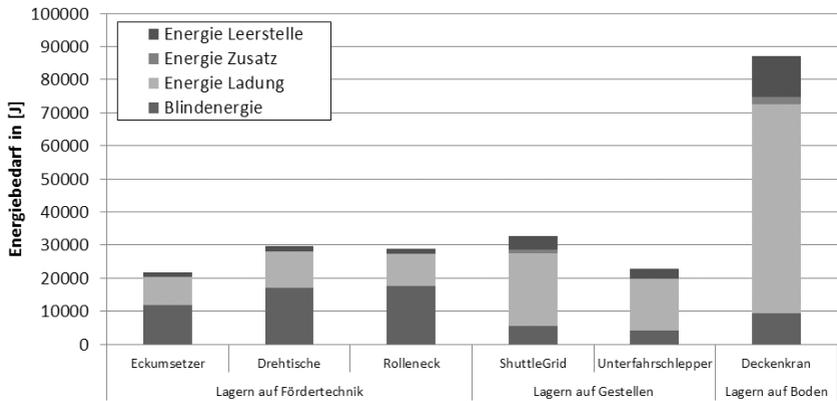


Abbildung 6.3: Durchsatz Situation 1 in Abhängigkeit der Lagergröße

Abbildung 6.4: Energieaufwand Situation 1, Lagergröße: 3×3

weshalb sie bei kleinen Lagerflächen auch kaum zum Tragen kommt. Werden die Lagerflächen jedoch größer, steigt der Anteil der für den Stand-By Zustand benötigten Energie überproportional an. Da in den beschriebenen Situationen von einer auf die Anzahl bezogenen quadratischen Fläche ausgegangen wird, bedeutet dies bei der Vergrößerung der Kantenlänge von drei auf 15 Felder eine Zunahme der beteiligten Elemente um den Faktor 25. Diesen Anstieg machen die Abb. 6.4 und Abb. 6.5 deutlich. Während sich der Energiezuwachs der Systeme mit unstetiger Fördertechnik im Rahmen von 910% bis 920% proportional zur benötigten Zeit verhält, wächst der Energiebedarf bei Systemen mit ortsfester Fördertechnik im Schnitt um 123000%. Damit schrumpft der Anteil der Energie, welche zum Bewegen der Ladung notwendig ist, auf 3 bis 4 % der Gesamtenergie. Für noch größere Lagerflächen verschlechtert sich das Verhältnis weiter.

Abbildung 6.6 zeigt den Verlauf der Energieentwicklung in Abhängigkeit der Lagergröße für Situation 1. Deutlich ist die überproportionale Zunahme des Energiebedarfs für Systeme mit ortsfester Fördertechnik zu erkennen.

Abbildung 6.3 zeigt, dass Systeme mit ortsfester Fördertechnik einen höheren Durchsatz erreichen als Systeme mit unstetiger Technik. Wird die hierfür aufgewendete Energie in das Verhältnis zum Durchsatz gesetzt, so ergibt sich ein anderes Bild. Obwohl die ortsfesten Systeme deutlich höhere

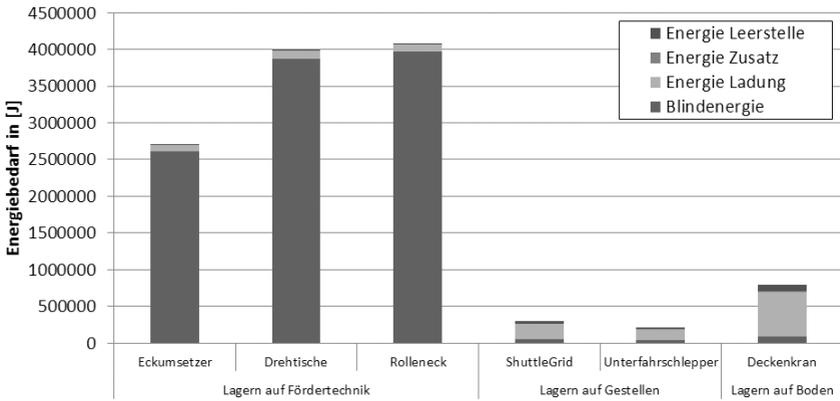


Abbildung 6.5: Energieaufwand Situation 1, Lagergröße: 15 × 15

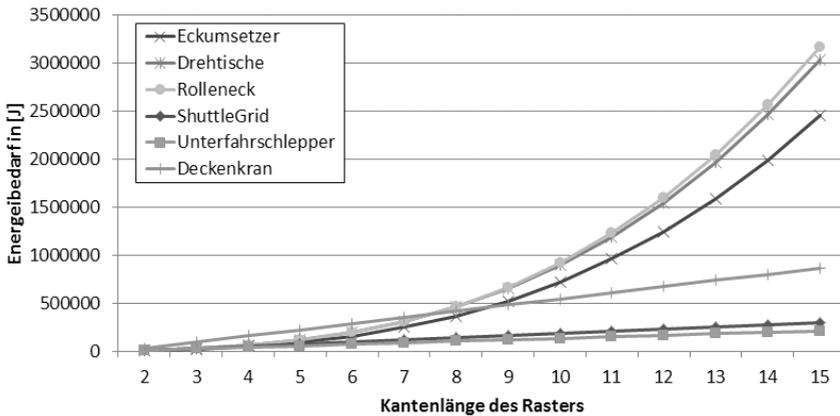


Abbildung 6.6: Energieaufwand Situation 1 in Abhängigkeit der Lagergröße

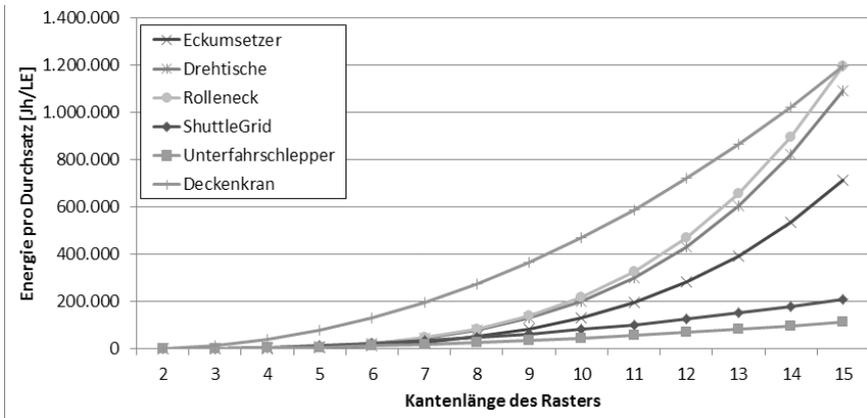


Abbildung 6.7: Situation 1 - Energie pro Durchsatz in Abhängigkeit der Lagergröße

Durchsätze produzieren können, benötigen sie hierfür aufgrund der großen Anzahl an Elementen überproportional mehr Energie. Bei wachsender Lagergröße ist je nach System früher oder später ein Umschlagen zum System mit unstetiger Fördertechnik zu erkennen. Wird vergleichsweise ein System aus Eckumsetzern und eines aus Unterfahrschleppern betrachtet, so ist für Situation 1 dieser Punkt bei einem Raster mit der Kantenlänge $K = 5$ erreicht. Bei einer Kantenlänge von acht Feldern hat das ShuttleGrid ein besseres Verhältnis von Energie zu Durchsatz (Abb. 6.7). Andere unstetige Techniken benötigen größere Lagerraster, aber letztendlich schneiden bei diesem Vergleich alle unstetigen System besser ab als solche mit ortsfester Fördertechnik.

6.2 Situation 2

Die Ausgangslage für Situation 2 ist dieselbe wie in Situation 1. Die Fläche und der Füllgrad sind identisch. Der Unterschied liegt in der Art der Bewegung. Die Ladungsträger werden in Situation 2 mittels c-move an die gegenüberliegende Ecke des Rasters befördert. In einem Lagerraster der

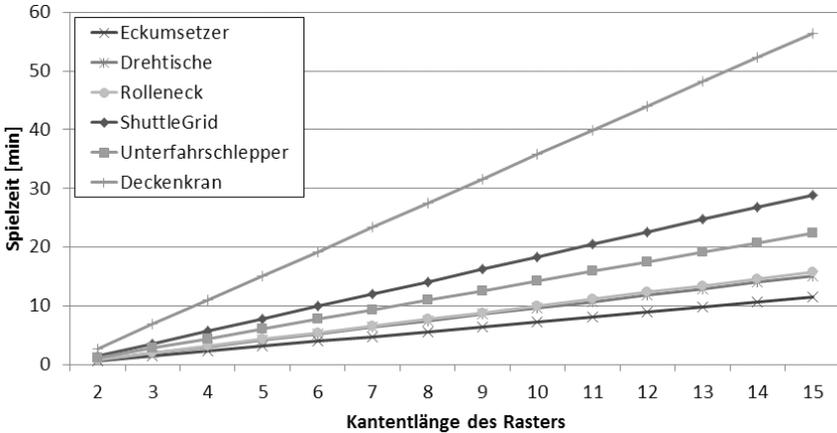


Abbildung 6.8: Spielzeit Situation 2 in Abhängigkeit der Rastergröße

Kantenlänge $K = 15$ benötigt ein ShuttleGrid-System ungefähr 29 Minuten und ein System bestehend aus Eckumsetzern 11,5 Minuten (Abb. 6.8).

Bei der Betrachtung der prozentualen Unterschiede, wobei die Spielzeit eines ShuttleGrid-Systems auf 100% normiert ist, benötigt das schnellste System (Eckumsetzer) für dieselbe Aufgabe 40% der Zeit. Das schnellste System mit unetwiger Fördertechnik, der Unterfahrschlepper, benötigt 67% der Zeit. Das Schlusslicht übernimmt in dieser Betrachtung der Deckenkran, welcher 195% der Zeit benötigt (Abb. 6.9).

In Situation 2 sind, ähnlich wie in Situation 1, bei steigender Lagergröße sehr viele Einzelbewegungen notwendig, um die Ladung aus dem Grid heraus zu bewegen. Für das Verschieben der für die Bewegung notwendigen Leerstelle wird dieselbe Art und Anzahl an Einzelbewegungen wie in Situation 1 benötigt. Für eine Lagerfläche mit 15×15 Feldern sind dies alleine 110 Einzelbewegungen beim Einsatz von unetwiger Fördertechnik. Dabei werden alle Einzelschritte unabhängig von ihrer Dauer gezählt. Ist die Leerstelle bei der zu bewegenden Ladung angekommen, fällt für Situation 2 auf, dass kein 14-move verwendet wird. Stattdessen erfolgt der Transport ausschließlich mittels Aneinanderreihung des c-moves, solange es sich um ein rechteckiges Grid handelt. Damit sind für ein 15×15 Lagergitter insgesamt 603 (Tab. 6.2) Einzelbewegungen notwendig, um die

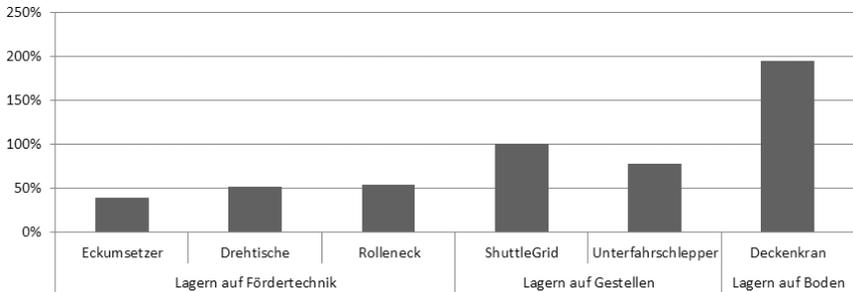


Abbildung 6.9: Spielzeit Situation 2 - ShuttleGrid auf 100% normiert

Bewegung	Anzahl	Einzelbewegung
n-move H	14	57
n-move V	13	53
c-move H	14	252
c-move V	13	234
V1-leer	1	1
V2-voll	2	2
Auf	2	2
Ab	1	1
Lenken	1	1
Einzelbewegung gesamt:		603

Tabelle 6.2: Notwendige Bewegungen zum Auslagern in Situation 2 für ein 15×15 Lagerraster mit unstetiger Fördertechnik

Ladung aus dem Raster auszulagern. In Situation 1 waren es im Vergleich 863 Einzelbewegungen. Für Systeme mit ortsfester Fördertechnik kann der Anteil der Leerfahrten abgezogen werden, was einer Anzahl von 409 Einzelbewegungen entspricht.

Der Durchsatz verhält sich für Situation 2 ähnlich zu Situation 1. Mit größer werdendem Raster ist ein starker Einbruch beim Durchsatz zu erkennen (Abb. 6.10).

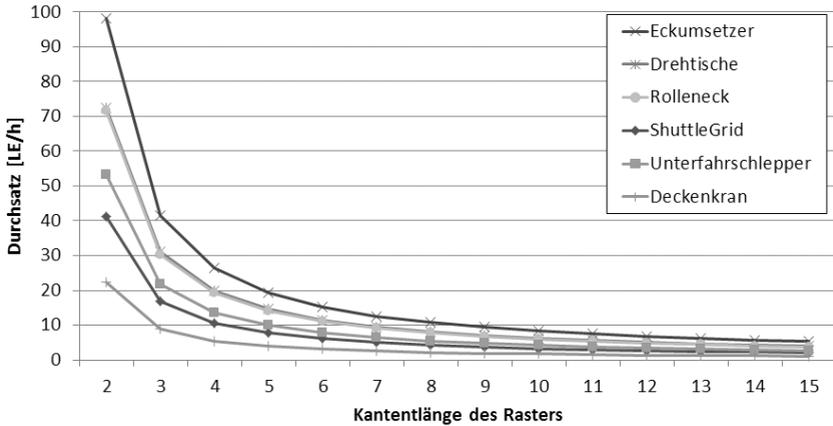


Abbildung 6.10: Durchsatz Situation 2 in Abhängigkeit der Lagergröße

In Situation 2 ist ebenfalls ein großer Zuwachs an notwendiger Energie bei zunehmender Lagerfläche zu verzeichnen (Abb. 6.11). Die Gründe hierfür sind dieselben wie in Situation 1.

Auch ist der Energiezuwachs bei steigender Lagergröße für ortsfeste Förder-technik wieder überproportional groß (Abb. 6.12 und Abb. 6.13). Dieser Anstieg kommt wieder aus der für den Stand-By-Zustand benötigten Energie.

Das Verhältnis aus Energie pro Durchsatz (Abb. 6.14) ergibt für Situation 2 ein sehr ähnliches Bild wie in Situation 1. Die Schnittpunkte sind etwas verschoben, dies birgt aber aufgrund der festen Schrittweite, welche durch die Ganzzahligkeit der Stellplätze bedingt ist, keine Änderung im Ergebnis. Somit liegt auch hier der Schnittpunkt der Koeffizienten von Eckumsetzer und Unterfahrschlepper bei einer Lagergröße mit der Kantenlänge $K = 5$.

