

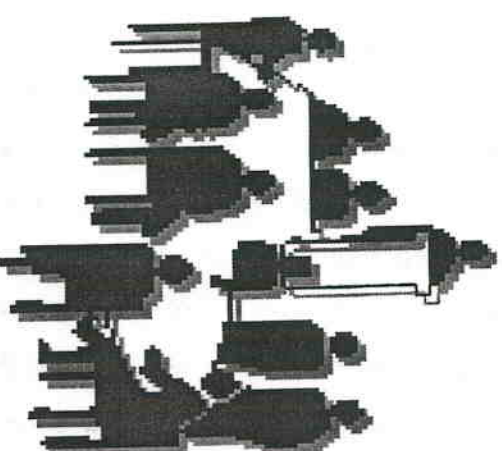
**VDI**

VDI-Gesellschaft  
Produktion und Logistik

# 25. Deutscher Materialfluss-Kongress

mit VDI-Fachkonferenz  
Routenzugsysteme

TU München, Garching, 17. und 18. März 2016



**VDI-Berichte 2275**

**Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**  
 Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.dnb.de> abrufbar.  
**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**  
 (German National Library)  
 The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie  
 (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.dnb.de>.

**Inhalt**

	Vorwort	1
--	---------	---

**Industrie 4.0**

<b>G. Wehberg</b>	Industrie 4.0 – technikverliebt oder strategisch? Über digitale Betriebsmodelle zum Triple Longtail®	3
<b>J. Behling, G. Follert, D. Ramers</b>	Flexibilität trotz Automatisierung – Neuartiges Fahrerloses Transportsystem für Behälter und Kartons	23

**Innovative Anwendungen**

<b>V. Glöckle, B. von Rosenberger</b>	Präzise Kenntnis der Objekteigenschaften als Basis für durchgängig hoch performante Materialfluss-Systeme	33
<b>C. Thoma</b>	SAP-EWM-Migration auf SAP HANA – Herausforderungen einer Umstellung im laufenden Betrieb	41
<b>W. Radtke, M. Kromm</b>	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) – Demonstrationsbetrieb BZ-Flurförderzeuge Mercedes-Benz Werk Düsseldorf	45


**Logistik + IT**

<b>M. Kintber</b>	Industrie 4.0 – SCHUNK auf dem Weg zur Digitalisierung	59
<b>R. Mehltermann, G. Heiser</b>	Die digitale Supply Chain – Collaboration über eine zentrale Plattform – Digitalisierung, moderne IT, Collaboration entlang der Supply Chain	69

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.  
 Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuskriptdruck. Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder.  
 Printed in Germany.

ISSN 0083-5960  
 ISBN 978-3-18-092275-1

<b>Best Practice</b>		
H. Prieschenk	Integrierte End-to-End-Logistik für Online-Handel und Food Multi-Channel – Hocheffiziente Logistik-Lösungen im Food- und Non-Food-Bereich	73
V. Jungbluth	Best in Class: Multichannel-Logistik für Marktführer bei Zubehörtösungen – Ausgeklügelte Kombination aus Shuttle-Lager, Orderline- und Versandpuffer trägt den künftigen Anforderungen Rechnung	85
<b>Innovative Technologien</b>		
J. Beutler, G. Fischer	Spike Cargo – schnell wie eine Achterbahn – Hochgeschwindigkeitsfördertechnik für Großladungsträger	93
D. Liekenbrock	Shuttlesysteme und Klein-RBG – Leistung und Energiebilanz im Vergleich	103
<b>F &amp; E</b>		
G. Kartnig, M. Eder	 Geometrieoptimierung von Shuttle-Systemen mit Hilfe eines analytischen Berechnungsmodells	113
H. Stichweh, M. Theßeling, S. Sohr, A. Heinke, L. Overmeyer	Intelligent routen, fördern und verteilen: Die Conveyor Matrix für die kognitive Produktion der Zukunft	127
M. Spindler, T. Aicher, B. Vogel-Heuser, W. A. Günthner	Effiziente Erstellung von Steuerungssoftware für automatisierte Materialflusssysteme basierend auf einer Zwei-Schichten-Architektur	143