6.3 Situation 3

Situation 3 beschreibt ein rechteckiges Lagerraster, dessen Lagerplätze bis auf die Diagonale vollständig gefüllt sind. Somit besitzt jede Zeile im Lager eine eigene Leerstelle. Im Verhältnis zu Situation 1 und 2 ist der Füllgrad

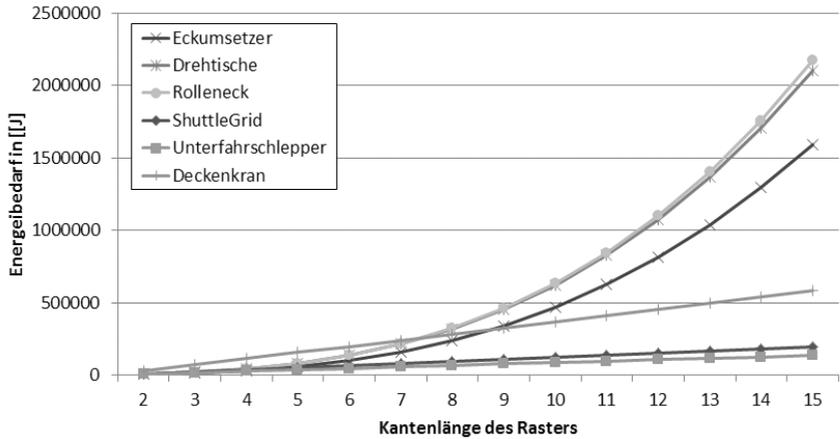


Abbildung 6.11: Energieaufwand Situation 2 in Abhängigkeit der Lagergröße

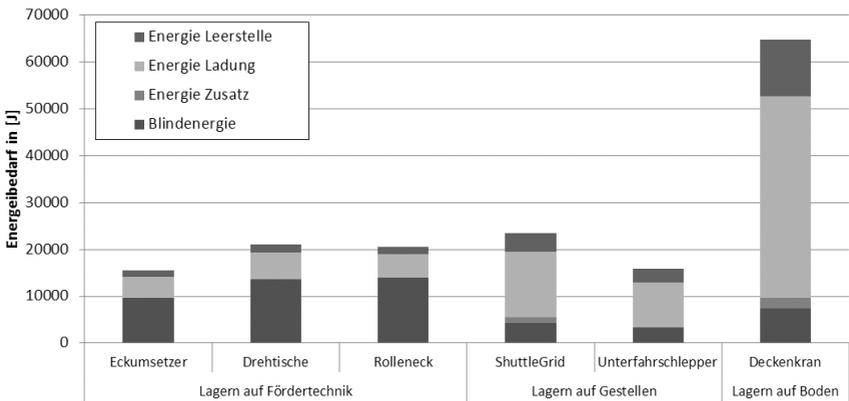


Abbildung 6.12: Energieaufwand Situation 2, Lagergröße 3x3

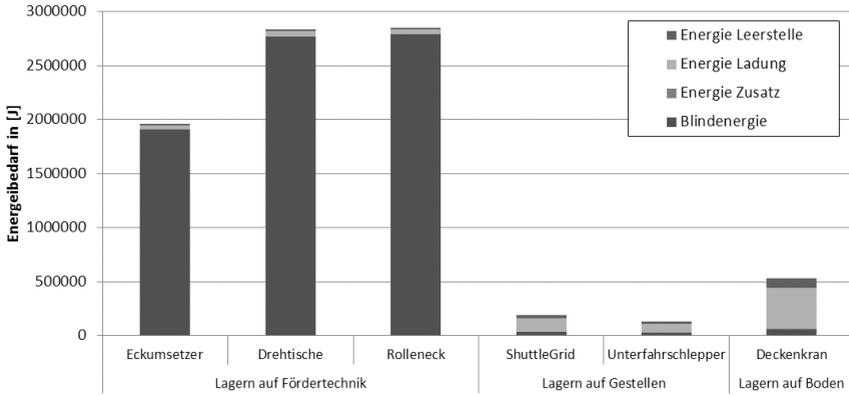


Abbildung 6.13: Energieaufwand Situation 2, Lagergröße 15 × 15

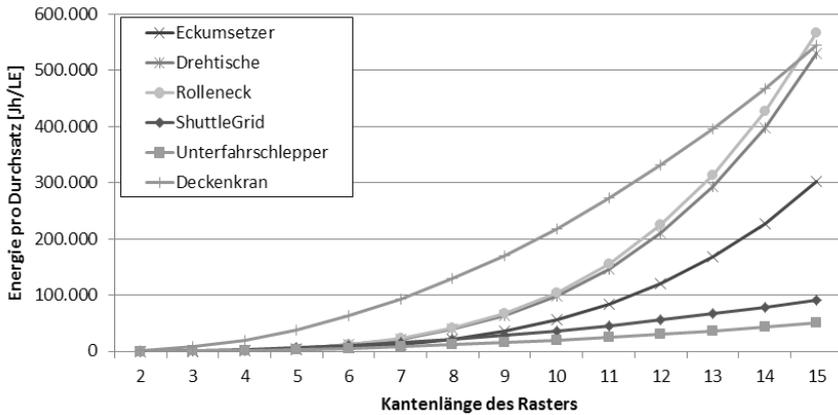


Abbildung 6.14: Situation 2 - Energie pro Durchsatz in Abhängigkeit der Lagergröße

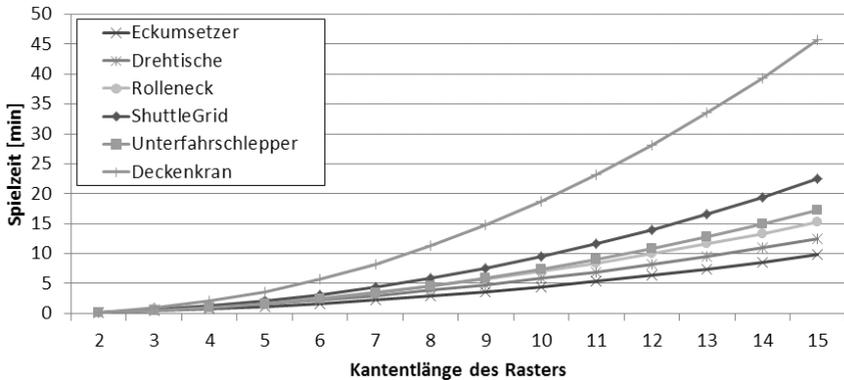


Abbildung 6.15: Spielzeit Situation 3 in Abhängigkeit der Lagergröße

somit reduziert. Der anfängliche Füllgrad für ein Lagerraster mit der Kantenlänge $K = 2$ liegt bei 50%. Für sehr große Lagerflächen nimmt er jedoch wie in Situation 1 und 2 ebenfalls 100% an. Im Verhältnis dauert dies jedoch etwas länger.

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \frac{K^2 - K}{K^2} = 100\% \quad (6.2)$$

Die für diesen Vergleich interessanten Lagergrößen mit einer Kantenlänge von $K = 2$ bis $K = 15$ haben einen Füllgrad von 50% bis 93%.

Die Spielzeit der Systeme liegt bei kleinen Lagerflächen wieder sehr eng beieinander (Abb. 6.15). Aufgrund der Startbedingungen sind die Werte für die Spielzeit diesmal für unstetige Systeme bei einer Lagergröße mit 2×2 Feldern deutlich geringer, als die von ortsfesten Systemen. Dies liegt an der Anordnung der Ladungsträger zu Beginn der Vergleichssituation. Da bei dieser Lagergröße keine Ladungsträger umgelagert werden müssen bzw. sich die Leerstelle unmittelbar unter der auszulagernden Ladungseinheit befindet und die Startposition bereits unter der zu transportierenden Ladung ist, können die unstetigen System ihre tendenziell höhere Fördergeschwindigkeit ausspielen. Lediglich der Deckenkran, als unstetiges System, profitiert aufgrund der langsamen Geschwindigkeiten nicht davon.

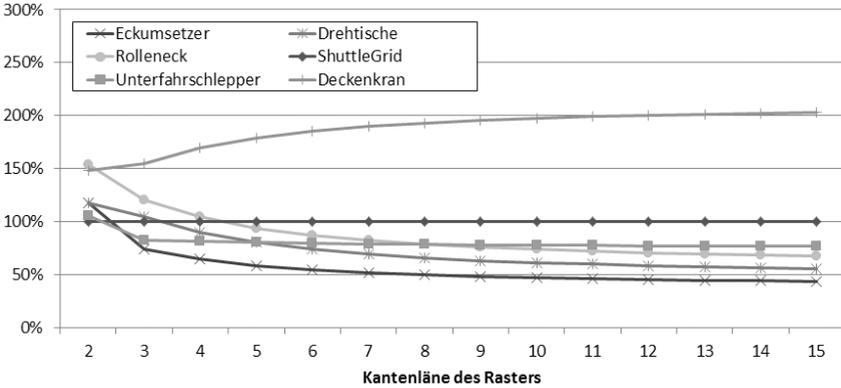


Abbildung 6.16: Situation 3 - Spielzeit des ShuttleGrid auf 100% normiert, in Abhängigkeit der Lagergröße

Sobald das Lagerraster größer wird, fallen die unstetigen Systeme wieder hinter die ortsfesten Systeme zurück. Dies liegt daran, dass nun wieder die für das Umlagern der Ladung notwendigen Leerfahrten hinzu kommen, welche Zeit kosten. Die Spielzeit wächst in Situation 3 nicht linear mit der Kantenlänge mit, sondern quadratisch zur Änderung der Kantenlänge (Abb. 6.15). Dadurch ändert sich auch das Verhältnis der Spielzeiten mit größer werdendem Lagerraster (Abb. 6.16). Bei einer Lagergröße von 5×5 Feldern benötigt das schnellste ortsfeste System 56 Sekunden und das schnellste System mit unstetiger Fördertechnik 1 Minute 39 Sekunden. Bei einer Größe von 15×15 Feldern liegt das schnellste System bei etwas unter 9 Minuten. Der Deckenkran benötigt für dieselbe Aufgabe über 58 Minuten. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Zugriffszeiten der ortsfesten Systeme anfangs über denen der unstetigen Systeme liegen, dann aber sehr schnell wieder kleinere Werte annehmen. Für größere Lagerraster liegen die Werte für ortsfeste Systeme zwischen 40% und 60%. Der Unterfahrschlepper erreicht 77% der Durchsatzzeit bezogen auf ein ShuttleGrid-System, welches die Ladung anhebt. Der Brückenkran fällt mit über 250% der Zeit dagegen für große Raster zurück (Abb. 6.16).

Bei der Betrachtung der Anzahl der Einzelbewegungen fällt auf, dass es sich hauptsächlich um n-moves handelt, mit denen die Leerstelle vor die zu

Bewegung	Anzahl	Einzelbewegung
n-move H	91	364
V1-leer	12	12
H(K-3)-leer	12	12
Auf	1	1
Ab	1	1
Lenken	39	39
Einzelbewegung gesamt:		429

Tabelle 6.3: Notwendige Bewegungen zum Auslagern in Situation 3 für ein 15×15 Lagerraster mit un stetiger Fördertechnik

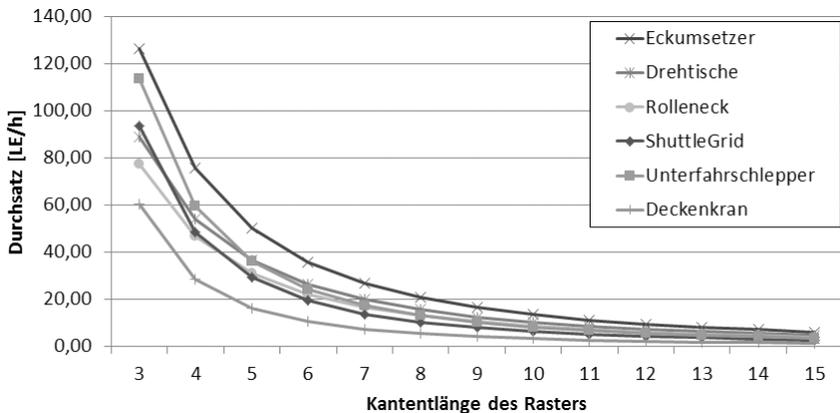


Abbildung 6.17: Durchsatz Situation 3 in Abhängigkeit der Lagergröße

entnehmende Ladungseinheit bewegt wird (Tab. 6.3). Aufgrund der Strategie bleibt die eigentliche Ladungseinheit bis zum Schluss an ihrem Platz und wird dann in einer durchgängigen Bewegung aus dem Lagerraster herausbefördert. Da eine große Strecke auf einmal zurückgelegt wird, entfallen die vielen Zwischenstopps und somit werden auch die Anzahl der Einzelbewegungen im Vergleich zu Situation 1 und 2 reduziert.

Der Durchsatz nimmt mit größer werdenden Lagerflächen auch für Szenario 3, unabhängig der eingesetzten Variante, wieder deutlich ab (Abb. 6.17).

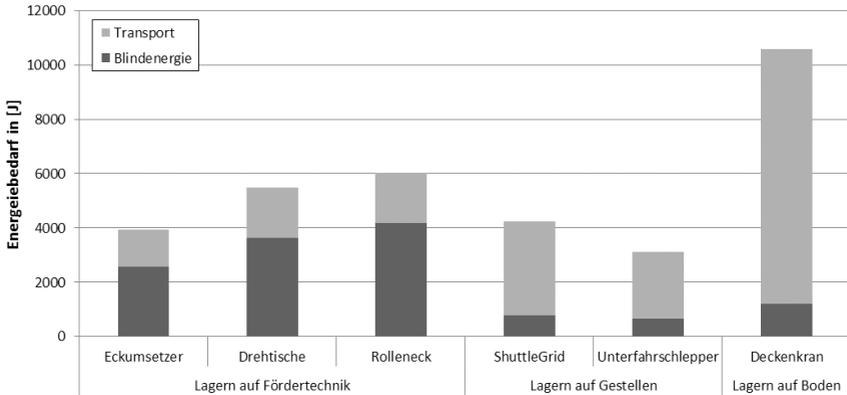


Abbildung 6.18: Energieaufwand Situation 3, Lagergröße 3×3

Im Hinblick auf den Energieaufwand dominiert bei kleinen Rastern und unstetigen Systemen, die für den Transport notwendige Energiemenge. Bei ortsfesten Systemen ist schon bei kleinen Lagergrößen der Anteil der Stand-By-Energie sehr groß (Abb. 6.18). Bei größeren Lagerrastern verschiebt sich dieses Verhältnis weiter (Abb. 6.19). So liegt der Anteil der für den Transport genutzten Energie bei unstetigen Systemen unabhängig von der Lagergröße bei über 80%.

Für Systeme mit ortsfester Fördertechnik liegt das Verhältnis bei einem 3×3 Grid zwischen 38% und 41%. Bei einem Grid der Größe 15×15 wird sogar nur noch 3% bis 4% der aufgewandten Energie für den Ladungstransport genutzt (Abb. 6.19).

Der Energieaufwand wächst proportional zur Anzahl der Bewegungen und damit zur Zeit. Hinzu kommt bei ortsfester Fördertechnik noch die Anzahl der Elemente im Raster, welche quadratisch steigt. Aufgrund der nichtlinearen Zunahme der notwendigen Bewegungen, nimmt aber auch der Energiebedarf für unstetige Systeme mit größer werdendem Raster stärker zu als in Situation 1 und 2.

Beim Verhältnis Energie pro Durchsatz sind anfänglich die ortsfesten Systeme im Vorteil. Dies liegt wiederum an der geringeren Anzahl notwendiger Bewegungen. Ab einer Lagergröße von 5×5 liegt die unstetige Variante als

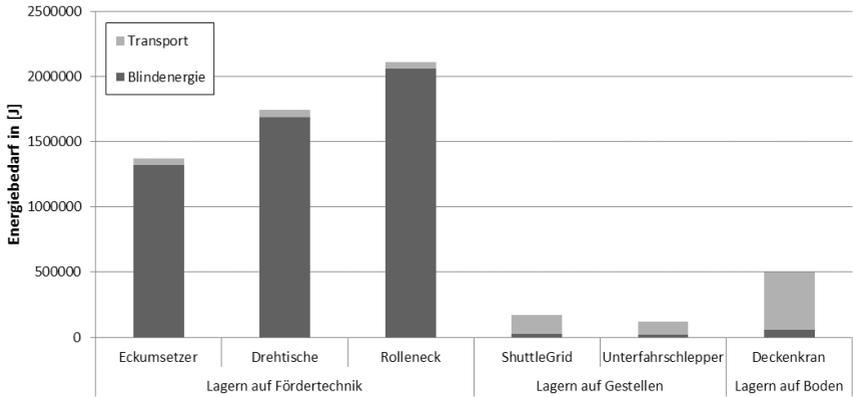
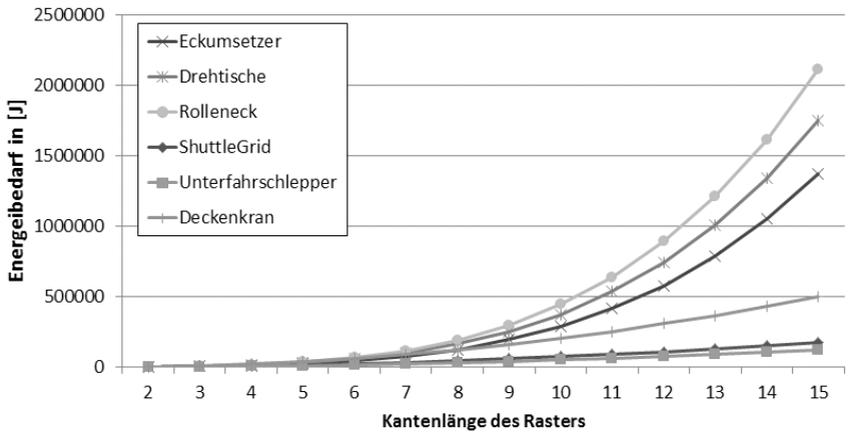
Abbildung 6.19: Energieaufwand Situation 3, Lagergröße 15×15 

Abbildung 6.20: Energieaufwand Situation 3 in Abhängigkeit der Lagergröße

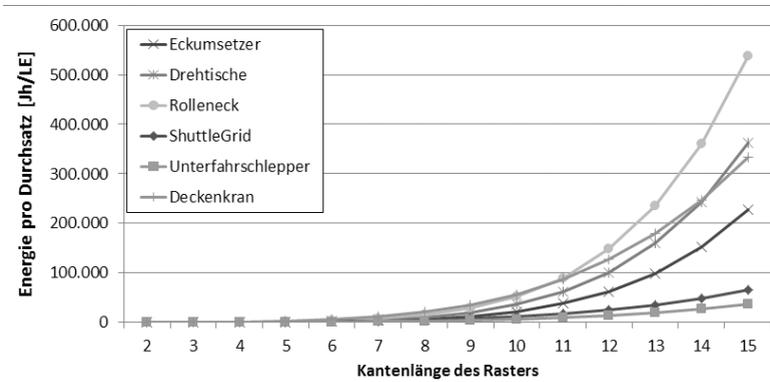


Abbildung 6.21: Situation 3 - Energie pro Durchsatz in Abhängigkeit der Lagergröße

Unterfahrschlepper im Vergleich vorne (Abb. 6.21). Da hier keine Hubbewegung gegen die Schwerkraft ausgeführt werden müssen, um die Ladung zu bewegen, arbeitet dieses System auf die Dauer gesehen am effizientesten.

6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Situation 2 wird dieselbe Transportaufgabe mit einer grundsätzlich anderen Strategie gelöst als in Situation 1. Bei der Planung von fördertechnischen Anlagen ist die Anzahl der Richtungswechsel gering zu halten, da hier immer eine Unterbrechung der Bewegung stattfindet. Auf den ersten Blick scheint es daher kontraproduktiv die gleiche Aufgabe mit möglichst vielen Richtungswechseln der Ladung durchzuführen. In Anbetracht der sequentiellen Arbeitsweise wird klar, dass die eigentliche eckig erscheinende Bewegung weniger Richtungswechsel beinhaltet, als die ursprüngliche in Situation 1 beschriebene Strategie.

In Hinblick auf die Anzahl der Einzelbewegungen ist zu erkennen, dass in Situation 2 dieselbe Transportaufgabe mit einer deutlich geringeren Anzahl an Einzelbewegungen durchgeführt wird. Für das Beispiel in einem 15×15 Lagerraster mit verteilter Fördertechnik werden für Situation 1 genau 863

	Situation 1	Situation 2	Situation 3
Einzelbewegungen	863	603	429
Füllgrad	99%	99%	93%
Zugriffszeit	32,4min	22,4min	17,2min
Energiebedarf	211.251J	134.513J	120.030J
theor. Durchsatz	$1,85 \frac{1}{h}$	$2,68 \frac{1}{h}$	$3,48 \frac{1}{h}$

Tabelle 6.4: Vergleich Situation 1, 2 und 3, Lagergröße 15×15 , Unterfahrschlepper

Einzelbewegungen und für Situation 2 nur 603 Einzelbewegungen benötigt. Dies allein ist eine Einsparung von knapp über 30%.

Energetisch betrachtet ist der Vorteil noch etwas stärker ausgeprägt. Mit der Strategie nach Situation 2 wird im Schnitt nur 66% der Energie von Situation 1 benötigt und dies unabhängig von der eingesetzten Technik. In Zahlen ausgedrückt bedeutet dies für ein System bestehend aus einem Unterfahrschlepper 211.251 Joule für Situation 1 und 134.513 Joule für Situation 2.

Situation 3 beruht auf einer anderen Strategie. Hier wird pro Reihe im Grid eine Leerstelle vorgehalten. Bei kleinen Lagern wirkt sich dies noch deutlich auf den Lagerfüllgrad aus. So kann in einem 9×9 großen Raster mit der in Situation 3 angewandten Strategie nur 90% der Ladung untergebracht werden, im Vergleich zu den Strategien aus Situation 1 und 2 (Abb. 6.22). Dafür wird aber eine bessere Zugriffszeit erzielt (Tab. 6.4). Bei gleicher Lagergröße (15×15 Felder) erzielt ein System bestehend aus einem Unterfahrschlepper für Situation 3 eine Zugriffszeit von unter 18 Minuten. In Situation 2 sind es über 22 Minuten und in Situation 1 über 32 Minuten.

Für größere Lagerraster nimmt der prozentuale Verlust an Lagerfläche weiter ab. Bei einer Lagergröße von 30×30 Felder liegt der Unterschied bei 3%. Dies bedeutet, dass in einem Lagerraster mit der in Situation 3 angewandten Strategie lediglich 29 Lagerplätze weniger belegt werden können, bei einer Gesamtanzahl von 899 Lagerplätzen, als mit einer Strategie nach Situation 1 oder 2.

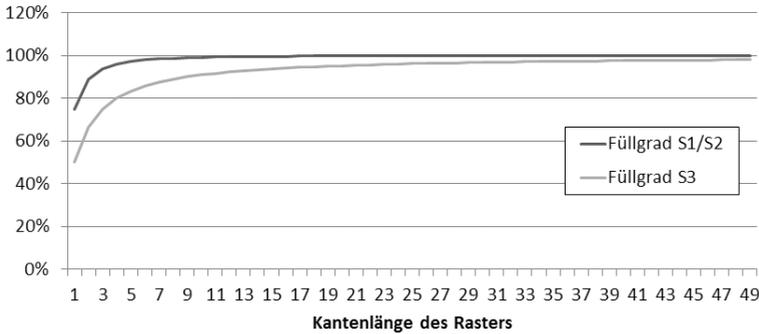


Abbildung 6.22: Füllgrad Situation 1, 2 und 3 in Abhängigkeit der Lagergröße

6.5 Überlegungen zur Zugriffszeit und dem Durchsatz

In der Praxis gilt es das Verhältnis zwischen dem betrieblich wahrscheinlichen und dem technisch maximal möglichen Durchsatz zu beachten (Arnold und Furmans 2009). Da es sich in dieser Arbeit um fiktive Situationen handelt und innerhalb der Berechnung nicht alle möglichen Einflüsse abgebildet werden können, handelt es sich bei den Durchsatzberechnungen um den jeweiligen, theoretisch maximalen Durchsatz (Grenzdurchsatz). Wichtig hierbei ist auch, dass eine Gleichverteilung der Ladungseinheiten in der Lagerfläche vorliegt. Da bei einem Regalbediengerät und einfachtiefer Lagerung der Zugriff auf jeden Stellplatz unmittelbar erfolgen kann, errechnet sich die mittlere Spielzeit wie in Kapitel 4 angegeben, aus dem Durchschnitt der Einzelspielzeiten.

Wie in Kapitel 4 erläutert liefern die Situationen einen Wert für die Einzelspielzeiten. Wird von einer Gleichverteilung der Ladung im Lagerraster ausgegangen, kann über die Mittelung der Zugriffszeiten der einzelnen Felder im Grid die mittlere Zugriffszeit bestimmt werden. Das Vorgehen ist hierbei ähnlich dem bei der Ermittlung der Spielzeit für ein Regalbediengerät. Die Einzelspielzeiten der Felder werden addiert und durch die Anzahl der Fächer geteilt. Bei der Betrachtung der Zugriffszeiten in einem 15×15

Grid für die einzelnen Positionen wird deutlich, dass sich die Positionen mit gleicher Zugriffszeit auf Geraden befinden. Im Gegensatz zu den Isochronen bei Regalbediengeräten (Arnold und Furmans 2009) hängt die Zugriffszeit sowohl von der X- als auch der Y-Richtung ab. Die Steigungen der Geraden gleicher Zugriffszeiten hängen vor allem von den Geometrien der Lagerplätze ab. Für ein System, aufgebaut aus Drehtischen, welche dieselbe Kantenlänge und dieselben Geschwindigkeiten in X- und Y-Richtung aufweisen, beträgt die Steigung genau 1. Bei anderen Systemen hängt die Steigung von der jeweiligen Ausprägung der Geschwindigkeitswerte und dem Seitenverhältnis des Lagerplatzes ab. Abbildung 6.23 zeigt die Verteilung der Zugriffszeiten in einem 15×15 Lageraster für ein ShuttleGrid-System in Situation 2. Deutlich ist hier die zu 1 veränderte Steigung zu erkennen, was dem Seitenverhältnis des Systems von $1,4 : 1$ entspricht.

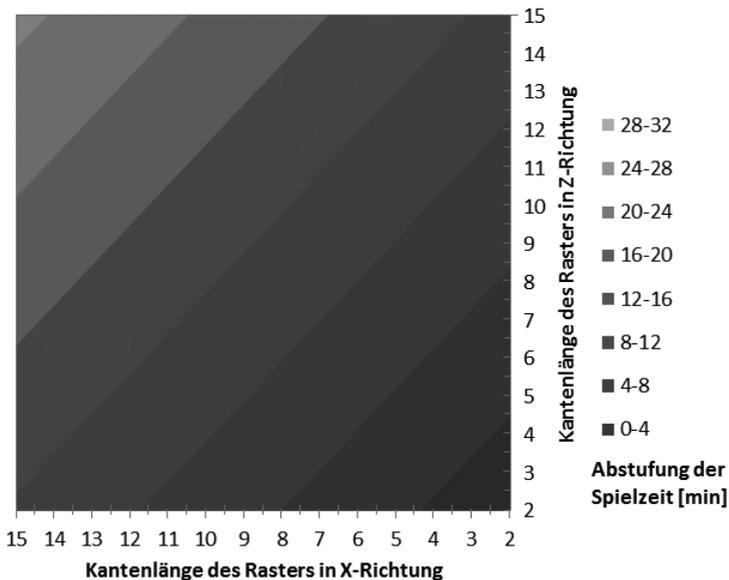


Abbildung 6.23: Bereiche gleicher Zugriffszeiten für ein Shuttle-System in Situation 2 in Abhängigkeit der Lagergröße

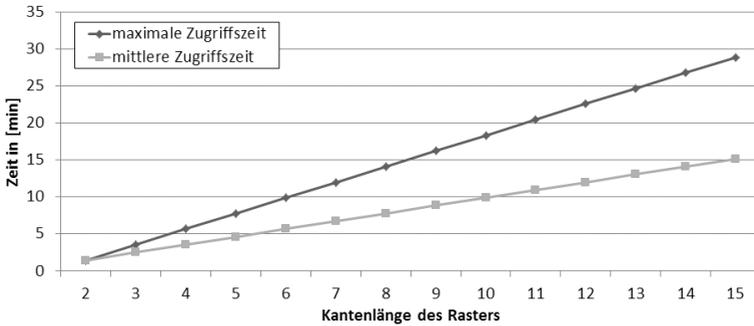


Abbildung 6.24: Vergleich maximale Zugriffszeit zu mittlerer Zugriffszeit in Situation 2 am Beispiel des Shuttles

Die Zugriffszeit für die Einzelplätze hat sich bei den vorangegangenen Vergleichen immer auf die maximale Zugriffszeit in Abhängigkeit zur Kantenlänge der Situationen bezogen. Innerhalb eines Lagerrasters tritt diese maximale Zugriffszeit aber immer nur genau für einen Platz auf. Wird von einer Gleichverteilung der Ladung im Lager ausgegangen, so ist die Zugriffshäufigkeit auf jeden Platz im Grid gleich wahrscheinlich und lässt somit das Mitteln der Zugriffszeiten zu einer mittleren Zugriffszeit zu. Beim Vergleich der mittleren Zugriffszeit mit der maximalen Zugriffszeit ist eine deutliche Verbesserung zu erkennen (Abb. 6.24). Bei einem ShuttleGrid-System beträgt die mittlere Zugriffszeit nur 53% der maximalen Zugriffszeit für ein 15×15 Lagerraster. Für kleinere Lager ist der Unterschied nicht so groß. Für sehr große Lagerflächen strebt die mittlere Zugriffszeit gegen 50,1% der maximalen Zugriffszeit, welches sich mittels der Steigungen der Geraden berechnen lässt.

Für den Durchsatz der Systeme bedeutet dies eine Leistungssteigerung von nicht unerheblichem Maße. Für große Lagerraster bedeutet dies eine Steigerung auf fast 200% des Durchsatzes, im Vergleich zu dem mit der maximalen Zugriffszeit des am weitesten entfernten Lagerplatzes berechneten. Für kleinere Lagerraster ist der prozentuale Zuwachs kleiner (Abb. 6.24). Abbildung 6.25 zeigt den Verlauf des mittleren Durchsatzes, welcher sich aus der mittleren Zugriffszeit ergibt, im Vergleich zum minimalen Durch-

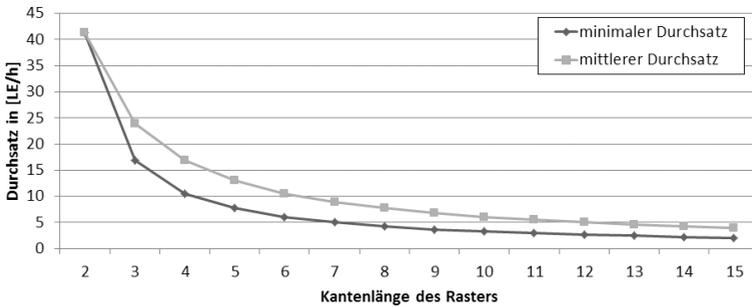


Abbildung 6.25: Vergleich minimaler Durchsatz zu mittlerem Durchsatz in Abhängigkeit der Lagergröße am Beispiel des Shuttle in Situation 2

satz, welcher sich aus der maximalen Zugriffszeit ergibt, in Abhängigkeit der Lagergröße am Beispiel eines ShuttleGrid-Systems für Situation 2.

Beim Vergleich des Koeffizienten aus Energie und Durchsatz wird ersichtlich, dass sich das Verhältnis deutlich zu Gunsten der Strategie aus Situation 2 verschiebt (Abb. 6.26). Dies lässt sich aufgrund des höheren Durchsatzes und der gleichzeitig dafür geringeren Anzahl an Fahrbewegungen gut erklären. Bei allen technischen Varianten ergibt sich ein ähnliches Verhältnis. Dies ist gerade bei den Systemen mit ortsfester Fördertechnik vor allem auf die kürzere benötigte Spielzeit zurück zu führen. Bei allen Systemen beträgt der Koeffizient aus Energie und Durchsatz für Situation 2 ab einer Lagergröße von 6×6 Feldern höchstens noch 50% von dem aus Situation 1. Dies zeigt sehr deutlich wie groß der Einfluss der Strategie auf die Spielzeit und den Durchsatz ist.

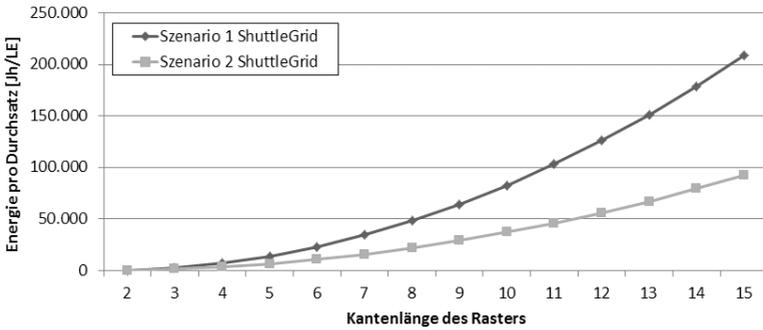


Abbildung 6.26: Vergleich Koeffizient aus Energie pro Durchsatz für ein ShuttleGrid

7 Parallelisierung der Bewegungen und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten

Die bisherigen Betrachtungen haben sequentielle Strategien genutzt. Die so zu erzielenden Leistungswerte sind nicht zufriedenstellend und können weder mit manuellen Lagern als auch mit heute gängigen Techniken mithalten. Werden die von Schumann (Schumann 2008) ermittelten Durchsätze angenommen, so liegen die Werte für die GridFlow-Systeme mit sequentieller Arbeitsweise weit dahinter.

7.1 Analytische Betrachtung – Segmentierung der Ausgangssituationen

Der große Vorteil von GridFlow-Systemen liegt wie anfangs erwähnt in der Parallelisierbarkeit der Aufgaben. Ziel ist es in einem großen Raster möglichst viele Bewegungen parallel ablaufen zu lassen, um auf diese Weise den Durchsatz des Systems zu verbessern.

7.1.1 Aufteilung des Rasters

Wird von einer Gleichverteilung der Ladeeinheiten auf dem Lagerraster ausgegangen, kann das Grid in Segmente aufgeteilt werden. Als Segment wird ein rechteckiger Bereich im Raster verstanden (Abb. 7.1). Jedes Segment benötigt dabei mindestens eine Leerstelle. Bei den Varianten mit unstetiger Fördertechnik kommt hinzu, dass je Segment ein Fahrzeug vorzusehen ist.

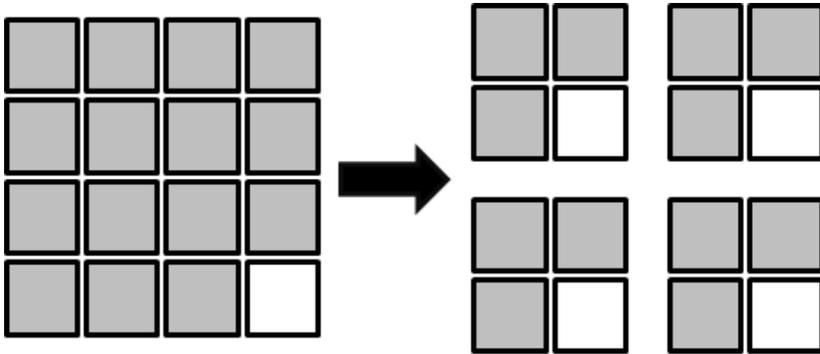


Abbildung 7.1: Mögliche Segmentierung eines Rasters

Ein Segment entspricht somit einem kleineren Raster ohne Segmentierung, was die Berechnung nach den in Kapitel 4 definierten Methoden erlaubt. Nach Situation 1 und 2 bedeutet dies eine Leerstelle, ein Fahrzeug bei unstetiger Fördertechnik und ein Auftrag pro Segment. Die zusätzlich notwendigen Leerstellen pro Segment verringern die maximal mögliche Lagerkapazität und somit den maximal möglichen Füllgrad (Abb. 7.2).

Der Durchsatz gibt an, wie viele Ladungseinheiten pro Zeiteinheit im System verarbeitet werden können. Wird davon ausgegangen, dass die untere Kante als Schnittstelle dient, so ist der Durchsatz des Systems davon abhängig, wie viele Segmente sich an dieser Seite befinden. Dies bedeutet, dass der Durchsatz direkt von der Breite der Segmente abhängig ist. Je kleiner die Segmentierung desto mehr Leerstellen, respektive Fahrzeuge, stehen relativ für Bewegungen zur Verfügung. Wie lange eine spezielle Ladungseinheit zum Auslagern benötigt, wird mit der Zugriffszeit gemessen. Durch eine Segmentierung des Rasters kann vorrangig der Durchsatz gesteigert werden, da jetzt gleichzeitig mehr Ladungseinheiten bewegt und an der Stirnseite an weiterführende Prozesse übergeben werden können. Die Zugriffszeit bleibt bei gleicher Strategie hiervon weitgehend unverändert, da der zurückzulegende Weg der Ladungseinheit derselbe bleibt. Zusätzlich kann durch eine Veränderung der Zugriffsstrategie auch die Zugriffszeit verbessert werden. Dies ist jedoch nicht mehr Teil dieser Arbeit.