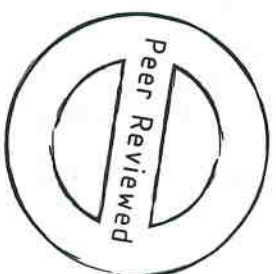
<b>Wissenschaft</b>		
H. Thamer, C. Uriarte, M. Freitag	Cellveyor – Zellulare Fördertechnik für hochflexible Materialflusssysteme	149
C. Lieberoth-Leden, D. Regulin, W. A. Günthner, B. Vogel-Heuser	Effizienter Informationsaustausch durch Cluster-Koordinatoren in dezentral gesteuerten Materialflusssystemen – Kommunikationseffiziente Steuerung in hochflexiblen Materialflusssystemen mit kollaborativer Auftragsdurchführung	159
<b>Mensch + Technik</b>		
J. Beutler, T. Fohrmann	Lifelong LEARNING – Wie Lean Management die Auswirkungen des demographischen Wandels in der Intralogistik aktiv mitgestalten kann	167
P. Stock	Humanorientierte Arbeitsorganisation als Erfolgsfaktor für die digitalisierte Intralogistik	177
A. Bacher	Vorstellung eines Augmented Reality basierten Assistenzsystems – mit dem Namen pick-by-projection – für leistungsgeminderte Mitarbeiter in manuellen Kommissionierprozessen	183
<b>Vollfachkonferenz "Routenzugsysteme 2016"</b>		
H. Wustmann, H. Ziemisch, H. Mahrhardt	Softwaregestützte Routenzugplanung – „Best Practice“ anhand von Beispielen aus der Automobilindustrie	191
H. Wustmann, H. Ziemisch, H. Mahrhardt	Forschungsprojekt IntegRoute – Integrierte Planung von Routenzugsystemen	203

**Literatur**

- [1] FEM-Richtlinie 9.851: Leistungsnachweis für Regalbediengeräte – Spielzeiten, Juni 2003
- [2] VDI-Richtlinie 2692: Shuttle-Systeme für kleine Ladeeinheiten, März 2015
- [3] VDI-Richtlinie 4480, Blatt 4: Durchsatz von automatischen Lagern mit mehrfachteiler Lagerung, Juli 2002
- [4] Bruns, R., Günthner, W., Furmans, K.: Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik, 2012

## **Geometrieoptimierung von Shuttle-Systemen mit Hilfe eines analytischen Berechnungsmodells**

Dipl.-Ing. Michael Eder,  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Georg Kartnig,  
Institut für Konstruktionswissenschaften  
und Technische Logistik TU Wien

**Kurzfassung**

Shuttle-Systeme werden in Hochleistungshochregallagern verwendet. Jede Ebene in so einem Lager wird von einem Shuttle bedient. An der Stirnseite des Lagers befindet sich jeweils ein Lift für das Ein- bzw. Auslagern. Zwischen Liften und Shuttles befinden sich in jeder Ebene ein oder mehrere Pufferplätze. Zu diesem Thema wurde von uns bereits beim 24. VDI Materialflusskongress ein Modell für die Berechnung der Umschlagleistung vorgestellt. Dieses Modell wurde nun um die Möglichkeit einer geometrischen Optimierung hinsichtlich der Umschlagleistung bei gegeben Lagerplatzzahl erweitert. Dies kann nicht nur für einfachtier Lager erfolgen, sondern auch für mehrfachtiefe. Die Relevanz dieses Themas für Shuttle-Systeme liegt darin begründet, dass die Abmessungen (LxBxH) eines Shuttle-Systems Umschlagleistung und Raumnutzungsgrad entscheidend beeinflussen. Auf Basis dieses erweiterten Berechnungsmodells lassen sich nun auch die Kosten für Shuttle-Systeme abschätzen. So können Shuttle-Systeme geplant werden, die maximale Umschlagleistung bei minimalen Kosten aufweisen.

**1. Einleitung und Aufgabenstellung**

In der vorliegenden Arbeit wurde das nachfolgend beschriebene Shuttle-System hinsichtlich Umschlagleistung und optimaler Lagergeometrie untersucht. Die Berechnungen erfolgten analytisch und wurden mittels diskreter Simulation validiert. [2,3]  
Im Einzelnen wurden folgende Forschungsfragen behandelt werden:

- Ermittlung der Umschlagleistung bei mehrfachteiler Lagerung in Abhängigkeit vom Lagerfüllgrad

- Was ist – bei gegebener Lagerkapazität – die optimale Lagergeometrie hinsichtlich der Umschlagleistung in Abhängigkeit von der Lagertiefe?
- Welche Investitionssumme können diesen Lagergeometrien zugewiesen werden?