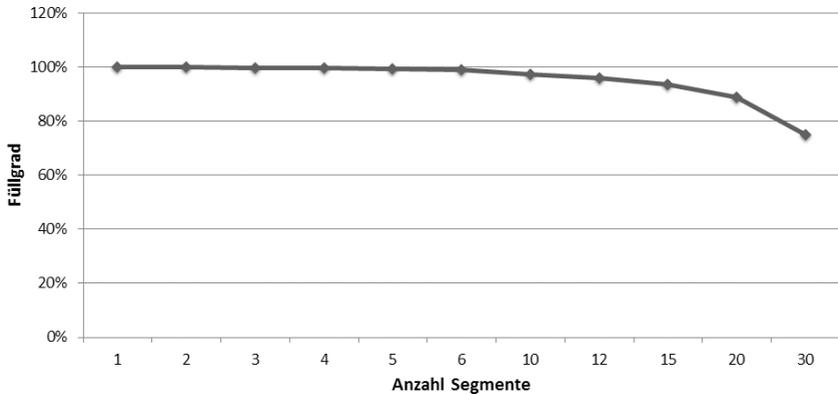


Abbildung 7.2: Maximal möglicher Füllgrad in Abhängigkeit der Segmentierung eines Rasters für Strategien nach Situation 1 und 2

7.1.2 Beispielrechnung

Als Beispiel wird ein rechteckiges Lagerraster mit der Kantenlänge $K = 60$ betrachtet. Die Ausrichtung der Stellplätze ist horizontal. Die Berechnung des Durchsatzes erfolgt gemäß der analytischen Situationen aus Kapitel 4. Für die Durchsatzbetrachtung ist jedoch immer nur die erste Reihe, welche an der Außenseite des Raster liegt, relevant. Durch eine stärkere Segmentierung wird nicht nur die Anzahl der Leerstellen im Raster erhöht, sondern auch die Anzahl der Lagerplätze pro Segment verringert. Die Aufteilung des Rasters erfolgt entsprechend der ganzzahligen Teiler der Kantenlänge (Tab. 7.1).

In Kapitel 6 konnte gezeigt werden, dass bei kleinen Rastern relativ hohe Durchsätze erreicht werden. Im Beispiel mit einem Raster von 60×60 Feldern sind bei einer Segmentierung von 30 getrennten Segmenten somit hohe Durchsätze möglich (Abb. 7.3). Dies sind jedoch nur theoretische Werte. Allein eine Fördertechnik könnte solch ein System nur schwer bewältigen. Verzweigungselemente heutiger Palettenfördertechnik erreichen zwischen 150 und 200 Paletten pro Stunde. Wird davon ausgegangen, dass dies als Richtwert

für ein GridFlow-System dient, so kann der entsprechende Bereich bei der Segmentierung näher betrachtet werden.

Für dieses Beispiel ist somit der Bereich zwischen sechs und 15 Segmenten pro Seite bei einem 60×60 Raster bezüglich des Durchsatzes interessant (Abb. 7.4).

In diesem Bereich ist noch ein maximaler Füllgrad von 99% bis 93% möglich. Da der Füllgrad aufgrund der quadratischen Funktion erst bei kleineren Segmenten auf sein Minimum von 75% fällt, ist noch eine sehr gute Flächennutzung gegeben (Abb. 7.2).

Die Energieaufnahme im Ruhezustand steigt für Systeme mit unstetiger Fördertechnik ebenfalls mit zunehmender Segmentierung an (Abb. 7.5). Ist die Menge an Energie für den Stand-By-Zustand bei Systemen mit ortsfester Fördertechnik abhängig von der Anzahl der Plätze, so ist es bei Systemen mit unstetiger Fördertechnik die Anzahl der Segmente. Somit ist es durchaus möglich, sehr große Raster mit geringer Stand-By-Leistung zu erhalten. Dies bedeutet dann umgekehrt auch, dass lediglich eine geringe Segmentierung vorliegt und somit nur ein geringer Durchsatz erreicht werden kann.

Segmente pro Seite	Segmentgröße	Anzahl Segmente im Raster
1	60×60	1
2	30×30	4
3	20×20	9
4	15×15	16
5	12×12	25
6	10×10	36
10	6×6	100
12	5×5	144
15	4×4	225
20	3×3	400
30	2×2	900

Tabelle 7.1: Segmentierung 60×60 Raster

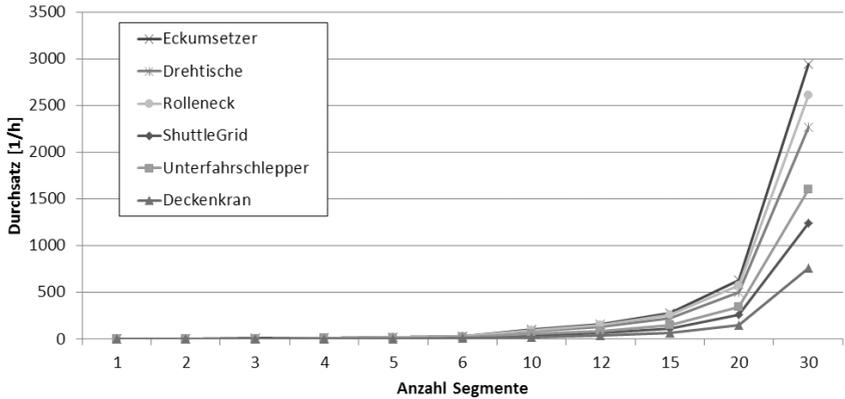


Abbildung 7.3: Durchsatz Situation 1 in Abhängigkeit der Segmentierung bei einem Lagerrasaster mit 60×60 Feldern

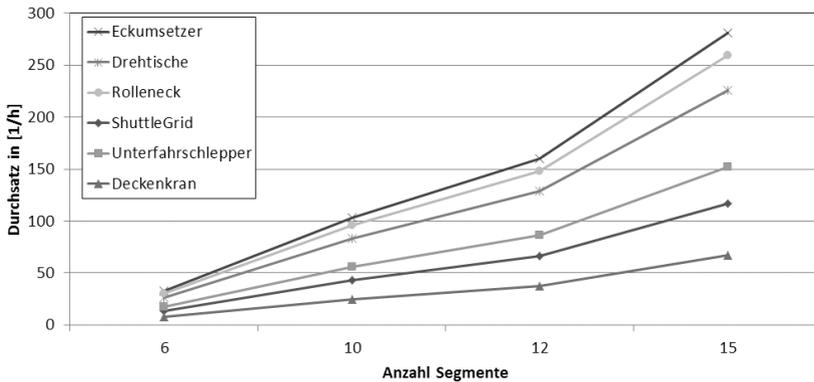


Abbildung 7.4: Durchsatz Situation 1 Ausschnitt der Segmentierung

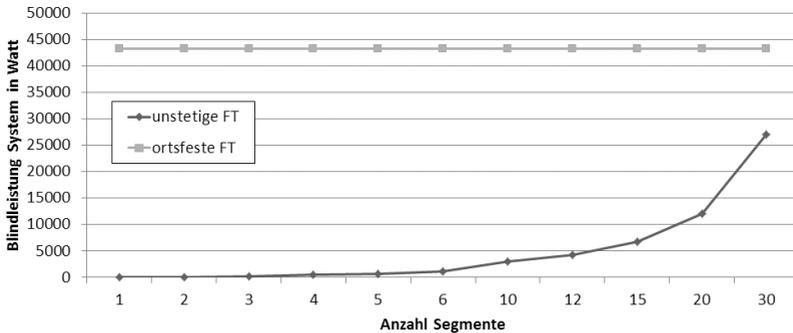


Abbildung 7.5: Stand-By-Verbrauch in Abhängigkeit der Segmentierung

Zur Abbildung von Zonierungsstrategien können die Segmente auch mit unterschiedlicher Kantenlänge gewählt werden. So lassen sich in einem Lagerraster Bereiche mit niedrigerem Durchsatz und Bereiche mit höherem Durchsatz einstellen und parallel zueinander betreiben. Damit wären beispielsweise ABC-Verteilungen in einem Artikelspektrum gut abbildbar.

Ein besonderes Augenmerk muss auf die Parallelisierung für ortsfeste Systeme mit einem geringeren Füllgrad als in Situation 1 und 2 des Lagerrasters gelegt werden. So ist genau genommen jedes Fördererelement ein eigenes Segment, was eine maximale Segmentierung bedeutet. Durch die Möglichkeit, alle im Grid befindlichen Ladungseinheiten auf einmal zu bewegen, kann der Durchsatz sehr stark erhöht werden.

Notwendige Bedingung hierfür ist, dass der Füllgrad des Lagerrasters es ermöglicht, alle Ladungseinheiten gleichzeitig auf einen anderen Feld zu transportieren. Es müssen ausreichend freie Plätze (Leerstellen) vorhanden sein. Bezogen auf Situation 3 können so alle Zeilen gleichzeitig bewegt werden. Dadurch werden alle Ladeeinheiten, welche sich vor der auszulagernden Einheit befinden, auf einmal umgelagert und der notwendige Weg für die zu entnehmende Ladungseinheit frei gemacht. Im Fall des Eckumsetzers dauert dies 5,6 Sekunden. Dies ist unabhängig von der Größe des Lagers, da diese Bewegung in jeder Zeile parallel abläuft. Die Zugriffszeit ist dann nur noch von der Kantenlänge des Lagerrasters abhängig. Ein System aus Eckumsetzern könnte bei maximaler Segmentierung die Spielzeit in einem Grid mit der Kantenlänge $K = 15$ von knapp unter neun Minuten

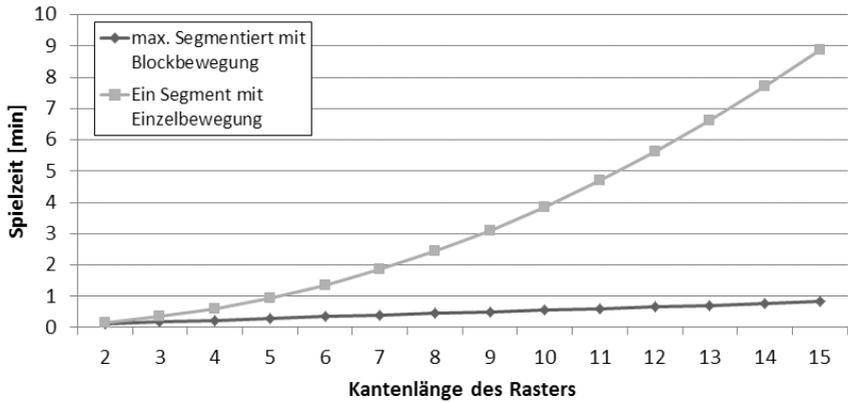


Abbildung 7.6: Vergleich der Spielzeit für Situation 3 bei maximaler Segmentierung am Beispiel des Eckumsetzer

auf unter 50 Sekunden, was 9% des ursprünglichen Wertes für Situation 3 entspricht, reduzieren (Abb. 7.6).

Aus den vorangegangenen Untersuchungen lässt sich ableiten, dass die GridFlow-Systematik aufgrund der Möglichkeit zu parallelisieren über eine sehr gute Einstellbarkeit der Durchsätze verfügt. Aufgrund der notwendigen Vereinfachungen bei den angestellten Berechnungen dienen die Ergebnisse nur als Approximation. Bei den Systemen mit un stetiger Fördertechnik ist vor allem die Variante des Unterfahrschleppers in Bezug auf den Durchsatz und Energiebedarf interessant. Zudem sind die Systeme mit un stetiger Fördertechnik beim Flächennutzungsgrad führend, da der Raum um die Ladungseinheiten nicht für Antriebe oder Mechanik benötigt wird.

7.2 Entnahmeszenarien mit der Strategie LivePath

Analytisch können nur wenige, einfach strukturierte Situationen beurteilt werden, bei denen die notwendigen Bewegungen einer eindeutigen Struktur folgen. Solche Bedingungen sind in der Realität so gut wie nicht zu

erwarten, so dass sich kein eindeutiges Bewegungsmuster für das Lösen der Aufgabe bestimmen lässt. Sobald sich mehr Leerstellen als Fahrzeuge im System befinden, muss zunächst die Entscheidung getroffen werden, welche Leerstellen für den Transport zu benutzen sind und welche eventuell nicht. Theoretische Überlegungen hierzu kommen wieder von Rohit, Taylor und Gue (Rohit, Taylor und Gue 2010), die sich mit zufällig platzierten Leerstellen in einem Raster auseinandergesetzt haben. Nimmt die Anzahl an Leerstellen weiter zu, so ist die Anzahl an möglichen Lösungen schnell sehr groß. Aus diesem Grund arbeitet Schwab (Schwab 2015) an Strategien, welche möglichst einfachen Regeln folgen, um bei beliebigen Anfangsbedingungen möglichst effiziente Auslagerungen zu erreichen ohne eine optimale Lösung im Voraus berechnen zu müssen. Basierend auf ihrer Simulation wurden Szenarien für ein System bestehend aus Unterfahrschleppern mit mehreren Fahrzeugen und zufällig verteilten Ladungseinheiten und Leerstellen berechnet, um weitere Kennzahlen bei weniger restriktiven Randbedingungen zu erhalten und daraus weitere Erkenntnisse ableiten zu können.

7.2.1 Systemgestaltung und Simulationsparameter

Die Simulation basiert auf einem quadratischen Raster der Kantenlänge $K = 10$. Der Füllgrad liegt bei 75 % und die Leerstellen sind zufällig im Raster verteilt. Pro Fahrzeug befindet sich eine zu entnehmende Ladungseinheit im Raster. Ziel ist es, die Ladung an die untere Kante des Rasters zu transportieren und dort auszulagern. Es kann auf der ganzen Breite der Kante ausgelagert werden. Es finden keine gleichzeitigen Einlagerungsvorgänge statt. Ein Fahrzeug lagert dabei immer genau eine Ladungseinheit aus und führt alle dafür notwendigen Bewegungen, inklusive der Umlagerungen, selbst aus. Eine Kooperation der Fahrzeuge, um gemeinsam eine Ladungseinheit zu bewegen, findet nicht statt. Eine genaue Beschreibung der Regeln findet sich in Schwab (Schwab 2015). Ein Durchgang läuft zeitlich so lange, bis alle zu entnehmenden Ladungen aus dem Raster heraustransportiert wurden. Es wurden verschiedene Systemzustände mit einem bis fünf Fahrzeugen simuliert. Pro Zustand wurden 1000 zufällige Entnahmeszenarien erstellt, was einer Gesamtanzahl von 5000 Versuchen entspricht. Aufgrund der Simulation werden die Einzelzeiten der jeweiligen Bewegungen immer auf ganze Sekunden auf- oder abgerundet.

Fachlänge X	1,5 m
Fachlänge Y	1,1 m
Beschleunigung leer	0,8 m/s ²
Beschleunigung beladen	0,3 m/s ²
Geschwindigkeit leer	1,0 m/s
Geschwindigkeit beladen	0,4 m/s
Beladungszeit	1 s
Entladungszeit	1 s
Lenkzeit	2 s

Tabelle 7.2: Simulationsparameter

Für die Simulationen sind die zu fahrenden Strecken, die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie die für die Lasthandhabung notwendigen Zusatzzeiten einzustellen (Tab. 7.2). Diese dienen als Grundlage für die Berechnung der Fahr- und Zusatzzeiten. Die Parameter beschreiben die je nach technischer Variante unterschiedlichen Werte und wurden, wie in Kapitel 3 beschrieben, für den Unterfahrschlepper übernommen.

7.2.2 Laufzeit und Durchsatz

Die Laufzeit der Szenarien weisen starke Schwankungen (Abb. 7.7) auf. Die minimale Zeit beträgt für ein Fahrzeug elf Sekunden, was einer Auslagerung am unteren Rand entspricht. Die maximale Laufzeit tritt bei einem Szenario mit fünf Fahrzeugen auf und beträgt 1690 Sekunden (28 min, 10 s) (Tab. 7.3, Abb. 7.8).

Die Laufzeit der Szenarien lässt auf den ersten Blick keinen direkten Rückschluss auf die Zugriffszeit zu. Lediglich für die Szenarien mit einem Fahrzeug entspricht die Laufzeit der Zugriffszeit. In den Szenarien mit mehr als einem Fahrzeug entspricht die Laufzeit der Zugriffszeit des letzten zu entnehmenden Pakets. Es ist festzustellen, dass die Laufzeiten mit steigender Anzahl an Fahrzeugen im System zunehmen (Abb. 7.9). Dies ist auf Blockierungen der Fahrzeuge untereinander zurück zu führen, ähnlich wie sie bereits von Huber (Huber 2011) untersucht wurde. So kann es immer wieder vorkommen, dass ein Fahrzeug wegen einer niedrigeren Priorisierung

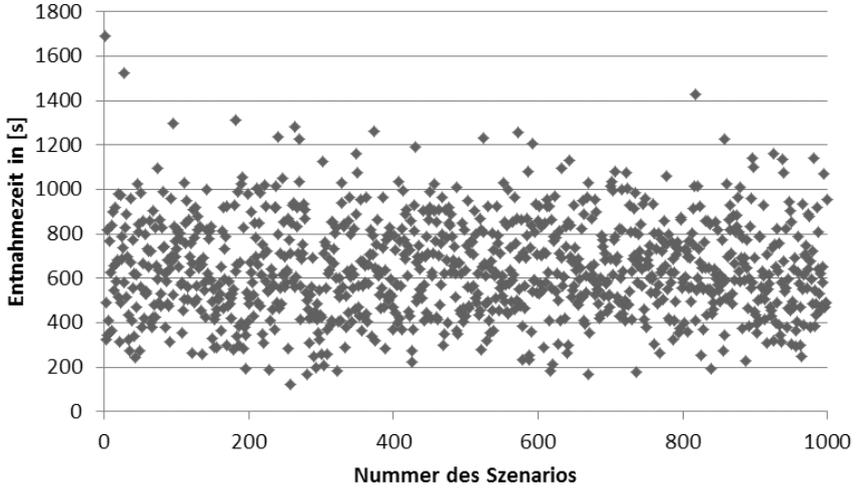


Abbildung 7.7: Laufzeitverteilung für fünf Fahrzeuge

	min.	max.	Durchschnitt
1 Fahrzeug	11 s	1075 s	339 s
2 Fahrzeuge	21 s	1151 s	457 s
3 Fahrzeuge	59 s	1335 s	524 s
4 Fahrzeuge	88 s	1493 s	596 s
5 Fahrzeuge	124 s	1690 s	644 s

Tabelle 7.3: Laufzeiten der Szenarien

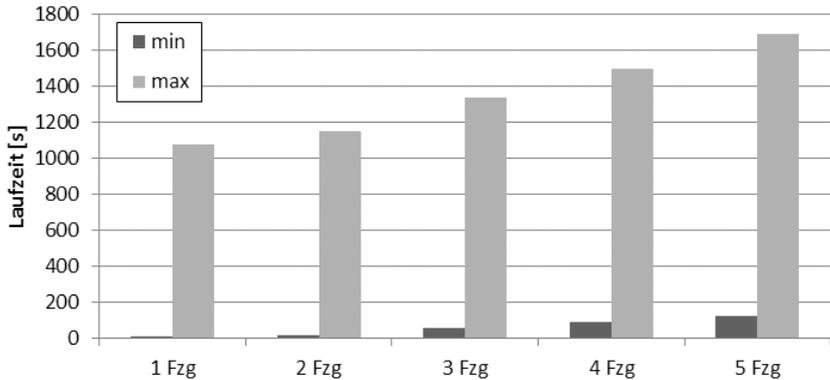


Abbildung 7.8: Laufzeitminimum und -maximum in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl

auf ein anderes Fahrzeug warten muss. Die Zunahme der mittleren Laufzeit für Szenarien mit fünf Fahrzeugen entspricht allerdings gerade einmal dem 1,8-fachen der Laufzeit für Szenarien mit einem Fahrzeug. Für Raster mit deutlich mehr Fahrzeugen dürfte dieser Effekt stärker ausgeprägt sein.

Bei der Betrachtung der mittleren Anzahl der Einzelbewegungen der verschiedenen Szenarien lässt sich erkennen, dass hier ein Anstieg in Abhängigkeit der zu transportierenden Ladungseinheiten und somit der im System befindlichen Fahrzeuge, ergibt (Abb. 7.10). Die Anzahl der Einzelbewegungen der einzelnen Fahrzeuge hingegen bleibt konstant und liegt im Schnitt bei 68 Einzelbewegungen für die hier betrachteten Szenarien. Somit ist festzustellen, dass Fahrzeuge im Schnitt keine zusätzlichen Bewegungen ausführen müssen, weil ihnen beispielsweise der Weg durch ein anderes Fahrzeug zugebaut wurde.

Der Durchsatz liegt im Mittel für die Szenarien mit einem Fahrzeug bei 10,6 LE/h. Für die Szenarien mit fünf Fahrzeugen werden schon 27,9 LE/h erreicht (Tab. 7.4). Der Anstieg beträgt im Schnitt 4,3 LE/h je zusätzlichem Fahrzeug im Raster.

Es ist zu erkennen, dass der Durchsatz nicht linear zunimmt (Abb. 7.11), was mit den ansteigenden Zugriffszeiten zu erklären ist. Dies zeigt auch,

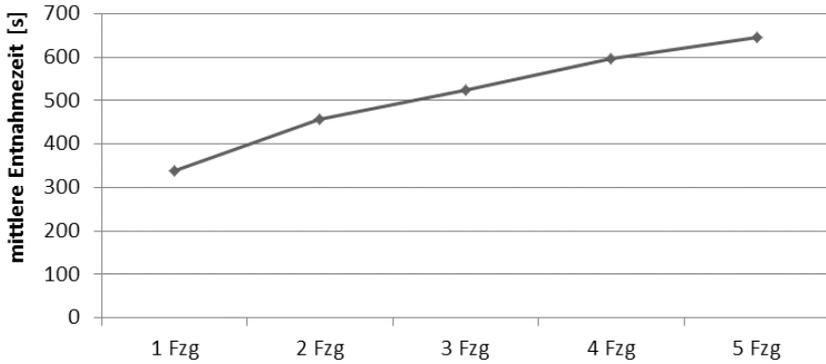


Abbildung 7.9: Mittlere Laufzeit der Szenarien in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl

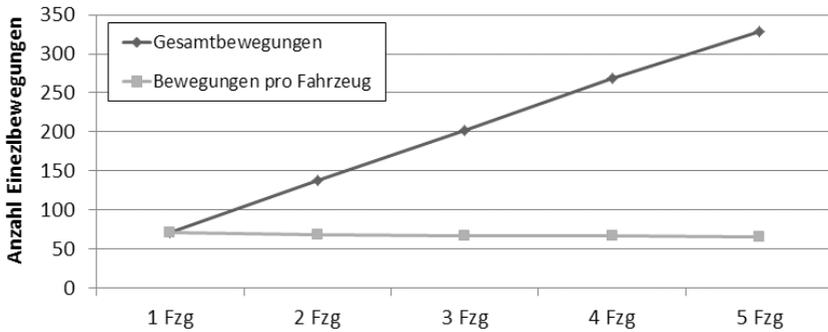


Abbildung 7.10: Mittlere Anzahl der Einzelbewegungen in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl

	mittlerer Durchsatz
1 Fahrzeug	10,6 LE/h
2 Fahrzeuge	15,7 LE/h
3 Fahrzeuge	20,6 LE/h
4 Fahrzeuge	24,2 LE/h
5 Fahrzeuge	27,9 LE/h

Tabelle 7.4: Durchsatz der Szenarien

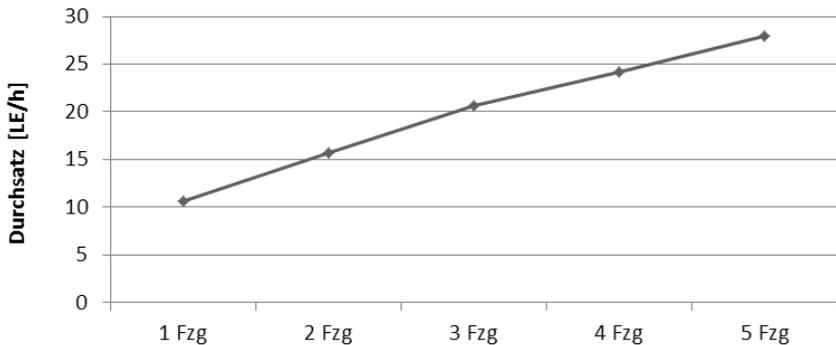


Abbildung 7.11: Mittlerer Durchsatz in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl

dass die analytische Betrachtung der Parallelisierung nur als Anhaltswert dienen kann, da dort jeder Transporteur seinen individuellen Bereich zu bearbeiten hat und Blockierungen der Fahrzeuge untereinander so nicht vorkommen können.

7.2.3 Energiebedarf

Der Energiebedarf der Szenarien wird aus den mittleren Zeiten und der mittleren Anzahl simulierter Bewegungen analog zu Kapitel 5 ermittelt. Es ist zu erkennen, dass mit längerer, mittlerer Entnahmezeit (Abb. 7.9) auch der Energiebedarf ansteigt (Abb. 7.12). Dies ist zum einen durch die längere Laufzeit der Szenarien und zum anderen durch die größere Anzahl an Fördertechnikelementen im Raster zu erklären.

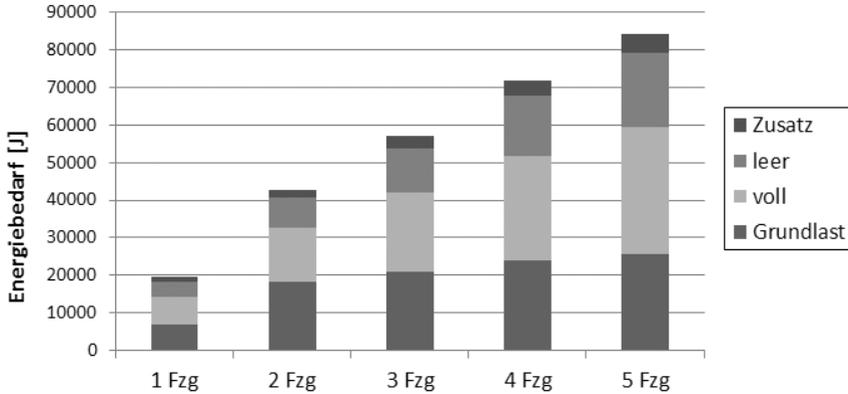


Abbildung 7.12: Mittlerer Energiebedarf pro Szenario

Dabei nicht zu vergessen ist, dass der Energiebedarf zwar ansteigt, gleichzeitig jedoch auch mehrere Ladungseinheiten ausgelagert werden. Wird der mittlere Energiebedarf durch die Anzahl der bewegten Ladungseinheiten geteilt, so ergibt sich ein Peak bei zwei Ladungseinheiten (Abb. 7.13). Danach nimmt der Energiebedarf pro Ladungseinheit wieder ab.

Wird die notwendige mittlere Energie auf den mittleren Durchsatz bezogen, so ist eine stark abgeflachte Kurve zu erkennen (Abb. 7.14). Die Energie pro Durchsatz strebt in den Szenarien für ein System aus Unterfahrschleppern gegen einen Wert von etwas über 3000 J/h. Dieses Verhalten ist durch den sowohl linear zunehmenden Energiebedarf als auch den annähernd linear wachsenden Durchsatz zu belegen.

7.3 Einsatz der GridFlow Konzepts in der Lagerhaltung

Sowohl die analytischen Anfangssituationen als auch die simulierten Szenarien zur Parallelisierung zeigen das große Potential des GridFlow Konzepts auf. Durch die Möglichkeit, mehrere Ladungseinheiten gleichzeitig bearbeiten zu können, werden sehr hohe Durchsätze erreicht (Abb. 7.4). Durch

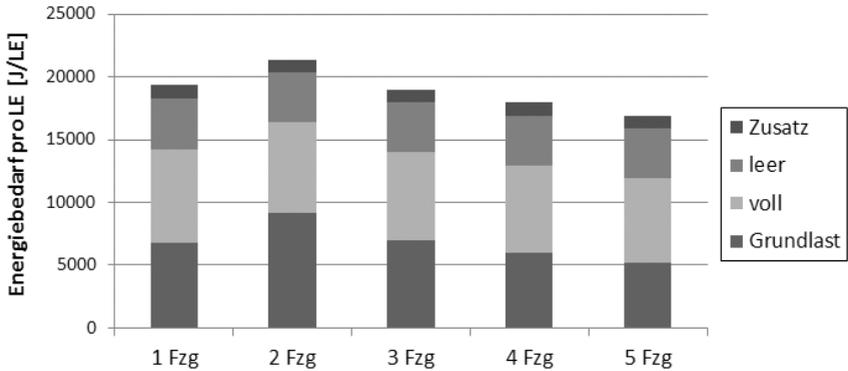


Abbildung 7.13: Mittlerer Energiebedarf pro Ladungseinheit

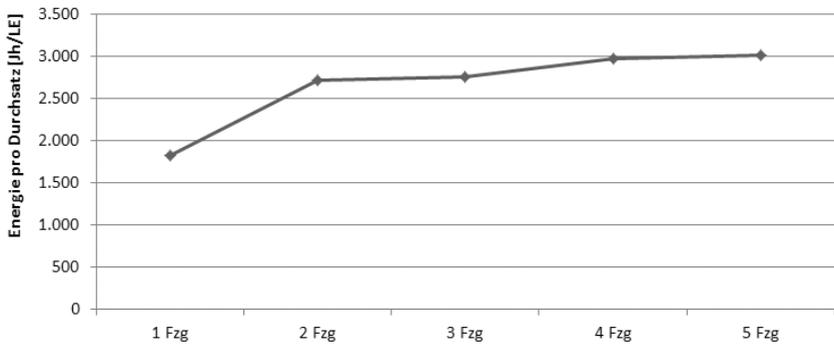


Abbildung 7.14: Mittlere Energie pro Durchsatz in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl

die Wahl des Füllgrades des Rasters und bei Systemen mit unstetiger Fördertechnik zusätzlich durch die Anzahl der Fahrzeuge im Raster lässt sich der zu erzielende Durchsatz sehr gut einstellen (Abb. 7.11). Die Zugriffszeit auf einen einzelnen Ladungsträger ist dagegen stärker von der Größe des Rasters und der Auslagerungsstrategie abhängig. GridFlow-Systeme mit ortsfester Fördertechnik können hier durch die Möglichkeit der Blockbewegung in Verbindung mit einer geeigneten Strategie sehr hohe Werte erzielen (Abb. 7.6).

Durch den geringen Installationsaufwand bei Systemen mit unstetiger Fördertechnik bieten Lager mit der GridFlow-Systematik eine gute Möglichkeit, kleinere Bereiche mit bis zu 1000 Paletten zu automatisieren. Dies eröffnet neue Möglichkeiten z.B. für den Warenein- und -ausgang. Im Bereich der Bevorratung und der Nachschubversorgung kann mit der GridFlow-Systematik ebenfalls Lagerfläche eingespart und ein automatischer Lagerprozess installiert werden. Darüber hinaus sind kompakte, automatisierte Sortierflächen oder Pufferlager, bei denen kein Regal aufgebaut werden soll, denkbar. Dabei kann als Anhaltspunkt Folgendes festgelegt werden:

- viel Bewegung, geringes Volumen → ortsfeste Fördertechnik
- wenig Bewegung, höheres Volumen → unstetige Fördertechnik

Bei der Betrachtung der unterschiedlichen, technischen Varianten bieten sich vor allem drei Möglichkeiten an. Bei den ortsfesten Systemen ist der Eckumsetzer in allen Vergleichen führend. Aufgrund der geringeren Außenmaße wird weniger Fläche als beim Drehtisch und dem Rolleneckumsetzer benötigt und somit ein besserer Flächennutzungsgrad erreicht. Die Durchsätze sind im Vergleich zu allen untersuchten Varianten die größten.

Für die unstetigen Varianten sprechen vor allem der geringere Platzbedarf (Abb. 5.1) und der deutlich niedrigere Energiebedarf bei größeren Rastern (Abb. 6.6, Abb. 6.11 und Abb. 6.20). Je nach Gewichtung der Vergleichsgrößen ist dann entweder ein System aus ShuttleGrid oder Unterfahrschleppern zu wählen. Liegt der Fokus mehr auf dem Platzbedarf ist das ShuttleGrid im Vorteil, soll jedoch ein etwas höherer Durchsatz erreicht werden, so ist der Unterfahrschlepper zu wählen. Somit kann der Zielkonflikt zwischen Kompaktheit und hohem Durchsatz auch mit dem GridFlow Konzept nicht vollständig überwunden werden.



Abbildung 7.15: FTF beim Ladungstransport (Quelle: Bär Automation)

Nachfolgend sind einige Beispiele für die Umsetzung verschiedener Lageaufgaben mit dem GridFlow Konzept gegeben. Dabei werden die technischen Varianten des Eckumsetzers, des ShuttleGrids und des Unterfahrschleppers in Verbindung mit der jeweiligen Aufgabe diskutiert. Finanzielle Aspekte werden dabei nicht berücksichtigt.

7.3.1 Vorratslager mit der GridFlow-Systematik

Ein Vorratslager dient dazu, Bedarfsschwankungen auszugleichen. Es stellt sicher, dass dem nachfolgenden Prozess die notwendigen Materialien bereitgestellt werden können. Die Ein- und Auslagerungen sind oftmals sehr unregelmäßig (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007). Je nach Auftragsvolumen und Bestellpolitik kann es hier zu großen Schwankungen beim Ein- und Auslagern kommen. Die Waren können teilweise sehr lange im Lager liegen bis sie z.B. für die Produktion benötigt werden. Dies kann beispielsweise aufgrund von Mindestabnahmemengen des Lieferanten notwendig sein, die den eigenen, augenblicklichen Bedarf übersteigen. Bei der Planung ist eine möglichst effiziente Flächennutzung bei vorgegebenem Durchsatz zu erzielen.