2. Beschreibung des untersuchten Shuttle-Systems

Das hier behandelte Shuttle-System ist eines mit Behälterflit. An der Stirnseite des Regals befinden sich die Liffe, jeweils ein Lift für das Einlagern und einer für das Auslagern. Jeder Lift und auch die Shuttle-Fahrzeuge besitzen je ein Lastaufnahmemittel. Die Liffe führen festsitzend aus, die Shuttles Doppelspiele bzw. falls erforderlich Einzelspiele. An der Überzugsoberfläche befinden sich die Shuttleflur und den Liften befindet sich in jeder Ebene je ein Pufferflur für das Einlagern und für das Auslagern. Bild 1 zeigt diesen Lageraufbau.

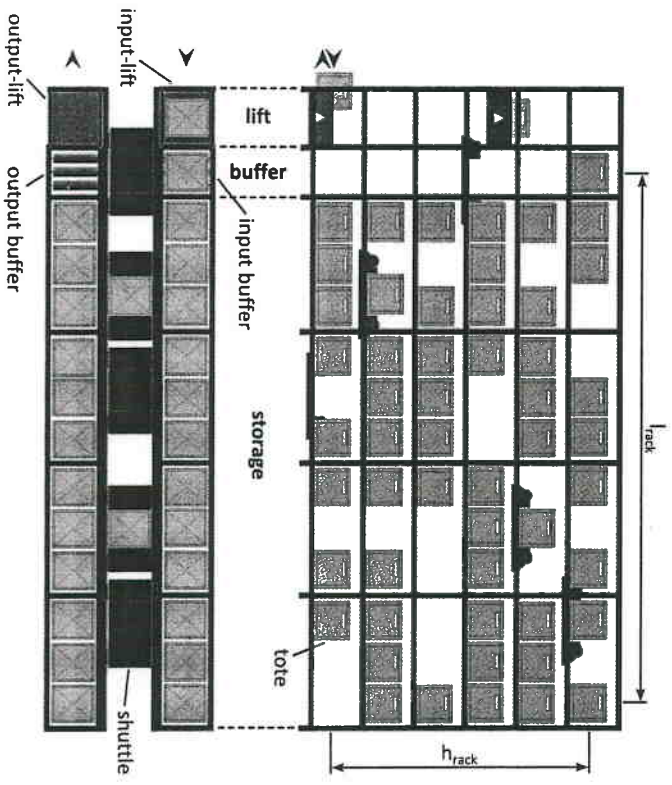


Bild 1: Aufbau des untersuchten Shuttle-System [4]

3. Analytische Berechnung der Umschlagleistung für Einfachtiefe Lagerung

Für die Ermittlung der Umschlagleistung wird der Einlagerprozess betrachtet. Nachdem der Einlagerprozess zwar in umgekehrter Richtung aber ansonsten gleich abläuft, gelten die Ergebnisse auch für diesen.

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich immer nur auf eine Ebene des betrachteten Shuttle-Systems. Eine solche Ebene kann hinsichtlich der Warteschlangentheorie als ein offenes Warteschlangenmodell mit beschränkter Kapazität betrachtet werden. Zur Vereinfachung der Berechnung wird ein offenes M|M|1/K-Modell verwendet. Sowohl die Ankunftsrate  $\lambda$  als auch die Bedienrate seien als exponentialverteilt angenommen.

Der Durchsatz  $\theta$  für ein solches Modell ergibt sich nach [1] zu:

$$\theta = \frac{1}{t_a} \cdot \frac{1 - \rho^K}{1 - \rho^{K+1}} \tag{1}$$

- $\theta$ ... Umschlagleistung einer Regalebene
  - $t_a$ ... Zwischenankunftszeit in der jeweiligen Regalebene
  - $\rho$ ... Auslastungsgrad einer Regalebene
  - $K$ ... Kapazität einer Regalebene
- Der Auslastungsgrad  $\rho$  einer Ebene errechnet sich als Quotient aus Ankunftsrate  $\lambda$  und Bedienrate  $\mu$  oder als Quotient aus Bedienzeit  $t_b$  und Zwischenankunftszeit  $t_a$ :

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{t_b}{t_a} \tag{2}$$

- $t_b$ ... Bedienzeit durch das Shuttle
- $\lambda$ ... Ankunftsrate in die Regalebene
- $\mu$ ... Bedienrate der Regalebene

Die mittlere Zwischenankunftszeit  $t_a$  lässt sich aus der Spielzeit der Liffe errechnen. Die Bedienzeit  $t_b$  ist gleichbedeutend mit der Spielzeit der Shuttles. Der Faktor  $K$  in Gleichung 1 beschreibt die Kapazität des betrachteten Systems und setzt sich aus der Anzahl der Pufferplätze und der Ladepplätze pro Shuttle zusammen. Im vorliegenden Fall gilt  $K=2$ .