Für ein Vorratslager, in dem Güter über längere Zeit lagern, ist eine Variante mit unstetiger Fördertechnik zu wählen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die hierfür notwendigen Durchsätze bei gleichzeitig guter Flächennutzung erreicht werden (Abb. 7.4 und Abb. 7.2). Dazu kommt das bessere Verhältnis aus Energie und Durchsatz (Abb. 7.13).

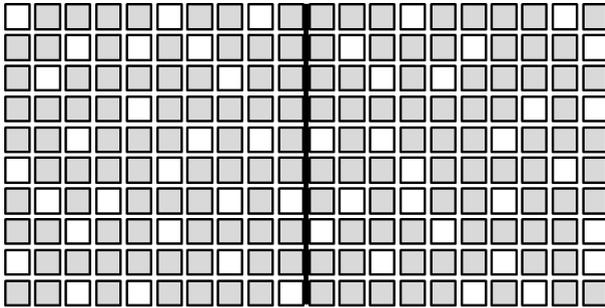


Abbildung 7.16: Beispiellagerraster mit dem Kantenmaß 20×10 und einem Füllgrad von 75%

Je nach gefordertem Flächennutzungsgrad oder Durchsatz kann die Wahl somit auf eine Ausführung als ShuttleGrid oder Unterfahrschlepper fallen. Die derzeit im Markt befindlichen Systeme für die automatische Ware-zum-Mann Kommissionierung (Kapitel 2) heben die Ladung vorrangig an (Abb. 7.15). Dies liegt daran, dass so Sicherheitsrisiken durch die Abschattung der Standfüße vermieden werden und genaueres Fahren möglich ist, da der Einfluss der nachgezogenen Stützrollen entfällt (Nobbe, Baur, Schönung und Furmans 2010). Ebenso wird eine größere Dichte im Lager erreicht. Mittels angepasster Strategien für die Bewegungen der Fahrzeuge, kann so mit bestehender Technik ein GridFlow-System für die kompakte Lagerung von Ladungseinheiten installiert werden.

Beispielsweise benötigt ein Lager mit 200 Lagerplätzen und einem Kantenlänge von 20×10 Plätzen (Abb. 7.16) als Variante mit Unterfahrschleppern in etwa 330 m^2 und als ortsfeste Variante bestehend aus Eckumsetzern etwa 442 m^2 Stellfläche. Die tragende Variante benötigt für dieselbe Anzahl an Lagerplätzen etwa 280 m^2 . Damit ist für die Variante des Unterfahrschleppers ca. 18% und die des Eckumsetzers etwa 58% mehr Stellfläche erforderlich.

Über die Anzahl der für den Transport vorgesehenen Fahrzeuge bei einer Variante mit unstetiger Fördertechnik kann nun der benötigte Durchsatz eingestellt werden. Das Beispiellagerraster besteht im Aufbau aus zwei parallel geschalteten Rastern, wie sie vorher untersucht wurden. Durch den Einsatz zweier Fahrzeuge kann der doppelte Durchsatz erreicht werden, so-

lange sich die Fahrzeuge nicht gegenseitig behindern. Dies wird durch die Trennung der Bereiche, ähnlich wie bei der analytischen Betrachtung der Parallelisierung, erreicht. Für zwei Fahrzeuge ist so ein Durchsatz mit der von Schwab (Schwab 2015) entwickelten Strategie LivePath von 21 LE/h möglich. Dies kann bei insgesamt zehn Fahrzeugen auf 55,8 LE/h gesteigert werden.

Als weiteres Anwendungsbeispiel sind verteilte Vorratslager mit dem GridFlow Konzept vorstellbar. In einem Fertigungsumfeld befinden sich zwischen den verschiedenen Maschinen und Anlagen oftmals Nischen, welche heutzutage teilweise schon als Stellflächen für Waren genutzt werden (Abb. 7.17). Dabei werden Flächen im Layout der Steuerung als Lagerfläche vorgegeben. Die Gesamtkapazität des Lagers ergibt sich dann über das Kumulieren der Einzelflächen zu einer virtuellen großen Lagerfläche. Aufgrund der kompakten Lagerung können so auch kleinere Bereiche genutzt werden. Da hier auch Transporte zwischen den verteilten Lagerflächen notwendig sind, bietet sich ein System mit unstetiger Fördertechnik an. Die Fahrzeuge können dies ohne aufwändige Installation von Transportstrecken erledigen, ohne dass sie ein Hindernis für die im Betrieb arbeitenden Personen darstellen. Hierzu müssen die Fahrzeuge über eine entsprechende Sicherheitstechnik verfügen, damit keine Personengefährdung besteht. Heutige FTF sind entsprechend ausgerüstet, um sie auch im Personenumfeld einzusetzen (Abb. 7.15). Gepaart mit dem GridFlow Konzept sind einfache, kompakte und produktionsnahe Lager möglich. Dadurch können Nachschubzeiten verringert und evtl. brach liegende Flächen genutzt werden.

7.3.2 Pufferlager mit der GridFlow-Systematik

Pufferlager sind dadurch gekennzeichnet, dass sie eine sehr hohe Umschlagleistung aufweisen. Charakteristisch ist die geringe zeitliche Schwankung zwischen Ein- und Auslagervorgängen (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007). Die Ware liegt hier in der Regel deutlich kürzer im Lager als bei der Vorratslagerung. Pufferlager können zentral für einen ganzen Produktionsbereich oder verteilt vor dem jeweiligen nachstehenden Prozess installiert sein. Kleinere Pufferlager werden oftmals als Durchlaufregal oder einfache Pufferstrecken aufgebaut, welche nach dem FIFO Prinzip arbeiten. „Im industriellen Einsatz sind häufig Stetigförderer wie Rollenbahnen, Bandförderer oder Kettenförderer zu finden, die oftmals als Stauförderer ausgeführt

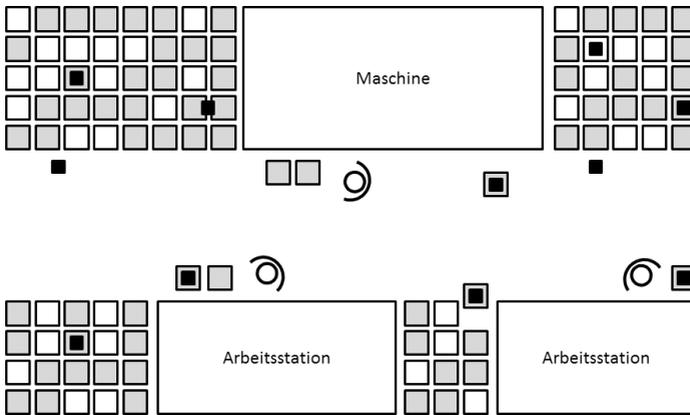


Abbildung 7.17: Verteilte Lagerstruktur in einer Fertigung

sind, d.h. das Gut ohne oder unter geringem Staudruck aufstauen können. Außerdem werden Kreisförderer und Schleppkreisförderer (Power-and-Free-Förderer) eingesetzt.“ (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007)

Der Einsatz eines auf einem Raster basierendem Puffers mit unstetiger Fördertechnik, bietet sich an, da so keine Regale oder Förderbahnen installiert werden müssen. Wird der Logik der Pufferstrecken gefolgt, so lassen sich virtuelle Bahnen mittels der unstetigen Fördertechnik abbilden (Abb. 7.18). Bei der reinen Pufferung von Waren sind wenig Richtungswechsel der Ladungseinheiten zu erwarten. Die Ladungseinheiten werden von der einen Seite der Pufferstrecke bei gleichbleibender Reihenfolge auf die gegenüberliegende Seite befördert. Für unstetige Fördertechnik entspricht dies einer Aneinanderreihung des 3-moves. Dabei werden die Ladungseinheiten, ähnlich wie in Kanallagern, immer so weit wie möglich an die Ausgangsseite befördert.

7.3.3 Sortieren, Sequenzieren mit der GridFlow-Systematik

Beim Sortieren und Sequenzieren wird für einen nachfolgenden Prozess eine Teilmenge aus einer größeren Menge zusammengestellt. Nach VDI 3619 (VDI-3619 1983) werden beim Sortieren die Packstücke von unterschiedli-

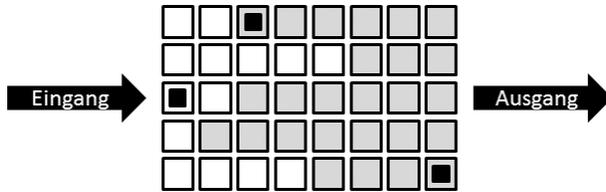


Abbildung 7.18: Virtuelle Pufferstrecken mit der GridFlow-Systematik

chen Zuführungen auf die jeweiligen Endstellen sortiert. Beim Sequenzieren wird zudem noch darauf geachtet, dass die Ladungsstücke eine bestimmte Reihenfolge zueinander einhalten. Der Fokus liegt hierbei auf dem Verändern der internen Reihenfolge. Die Ware wird, wenn überhaupt, nicht lange gelagert, zudem ist wichtig einen hohen Durchsatz, bei gleichzeitig kurzer Verweilzeit der Ladungseinheiten im System, zu erreichen. Soll dieser Vorgang automatisiert ablaufen, so ist darauf zu achten, dass eine ausreichend große Anzahl an Plätzen zur Verfügung steht, um die zu bearbeitenden Aufträge als Ganzes behandeln zu können.

Ein Beispiel ist die Versorgung eines Packroboters mit Packstücken in der richtigen Reihenfolge, für die automatische Palettenbildung (Gue, Uludag und Furmans 2012) (Abb. 7.19). Die Palettierung geschieht schichtweise, was eine zeitgenaue Anlieferung der Packstücke in der richtigen Sequenz erfordert. Die mögliche Sortierleistung eines dezentral gesteuerten Sorters, basierend auf dem FlexFörderer, wurde am IFL untersucht (Seibold, Furmans und Stoll 2013). Es wurde gezeigt, dass ein quadratisches Layout den größten Durchsatz ermöglicht. Die Untersuchungen beziehen sich jedoch auf Kleinladungsträger, welche mittels ortsfester Fördertechnik transportiert werden. Für Pakete und Kisten bietet sich ein System aus ortsfester Fördertechnik an, da so durch eine hohe Parallelisierung der Bewegungen ein hoher Durchsatz erzielt werden kann.

Die Anforderungen im Warenausgang sind aufgrund der meist verwendeten Großladungsträger anders zu bewerten. Bei der Lkw Beladung für Touren ist die Reihenfolge, nach der die unterschiedlichen Ziele angefahren werden, zu beachten. Hierzu ist eine vorherige Sequenzierung der Ladungsträger notwendig. Diese Aufgabe kann von einem GridFlow-System übernommen werden. Dabei können die Reihenfolge berechnet, vorgegeben und somit



Abbildung 7.19: Palettierroboter mit Zuführbändern

	$K = 6$	$K = 7$	$K = 8$
ShuttleGrid	$50,4m^2$	$68,6m^2$	$89,6m^2$
Unterfahrschlepper	$59,4m^2$	$80,9m^2$	$105,6m^2$
Eckumsetzer	$79,6m^2$	$108,3m^2$	$141,4m^2$

Tabelle 7.5: Flächenbedarf im Warenausgang in Abhängigkeit der Variante

Verwechslungen ausgeschlossen werden. Ebenso kann bei einer kurzfristigen Änderung der Tour die Reihenfolge automatisch verändert werden. Dies ermöglicht z.B. das schnelle Durchschleusen von Eilaufträgen.

Die Größe des sortierenden Rasters muss sich am Ladevolumen eines Lkws orientieren. Dieser kann je nach Typ bis zu 34 Paletten in einer Ebene transportieren. Soll diese Menge an Ladungsträgern mittels der GridFlow-Systematik sortiert und bereit gestellt werden, so ist ein Raster mit mindestens 35 Plätzen notwendig. Wird ein quadratisches Raster gewählt, so kann ein Feld mit der Kantenlänge $K = 6$ aufgebaut werden. In diesem Feld stehen 36 Plätze zur Verfügung was somit zwei Leerstellen bei einer vollständigen Lkw-Ladung entspricht. Der Füllgrad beträgt 94%. Wird die Kantenlänge auf $K = 7$ erhöht, so steigt die Anzahl an Leerstellen auf 15 und das Raster hat nur noch einen Füllgrad von 69%. Der Flächenbedarf steigt dabei für eine Variante bestehend aus Unterfahrschleppern von $59 m^2$ bei $K = 6$ auf $81 m^2$ für $K = 7$. Eine Variante aus ortsfesten Eckumsetzern benötigt jeweils noch einmal 34% mehr Stellfläche (Tab. 7.5).

Je nach Anforderung ist hierfür sowohl eine Variante aus ortsfester Fördertechnik als auch ein System mit unstetiger Fördertechnik interessant. Sind sehr hohe Durchsätze zu erzielen, sollte die Variante aus Eckumsetzern gewählt werden. Spielt jedoch auch der Flächenbedarf und die Energiebedarf eine Rolle, so sind die Varianten mit unstetiger Fördertechnik zu bevorzugen. Ein Vorteil der unstetigen Variante liegt auch darin, dass die Fahrzeuge je nach Bedarf an unterschiedlichen Stellen im Raster arbeiten können. Wird beispielsweise eine Tour an einem Verladetor vorbereitet, können mehr Fahrzeuge dorthin verlagert werden. Sobald die Sortierung abgeschlossen ist, können sie an einem anderen Verladetor die nächste Tour bearbeiten. Damit kann die Fördertechnik entsprechend dem Personal flexibel eingesetzt werden, sie wird gut ausgelastet und ungenutzte Kapazitäten müssen nicht vorgehalten werden (Hippenmeyer, Furmans, Stoll und Schönung 2009).

8 Zusammenfassung

Neue Warenlager werden immer öfter als Kompaktlager gebaut, um eine möglichst hohe Flächennutzung zu erreichen. In der Arbeit wurde der aktuelle Stand der Technik von Kompaktlagern präsentiert und der Zielkonflikt zwischen Kompaktheit und Durchsatz thematisiert.

Die Arbeit setzt sich mit dem von Gue und Kim (Gue und Kim 2007) vorgestellten neuen Ansatz für die kompakte Lagerung von Gütern und der hierfür notwendigen Technik auseinander. Zuerst wurde das GridFlow Konzept definiert und die Funktionsweise beschrieben. Dabei wurde auf die Einstellbarkeit des Betriebspunktes eines GridFlow-Systems eingegangen. Je nach Anforderung kann zwischen den beiden Extremen hochdichte Lagerung mit weniger Durchsatz und hoher Durchsatz bei weniger kompakter Lagerung gewählt werden. Hierzu wurden die Anforderungen an die technische Gestaltung und die notwendigen Komponenten eines GridFlow-Systems erarbeitet. Mögliche technische Implementierungen wurden strukturiert und auf die Erfüllung der Anforderungen untersucht. Basierend auf bestehender Fördertechnik wurden generische Varianten erarbeitet und deren technische Parameter aufgezeigt.

In dieser Arbeit wurde eine Vergleichsgrundlage geschaffen, auf der die verschiedenen technischen Varianten einander gegenüber gestellt wurden. Die Vergleichsgrößen sind Platzbedarf, Spielzeit, Durchsatz und der energetische Aufwand. Die eingeführte Notation für die Bewegungen im Raster sorgt dabei für eine vereinfachte Darstellung und ein einheitliches Verständnis. Hierzu gehört die hierarchische Bewegungsstruktur mit den Einzelbewegungen als unterste Ebene. Die von Gue und Kim (Gue und Kim 2007) und Schwab (Schwab, Nobbe und Furmans 2011) entwickelten Bewegungsmuster im Raster wurden für den Einsatz von Fahrzeugen, welche nicht zyklisch arbeiten, anhand der Einzelbewegungen zu den hier gültigen Grundbewegungen weiterentwickelt. Dabei findet auch eine Unterscheidung in der Bewegungsrichtung statt, was bei ungleichen Seitenlängen der Ladungsträger notwendig ist und bei den bisherigen Betrachtungen kei-

ne Berücksichtigung fand. Des Weiteren wurden analytisch behandelbare Anfangssituationen erstellt und die für eine Entnahme notwendigen, sequentiellen Bewegungen ermittelt.

Für die erarbeiteten Grundbewegungen wurden die definierten Vergleichsgrößen in Abhängigkeit der unterschiedlichen technischen Parameter der Implementierungen ermittelt. Ausgehend von einer sequentiellen Bewegung wurden die Zugriffszeiten für einen Entnahmevorgang sowie die Durchsätze in den analytischen Situationen berechnet. Ebenso wurde der notwendige Energiebedarf betrachtet und in Relation zum Durchsatz gesetzt. Dabei wurde der Unterschied von ortsfester zu unstetiger Fördertechnik deutlich gemacht. Unstetige Systeme schneiden ab einem Raster mit einer Kantenlänge größer fünf deutlich besser ab, was auf die notwendige Stand-By-Leistung ortsfester Systeme zurück zu führen ist.

Die sich ergebenden Vorteile bei der Parallelisierung von Bewegungen wurden anhand der Einteilung des Rasters in kleinere Segmente analytisch aufgezeigt. Die Auswirkungen auf den Durchsatz sowie auf die Zugriffszeit wurden betrachtet. Die Durchsatzvorteile einer maximalen Segmentierung mit Blockbewegung der Ladung, was mit ortsfester Fördertechnik technisch möglich ist, wurde ebenfalls herausgearbeitet. Des Weiteren wurden zusätzliche Entnahmeszenarien, welche von Schwab mit der Strategie Live-Path (Schwab 2015) simuliert wurden, ausgewertet. Die erhaltenen Daten wurden mit der gleichen Systematik wie die analytischen Situationen bewertet. Zusätzlich wurden die notwendigen Fahrbewegungen in Bezug zur Fahrzeuganzahl gesetzt. Die analytisch ermittelten Vorteile der Parallelisierung konnten damit simulativ bestätigt werden. Die Simulationsszenarien wurden darüber hinaus ebenfalls energetisch bewertet. Aufgezeigt wurde, dass die Durchsätze sehr gut über die Anzahl der Leerstellen im Raster (Füllgrad) und bei unstetiger Fördertechnik zusätzlich durch die Anzahl der Fahrzeuge einzustellen sind.

Abschließend wurde der Einsatz des GridFlow Konzepts anhand von verschiedenen Anwendungsfällen in der Lagerhaltung (Vorratslager, Puffern, Sortieren) diskutiert. Dabei wurde auf die Unterschiede zwischen ortsfester und unstetiger Systeme eingegangen und deren Eignung für die jeweilige Anwendung erörtert. Als Anhaltspunkt für die Einsatzempfehlung kann dabei dienen, das Lager mit viel Bewegung und kleinem Lagervolumen als ortsfeste Variante ausgeführt werden und Lager mit weniger Bewegung und höherem Lagervolumen als unstetige Variante. Es wurde herausgearbeitet,

dass der Einsatz des GridFlow Konzepts eine Automatisierung in kleineren Lagerbereichen bis beispielsweise 1000 Paletten ermöglicht. Beim Einsatz unstetiger Fördertechnik ist der Installationsaufwand gering und der Energiebedarf auch bei längerer Lagerung niedrig.

Literatur

- Agile-Systems (2003). Navstors - Naval Storage and Retrieval System, <http://www.agilesystems.com/>.
- Arnold, D. und K. Furmans (2009). *Materialfluss in Logistiksystemen*. SpringerLink : Bücher. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Arnold, D., H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier und K. Furmans (2008). *Handbuch Logistik* (3., neu bearbeitete Aufl. ed.). VDI-Buch. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Bambynek, A. (2001). *Flurfreie Fördersysteme im automatisierten Materialfluss*. Ph.D. thesis, Technische Universität München, München.
- Berbig, D., S. Mayer, K. Furmans und C. Stryja (2010). Abschlussbericht des IGF-Forschungsprojekts Nr. 15732: Entwicklung eines flexiblen Fördersystems auf Basis baugleicher Einzelmodule.
- Blunck, S. (2005). *Modellierung und Optimierung von Hub-and-Spoke-Netzen mit beschränkter Sortierkapazität*. Ph.D. thesis, Universität Karlsruhe (TH).
- Braun, M., P. Linsel, F. Schönung und K. Furmans (2012). Energiebeurteilung beim Lager- und Kommissioniervorgang. *Logistics Journal*.
- Bullinger, H.-J. und M. ten Hompel (2007). *Internet der Dinge*. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- DePuy, G. W. und D. G. Taylor (2007). Using Board Puzzles to Teach Operations Research: INFORMS Transactions on Education.
- DIN-15207 (2000). Stetigförderer; Tragrollen für Gurtförderer; Hauptmaße der Tragrollen für Stückgutförderer.
- DIN-EN-13698 (2004). Produktspezifikation für Paletten.
- FEM-9.831 (2012, Oktober). Berechnungsgrundlage für Regalbediengeräte Toleranzen, Verformungen und Freimaße im Hochregallager.
- Fischer, W. und L. Dittrich (2004). *Materialfluß und Logistik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Furmans, K., F. Schönung und K. R. Gue (2011). Plug-and-work Material Handling Systems.
- Grote, K.-H. und J. Feldhusen (2007). *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau* (22 ed.). Berlin and Heidelberg and New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Gudehus, T. (2010). *Logistik: Grundlagen, Strategien, Anwendungen* (4., aktualisierte Aufl ed.). Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Gue, K. R. (2006). Very High Density Storage Systems. *IIE Transactions* 38(1), p. 93–104.
- Gue, K. R. und K. Furmans (2011). Decentralized Control in a Grid-Based Storage System. In: T. Doolen and E. van Aken. *Proceedings of the 2011 Industrial Engineering Research Conference*.
- Gue, K. R. und B. S. Kim (2007, Januar). Puzzle-Based Storage Systems. *Naval Research Logistics* 54(5), p. 556–567.
- Gue, K. R., O. Uludag und K. Furmans (2012). A High-Density System for Carton Sequencing.
- Heinecker, M. (2006). *Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme*. Ph.D. thesis, Technische Universität München, München.
- Hippenmeyer, H., K. Furmans, T. Stoll und F. Schönung (2009). KARIS - dezentral gesteuert, Ein neuartiges Element für zukünftige Materialflusssysteme. *Hebezeuge und Fördermittel* 6, p. 304–306.
- Huber, C. (2011). *Throughput Analysis of Manual Order Picking Systems with Congestion Consideration*. Ph.D. thesis, Karlsruher Institut für Technologie, KIT.
- Jodin, D. und M. ten Hompel (2005). *Sortier- und Verteilsysteme: Grundlagen, Aufbau, Berechnung und Realisierung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Koether, R. (2007). *Technische Logistik* (3 ed.). München: Hanser.
- Lippolt, C. (2003). *Spielzeiten in Hochregallagern mit doppeltiefer Lagerung*. Ph.D. thesis, Universität Karlsruhe (TH).
- Martin, H. (2011). *Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. Vieweg+Teubner Verlag.
- Martin, H. (2012). *Praxiswissen Intralogistikplanung: Reale Projekte mit Ist-Situation Zielsetzung Planungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mit 74 Tabellen*. Wiesbaden: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Martin, H., P. Römisch und A. Weidlich (2008). *Materialflusstechnik: Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen der Förder-technik* (9 ed.). Viewegs Fachbücher der Technik. Wiesbaden: Vieweg.
- Mayer, S. und K. Furmans (2009). Neun Module im Versuchsbetrieb: Vollständig dezentraler und autonomer Flexförderer. *Hebezuge und Fördermittel* (6), p. 308–309.
- Nobbe, C., T. Baur, F. Schönung und K. Furmans (2010). Flächenbewegliche Fahrtriebe für moderne Materialfluss am Beispiel von KARIS. In: *6. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL)*.
- Nyhuis, P., G. Reinhart und E. Abele (2008). *Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten*. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum.
- Pahl, G., W. Beitz, J. Feldhusen und K.-H. Grote (2006). *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung* (7 ed.). Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Rohit, K. V., D. G. Taylor und K. R. Gue (2010). Retrieval Time Performance in Puzzle-Based Storage Systems. In: *Proceedings of the 2010 Industrial Engineering Research Conference*.
- Schumann, M. (2008). *Zur Bestimmung der Umschlagleistung von Hochregallagern unter besonderer Berücksichtigung der Lagerorganisation*. Ph.D. thesis, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz.
- Schwab, M. (2015). *A decentralized control strategy for high density material flow systems with AGVs*. Ph.D. thesis, Karlsruher Institut für Technologie.
- Schwab, M., C. Nobbe und K. Furmans (2011). Future of Material Handling – modular, flexible and efficient. In: IEEE/RSJ (eds.), *Tagungsband - IROS 2011*.
- Seibold, Z., K. Furmans und T. Stoll (2013). Layout-Optimized Sorting of Goods with Decentralized Controlled Conveying Modules. In: *Proceedings of the Systems Conference (SysCon), 2013 IEEE International*.
- Stickel, M. (2006). *Planung und Steuerung von Crossdocking-Zentren*. Ph.D. thesis, Universität Karlsruhe [TH].
- ten Hompel, M., M. Beck und V. Sadowsky (2011). *Kommissionierung: Materialflusssysteme 2 - Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- ten Hompel, M. und V. Heidenblut (2011). *Taschenlexikon Logistik: Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe*

- aus Materialfluss und Logistik* (3., bearbeitete und erw. Aufl ed.). VDI-Buch. Heidelberg and New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- ten Hompel, M., T. Schmidt und L. Nagel (2007). *Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik* (3., völlig neu bearbeitete Auflage ed.). Intralogistik. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Ullrich, G. (2011). *Fahrerlose Transportsysteme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden.
- VDI-2198 (2002, August). Typenblätter für Flurförderzeuge.
- VDI-2199 (2012, Januar). Empfehlungen für bauliche Planungen beim Einsatz von Flurförderzeugen.
- VDI-2340 (1997, März). Ein- und Ausschleusungen von Stückgütern, Übersicht, Aufbau und Arbeitsweise.
- VDI-2411 (1970). Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen.
- VDI-2510 (2005, Oktober). Fahrerlose Transportsysteme (FTS), Verein Deutscher Ingenieure e.V.
- VDI-3561.4 (2009, Juli). Spielzeitermittlung von automatischen Kanallager-Systemen.
- VDI-3573 (2010, April). Arbeitsgeschwindigkeiten schienengebundener Umschlagkrane.
- VDI-3584 (2003, September). Fließlagersysteme für Stückgut.
- VDI-3619 (1983, Mai). Sortiersysteme für Stückgut.
- VDI-3629 (2005, März). Organisatorische Grundfunktionen im Lager.
- VDI-3656 (1998, Oktober). Automatisierte Kransysteme.
- VDI-4440 (2007, März). Übersichtsblätter Stetigförderer für Stückgut Rollen- und Kugelbahnen.
- VDI-4451 (2000, Oktober). Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) Fahr- und Lenkantrieb.
- Wehking, K.-H., C. Vorwerk, M. Schröppel und M. Weber (2012). Doppelkufensystem schafft bis zu 1000 kg: Monofunktionale autonome Transporteinheit 2/2. *Hebezeuge und Fördermittel* (52), p. 80–82.
- Weiblen, J., H. Breier und K. Furmans (2010). LogoTakt – hochfrequente, getaktete Belieferung in kleinen Sendungseinheiten. In: *6. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL)*.
- Zaerpour, N. (2013). *Efficient Management of Compact Storage Systems*. Ph.D. thesis, Erasmus University Rotterdam, Rotterdam.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Wareneingang (Quelle: Internet)	7
2.2	Bodenlagerungsarten (Quelle: Taschenlexikon Logistik) . . .	8
2.3	Block-It (Quelle: IML)	9
2.4	Durchlauf- und Einschubregal (Quelle: Interroll)	10
2.5	Kanalfahrzeug (Quelle: Bito)	11
2.6	Verschieberegale (Quelle: Jungheinrich)	12
2.7	SmooV ASRV (Quelle: Internet)	13
2.8	AutoStore (Quelle: Swisslog)	14
2.9	Kiva Mobile Fulfillment (Quelle: Kiva)	14
3.1	Verschiebepuzzle	18
3.2	Palettengestell	20
3.3	Abmaße Europoolpalette (GNU Free Documentation License)	24
3.4	Lastaufnahmemittel für Paletten (Quelle: Mias)	25
3.5	Übersicht Fahrtriebe nach VDI 2510	26
3.6	Fahr-/Lenkeinheit KARIS	27
3.7	Systematisierung GridFlow	29
3.8	Flex-Förderer (Quelle: IFL)	29
3.9	Eckumsetzer Rolle-Kette (Quelle: mlog)	30
3.10	Palettendrehtisch (Quelle: mlog)	31
3.11	Rolleneckumsetzer (Quelle: mlog)	32
3.12	SmooV ASRV im Einsatz in der Lagervorzone	33
3.13	ShuttleGrid	34
3.14	Unterfahrschlepper (Quelle: Grenzebach)	35
3.15	Basic Intralogistics Element - BInE (Quelle: IFL)	36
3.16	Deckenkran am IFL	36
3.17	Navstore (Quelle: Gue)	37
4.1	Berechnung der mittleren Spielzeit eines RBGs (Quelle: Arnold und Furmans 2009)	44

4.2	Wirkungsgrad einer Glühlampe	46
4.3	Element im Raster	49
4.4	Notation Fahrbewegung	50
4.5	3-move	53
4.6	Verschieben der Leerstelle um zwei Positionen mittels n-move	54
4.7	14-move	56
4.8	c-move	60
4.9	Bewegungsstruktur in GridFlow	62
4.10	Situation 1	63
4.11	Füllgrad Situation 1 bei quadratischer Form ($H=V$)	64
4.12	Situation 2	68
4.13	Situation 3	70
5.1	Platzbedarf der technischen Varianten	76
5.2	Palettenausrichtung	78
5.3	vertikale und horizontal Ausrichtung der Paletten	79
5.4	Bewegungsgliederung	80
5.5	3-move nach Bewegungsart	82
5.6	n-move horizontal in Abhängigkeit der Zahl der zu versetz-	
	zenden Stellen	82
5.7	n-move vertikal in Abhängigkeit der Zahl der zu versetz-	
	enden Stellen	83
5.8	Vergleich n-move zu $n \cdot 3$ -move beim ShuttleGrid in Abhän-	
	gigkeit der Rastergröße in horizontaler Richtung	84
5.9	14-move nach Bewegungsart	85
5.10	c-move nach Bewegungsart	85
5.11	Zeitlicher Vergleich 14-move zu c-move	86
5.12	Energiebedarf 3-move je eingesetzter Technik und Ausrichtung	90
5.13	Vergleich des Energiebedarfs von 14- und c-move je einge-	
	setzter Technik und Ausrichtung	91
6.1	Spielzeit Situation 1 in Abhängigkeit der Rastergröße	94
6.2	Spielzeit Situation 1 in Prozent - Zeit für ein ShuttleGrid auf	
	100% normiert	95
6.3	Durchsatz Situation 1 in Abhängigkeit der Lagergröße	96
6.4	Energieaufwand Situation 1, Lagergröße: 3×3	97
6.5	Energieaufwand Situation 1, Lagergröße: 15×15	98
6.6	Energieaufwand Situation 1 in Abhängigkeit der Lagergröße	98

6.7	Situation 1 - Energie pro Durchsatz in Abhängigkeit der Lagergröße	99
6.8	Spielzeit Situation 2 in Abhängigkeit der Rastergröße	100
6.9	Spielzeit Situation 2 - ShuttleGrid auf 100% normiert . . .	101
6.10	Durchsatz Situation 2 in Abhängigkeit der Lagergröße . . .	102
6.11	Energieaufwand Situation 2 in Abhängigkeit der Lagergröße	103
6.12	Energieaufwand Situation 2, Lagergröße 3x3	103
6.13	Energieaufwand Situation 2, Lagergröße 15 × 15	104
6.14	Situation 2 - Energie pro Durchsatz in Abhängigkeit der Lagergröße	104
6.15	Spielzeit Situation 3 in Abhängigkeit der Lagergröße	105
6.16	Situation 3 - Spielzeit des ShuttleGrid auf 100% normiert, in Abhängigkeit der Lagergröße	106
6.17	Durchsatz Situation 3 in Abhängigkeit der Lagergröße . . .	107
6.18	Energieaufwand Situation 3, Lagergröße 3 × 3	108
6.19	Energieaufwand Situation 3, Lagergröße 15 × 15	109
6.20	Energieaufwand Situation 3 in Abhängigkeit der Lagergröße	109
6.21	Situation 3 - Energie pro Durchsatz in Abhängigkeit der Lagergröße	110
6.22	Füllgrad Situation 1,2 und 3 in Abhängigkeit der Lagergröße	112
6.23	Bereiche gleicher Zugriffszeiten für ein Shuttle-System in Situation 2 in Abhängigkeit der Lagergröße	113
6.24	Vergleich maximale Zugriffszeit zu mittlerer Zugriffszeit in Situation 2 am Beispiel des Shuttles	114
6.25	Vergleich minimaler Durchsatz zu mittlerem Durchsatz in Abhängigkeit der Lagergröße am Beispiel des Shuttle in Situation 2	115
6.26	Vergleich Koeffizient aus Energie pro Durchsatz für ein ShuttleGrid	116
7.1	Mögliche Segmentierung eines Rasters	118
7.2	Maximal möglicher Füllgrad in Abhängigkeit der Segmentierung eines Rasters für Strategien nach Situation 1 und 2	119
7.3	Durchsatz Situation 1 in Abhängigkeit der Segmentierung bei einem Lagerrasaster mit 60 × 60 Feldern	121
7.4	Durchsatz Situation 1 Ausschnitt der Segmentierung	121
7.5	Stand-By-Verbrauch in Abhängigkeit der Segmentierung . .	122

7.6	Vergleich der Spielzeit für Situation 3 bei maximaler Segmentierung am Beispiel des Eckumsetzer	123
7.7	Laufzeitverteilung für fünf Fahrzeuge	126
7.8	Laufzeitminimum und -maximum in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl	127
7.9	Mittlere Laufzeit der Szenarien in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl	128
7.10	Mittlere Anzahl der Einzelbewegungen in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl	128
7.11	Mittlerer Durchsatz in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl . .	129
7.12	Mittlerer Energiebedarf pro Szenario	130
7.13	Mittlerer Energiebedarf pro Ladungseinheit	131
7.14	Mittlere Energie pro Durchsatz in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl	131
7.15	FTF beim Ladungstransport (Quelle: Bär Automation) . .	133
7.16	Beispiellagerraster mit dem Kantenmaß 20×10 und einem Füllgrad von 75%	134
7.17	Verteilte Lagerstruktur in einer Fertigung	136
7.18	Virtuelle Pufferstrecken mit der GridFlow-Systematik . . .	137
7.19	Palettierroboter mit Zuführbändern	138

Tabellenverzeichnis

3.1	Fahrgeschwindigkeiten der Varianten nach Art der Bewegung	38
3.2	Zusatzzeiten der Varianten nach Art der Bewegung	39
3.3	Bewegungsmöglichkeiten der FT bei Paletten	40
3.4	Flächenbedarf pro Palette nach technischer Variante für den Einsatz mit Europaletten	40
4.1	Notationsbeispiele für die Bewegungsbeschreibung	50
5.1	Flächennutzungsgrad je eingesetzter Technik	77
5.2	Einfluss der Ausrichtung auf die Fahrstrecken	79
5.3	Angenommene Leistungsaufnahme im Ruhezustand pro Förder- ertechnikelement	88
5.4	systemspezifische Parameter für die Energieberechnung . . .	89
6.1	Notwendige Bewegungen zum Auslagern in Situation 1 für ein 15×15 Grid mit unstetiger Fördertechnik	96
6.2	Notwendige Bewegungen zum Auslagern in Situation 2 für ein 15×15 Lagerraster mit unstetiger Fördertechnik	101
6.3	Notwendige Bewegungen zum Auslagern in Situation 3 für ein 15×15 Lagerraster mit unstetiger Fördertechnik	107
6.4	Vergleich Situation 1, 2 und 3, Lagergröße 15×15 , Unterfahrschlepper	111
7.1	Segmentierung 60×60 Raster	120
7.2	Simulationsparameter	125
7.3	Laufzeiten der Szenarien	126
7.4	Durchsatz der Szenarien	129
7.5	Flächenbedarf im Warenausgang in Abhängigkeit der Variante	138

Symbolverzeichnis

FTF	fahrerloses Transportfahrzeug
KFZ	Kanalfahrzeug
LE	Ladungseinheit
RBG	Regalbediengerät
FIFO	first in - first out
LIFO	last in - first out
A	Lage des Auslager- Bereitstellplatzes
t_{01}	Fahrzeit KFZ einschließlich Übernahme- und Abgabezeit beim Einfachspiel
$P_{1k,n}$	Lage des Einlagerungsplatzes im Kanal (beim Einfachspiel)
v	Geschwindigkeit
a	Beschleunigung
t	Bewegungszeit zwischen zwei Punkten
$t_{s,(n)}$	mittlere Spielzeit
λ	Durchsatz
F	Füllgrad des Raster
d	rechtwinklige Distanz
fn	Flächennutzungsgrad
K	Kantenlänge Raster bei gleich langen Kanten
K_H	Kantenlänge Raster in horizontaler Richtung
K_V	Kantenlänge Raster in vertikaler Richtung
η	Wirkungsgrad

H_{1voll}	horizontale Fahrt über ein Feld, beladen
H_{1leer}	horizontale Fahrt über ein Feld, unbeladen
H_{2voll}	horizontale Fahrt über zwei Felder, beladen
H_{2leer}	horizontale Fahrt über zwei Felder, unbeladen
H_{3voll}	horizontale Fahrt über drei Felder, beladen
H_{3leer}	horizontale Fahrt über drei Felder, unbeladen
V_{1voll}	vertikale Fahrt über ein Feld, beladen
V_{1leer}	vertikale Fahrt über ein Feld, unbeladen
V_{2voll}	vertikale Fahr über zwei Felder, beladen
V_{2leer}	vertikale Fahrt über zwei Felder, unbeladen
V_{3voll}	vertikale Fahr über drei Felder, beladen
V_{3leer}	vertikale Fahrt über drei Felder, unbeladen
Auf	Ladungsaufnahme
Ab	Ladungsabgabe
L	Lenkbewegung
$3move_H$	Verschieben einer Leerstelle um einen Platz in horizontaler Richtung
$3move_V$	Verschieben einer Leerstelle um einen Platz in vertikaler Richtung
$nmove_H$	Verschieben einer Leerstelle um n Plätze in horizontaler Richtung
$nmove_V$	Verschieben einer Leerstelle um n Plätze in vertikaler Richtung
$14move_H$	Versetzen einer Ladungseinheit um einen Platz in horizontaler Richtung
$14move_V$	Versetzen einer Ladungseinheit um einen Platz in vertikaler Richtung
$cmove_H$	Umsetzen einer Ladungseinheit von vertikaler in die horizontale Richtung
$cmove_V$	Umsetzen einer Ladungseinheit von horizontaler in die vertikale Richtung

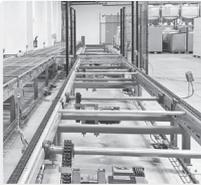
$S1_{leer}$	Die notwendigen Bewegungen für den Transport der Leerstelle in Szenario 1
$S1_{voll}$	Die notwendigen Bewegungen für den Transport der Ladungseinheit in Szenario 1
$S1_{Auslagern}$	Alle für den Auslagerungsvorgang notwendigen Bewegungen in Szenario 1
$S2_{leer}$	Die notwendigen Bewegungen für den Transport der Leerstelle in Szenario 2
$S2_{voll}$	Die notwendigen Bewegungen für den Transport der Ladungseinheit in Szenario 2
$S2_{Auslagern}$	Alle für den Auslagerungsvorgang notwendigen Bewegungen in Szenario 2
$S2_{rechteck}$	Die zusätzlich notwendige Bewegungen bei ungleichen Kantenlängen in Szenario 2
$S3_{leer}$	Die notwendigen Bewegungen für den Transport der Leerstelle in Szenario 3
$S3_{voll}$	Die notwendigen Bewegungen für den Transport der Ladungseinheit in Szenario 3
$S3_{Auslagern}$	Alle für den Auslagerungsvorgang notwendigen Bewegungen in Szenario 3

Anhang

[20]

FÖRDERTECHNIK

Kettenförderer



Funktion:
Fördern der Ladung in Querrichtung; optional: seitliche Führungen

- Ladehilfsmittel:**
Euro-, Industrie-, Sonderpalette, Gitterbox
Nutzlast:
max. 1.200 kg pro Palettenplatz
Fördergeschwindigkeit:
0,2–0,6 m/s
Aufbau:
- ▼ Verzinkte, höhenverstellbare Stellfüße
 - ▼ lackierte Unterkonstruktion
 - ▼ verzinkte Tragholme
 - ▼ Duplex-Kette in Kunststoffgleitleiste
 - ▼ Frequenz geregelter Antrieb
 - ▼ Lichtschranken/-taster

Rollenförderer



Funktion:
Fördern der Ladung in Längsrichtung; Führung der Ladung mit Spurkränzen

- Ladehilfsmittel:**
Euro-, Industrie-, Sonderpalette, Gitterbox
Nutzlast:
max. 1.200 kg pro Palettenplatz
Fördergeschwindigkeit:
0,2–0,6 m/s
Aufbau:
- ▼ Verzinkte, höhenverstellbare Stellfüße
 - ▼ lackierte Unterkonstruktion
 - ▼ verzinkte Tragholme
 - ▼ Frequenz geregelter Antrieb
 - ▼ Lichtschranken/-taster

Stau-Rollenförderer



Funktion:
Fördern der Ladung in Längsrichtung mit Staufunktion; jeder Palettenplatz hat einen eigenen Antrieb und eine eigene Logik; Führung der Ladung mit Spurkränzen

- Ladehilfsmittel:**
Euro-, Industrie-, Sonderpalette, Gitterbox
Nutzlast:
max. 1.200 kg pro Palettenplatz
Fördergeschwindigkeit:
0,2–0,6 m/s
Aufbau:
- ▼ Verzinkte, höhenverstellbare Stellfüße
 - ▼ lackierte Unterkonstruktion
 - ▼ verzinkte Tragholme
 - ▼ verzinkte Tragrollen
 - ▼ Frequenz geregelter Antrieb
 - ▼ Lichtschranken/-taster
 - ▼ Logikelement

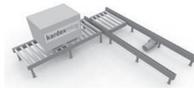
Eckumsetzung Drehtisch



Funktion:
Eckumsetzung der Ladung ohne Richtungswechsel von Rollen- auf Kettenförderer oder von Ketten- auf Kettenförderer; Durchsatzleistung ca. 200 LE*/h

- Ladehilfsmittel:**
Euro-, Industrie-, Sonderpalette, Gitterbox
- Nutzlast:**
max. 1.200
- Fördergeschwindigkeit:**
0,2–0,6 m/s
- Aufbau:**
- ▣ Lackierte, am Boden befestigte und höhenverstellbare Unterkonstruktion
 - ▣ hochwertige Kugeldrehverbindung
 - ▣ frequenzgeregelter Drehantrieb
 - ▣ aufgebauter Förderer
 - ▣ Endschalter

Eckumsetzung Hubtisch



Funktion:
Eckumsetzung der Ladung mit Richtungswechsel von 90° von Rollen- auf Kettenförderer oder umgekehrt; Hubprinzip mit Exzenter; auskragende Außenrollen; Durchsatzleistung ca. 200 LE*/h

- Ladehilfsmittel:**
Euro-, Industrie-, Sonderpalette, Gitterbox
- Nutzlast:**
max. 1.200 kg
- Fördergeschwindigkeit:**
0,2–0,6 m/s
- Aufbau:**
- ▣ Lackierter, am Boden befestigter und höhenverstellbarer Grundrahmen
 - ▣ über Exzenter und Gleitführungen befestigtes, verzinktes Hubelement
 - ▣ Hubantrieb mit Bremse
 - ▣ aufgebauter Förderer
 - ▣ Endschalter

Umsetzer Rollen-Kettenförderer



Funktion:
Umsetzung der Ladung mit Richtungswechsel von Rollen- auf Kettenförderer; Durchsatzleistung ca. 200 LE*/h

- Ladehilfsmittel:**
Euro-, Industriepalette
- Nutzlast:**
max. 1.200 kg
- Fördergeschwindigkeit:**
0,2–0,6 m/s
- Aufbau:**
- ▣ Lackierte, am Boden befestigte und höhenverstellbare Unterkonstruktion
 - ▣ hochwertige Kugeldrehverbindung
 - ▣ über Exzenter und Gleitführungen befestigtes, verzinktes Hubelement mit Kettenförderer und aufgebautem Rollenförderer
 - ▣ frequenzgeregelter Drehantrieb

Weitere Elemente: Schwenktische, Auf-/Abgabepölsche, Bodenabstützgerüste, Scherenhubtische, Schwerfräsen, Rollenbahnen, Drehhubelemente, Kommissionierplätze aller Art, Stapoleinheiten, Waagen, Palettenprüf- und Reinigungssysteme, Integration von Spezialmaschinen, wie z.B. Streckanlagen.

* Ladeeinheiten

[22]

Eckumsetzung 4-Wege-Drehtisch



Funktion:

Eckumsetzung der Ladung ohne Richtungswechsel von Rollen- auf Rollenförderer; Ab- und Auf- fahrten ohne Zwischendrehung; uneingeschränkter Drehwinkel; Durchsatzleistung ca. 240 LE*/h

Ladehilfsmittel:

Euro-, Industrie-, Sonderpalette

Nutzlast:

max. 1.200 kg

Fördergeschwindigkeit:

0,2–0,6 m/s

Aufbau:

- ▼ Lackierte, am Boden befestigte und höhenverstellbare Unterkonstruktion
- ▼ hochwertige Kugeldrehverbindung
- ▼ frequenz geregelter Drehantrieb
- ▼ aufgebauter Rollenförderer mit gekreuzt laufenden Rollen
- ▼ Endschalter

Kontrollen



Funktion:

Prüfung der Ladung bezüglich:

- ▼ der Kontur mit Lichtschränken
- ▼ der Überlast mit Wägezellen
- ▼ der Palettenfreiräume mit Lichtschränken oder mechanischen Klappen

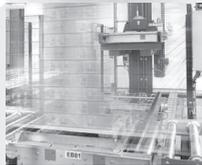
Ladehilfsmittel:

Euro-, Industrie-, Sonderpalette, Gitterbox

Aufbau:

- ▼ Aluminium-Rahmengestell mit Lichtschränken und Sensoren

Vertikalumsetzer



Funktion:

Vertikaltransport der Ladung; Lastaufnahme mit Ketten- oder Rollenförderer; Hubhöhe bis 25 m; Durchsatzleistung bis 180 LE*/h (bei 5 m Hubhöhe)

Ladehilfsmittel:

Euro-, Industrie-, Sonderpalette, Gitterbox

Nutzlast:

max. 1.200 kg

Fördergeschwindigkeit:

bis 2 m/s

Aufbau:

- ▼ Lackierte Einsäulenkonstruktion mit Führungsschienen oben oder unten angeordnetes Hubwerk mit frequenz geregelter Antrieb
- ▼ lackierter Hubwagen mit Seiltrieb
- ▼ aufgebauter Förderer
- ▼ Endschalter/Laser
- ▼ optional mit Fangvorrichtung

Produktfamilienübersicht

S300

Produktfamilienübersicht

			
	S300 Standard	S300 Advanced	
	Wirtschaftlich und zuverlässig zugleich	Produktionsprozesse sicher optimieren	
Technische Daten			
Schutzfeldreichweite	2 m/3 m	2 m/3 m	
Warnfeldreichweite	8 m	8 m	
Scanwinkel	270°	270°	
Ansprechzeit	80 ms	80 ms	
Objektauflösung ¹⁾	30 mm/40 mm/50 mm/70 mm/150 mm ²⁾	30 mm/40 mm/50 mm/70 mm/150 mm ²⁾	
Funktionen			
Tripelfeldmodus ³⁾ / Dualfeldmodus ⁴⁾	Tripel	Tripel	
Anzahl Feldsätze	1	4	
Überwachungsfälle	1	4	
Statische Eingänge am Gerät zur Schutzfeldumschaltung	0	2	
Dynamische Eingänge ⁵⁾ am Gerät zur Schutzfeld- umschaltung	–	–	
OSS Ds im Gerät	Ja	Ja	
Integrierte Schutzkontrolle (EDM)	Ja	Ja	
Simultane Überwachung zweier Schutzfelder	–	–	
Integrierter Konfigurations- speicher im System ecker	Ja	Ja	
Kontur als Referenz ⁷⁾	Ja	Ja	
Schnittstellen			
EFI ⁸⁾	Ja	Ja	
Messdatenausgabe (RS-422)	Standard	Standard	
Sichere integrierte Busanbindung (PROFINET IO)	–	–	
Zertifizierungen			
Typ (EN 61496-1) / Sicherheits-Integritätslevel (IEC 61508) / Performance Level (EN ISO 13849-1)	Typ 3 / SIL2 / PL d	Typ 3 / SIL2 / PL d	
Allgemeine Angaben			
Abmessungen (B x H x T)	102 mm x 152 mm x 106 mm	102 mm x 152 mm x 106 mm	
Schutzart (EN 60529)	IP 65	IP 65	
Betriebstemperaturbereich	–10 °C ... +50 °C	–10 °C ... +50 °C	
Elektrische Angaben			
Anschlussart	Systemstecker	Systemstecker	
Leistungsaufnahme ⁹⁾	6 W	6 W	
Detailinformationen	– Seite 42	– Seite 42	

¹⁾ 30/40 mm – Handdet. ektion; 50/70 mm – Beindetektion; 150 mm – Körperdetektion.

²⁾ Nur bei 3 m Variante.

³⁾ 1 Feldsatz = 2 Warnfelder + 1 Schutzfeld.

⁴⁾ 1 Feldsatz = 1 Warnfeld + 1 Schutzfeld.

⁵⁾ 8 Überwachungsfälle mit statischen Steuereingängen am Gerät, 32 Überwachungsfälle über dynamische Eingänge oder EFI.

⁶⁾ Zum Anschluss von Inkrementalgebern zur geschwindigkeitsabhängigen Schutzfeldumschaltung.

⁷⁾ Bei vertikalem Einsatz des Scanners muss Kontur als Referenz konfiguriert werden.

⁸⁾ „Enhanced Function In Interface“ zur einfachen und sicheren Verbindung mehrerer Scanner bzw. der Scanner mit der Sicherheits-Steuerung Flexi Soft.

⁹⁾ Ohne Ausgangslast.

Bei der kompakten Lagerung von Waren wird versucht einen möglichst großen Flächennutzungsgrad zu erreichen. Die Automatisierung solcher Kompaktlager ist technisch aufwändig und oftmals mit großem finanziellen Aufwand verbunden. Bei immer teurer werdenden Grundstückspreisen, vor allem in urbanen Gegenden, stellen sie jedoch eine effiziente Möglichkeit dar, Ware platzsparend zu lagern. Diese automatisierten Kompaktlager sind jedoch erst ab einer bestimmten Größe und Durchsatz rentabel. Die Alternative stellen kostengünstige, manuelle Bodenlager dar.

In dieser Arbeit werden verschiedene technische Implementierungen, mit denen es möglich ist das GridFlow-Prinzip umzusetzen, untersucht. Zunächst wird ein Überblick der Varianten gegeben und die jeweils systemspezifischen Parameter, wie z.B. Geschwindigkeit und Lagerplatzgröße, aufgezeigt. Mithilfe von Beispielszenarien werden die technischen Varianten beurteilt und deren Eignung für die genannten Einsatzmöglichkeiten herausgearbeitet. Augenmerk liegt dabei auf dem Platzbedarf, Durchsatz und dem Energieverbrauch.