Um die Umschlagleistung des gesamten Shuttle-Systems zu erhalten, muss die Umschlagleistung einer Ebene mit der Anzahl der Ebenen multipliziert werden.

$$g_{system} = g \cdot n_{Ebenen} \quad (3)$$

$g_{system}$ ... Umschlagleistung des gesamten Shuttle-Systems  
 $n_{Ebenen}$ ... Anzahl der Regalebenen

Die Richtigkeit dieses Berechnungsansatzes wurde bereits in [2] und [3] nachgewiesen. Den nachfolgenden Berechnungen liegen die Daten entsprechend Tabelle 1 zugrunde. Dabei sind die Totzeiten in den Be- und Entladezeiten enthalten.

Tabelle 1: Kinematischen Daten des Shuttle-Systems.

Lift:	Shuttle:
Geschwindigkeit $v_{Lift} = 5 \text{ m/s}$	Geschwindigkeit $v_{Shuttle} = 2 \text{ m/s}$
Beschleunigung $a_{Lift} = 7 \text{ m/s}^2$	Beschleunigung $a_{Shuttle} = 2 \text{ m/s}^2$
Beladezeit $t_{BeladenLift} = 1,4 \text{ s}$	Beladezeit $t_{BeladenShuttle} = 4,4 \text{ s}$
Entladezeit $t_{EntladenLift} = 1,4 \text{ s}$	Entladezeit $t_{EntladenShuttle} = 4,0 \text{ s}$

Bild 2 zeigt die Ergebnisse, die für das beschriebene Shuttle-System mit diesem Berechnungsansatz berechnet wurden. Man sieht ein ausgeprägtes Maximum bei Höhen zwischen 6 und 12 m.

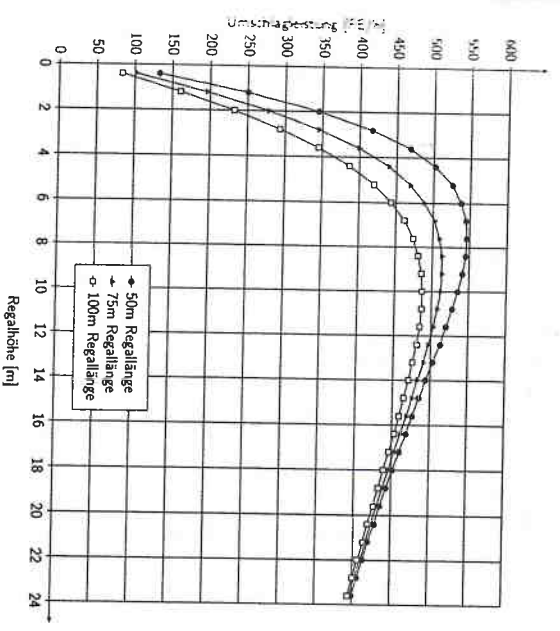


Bild 2: Umschlagleistung eines Shuttle-Systems über die Lagerhöhe

**4. Analytische Berechnung der Umschlagleistung für doppelt tiefe Lagerung**

Für mehrfachtiefe Regale kann im Wesentlichen derselbe Berechnungsansatz verwendet werden. Allerdings sind zusätzliche Umlagerzeiten – abhängig von Lagerfüllgrad und unterschiedlichen Be- und Entladezeiten je nach Position des Behälters im Regal – zu berücksichtigen (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Be- und Entladezeiten bei mehrfachtiefer Regalen.

Shuttle:
Beladezeit $t_{BeladenShuttle} = 4,4 - 9,0 \text{ s}$
Entladezeit $t_{EntladenShuttle} = 4,0 - 17,2 \text{ s}$

Im Allgemeinen kann die Berechnung der Shuttle-Spielzeit mit Doppelspiel in folgende Punkte gegliedert werden, die nacheinander abgearbeitet werden müssen:

- Erwartungswert für Be- und Entladezeiten der Shuttles ohne Umlagern
- Wahrscheinlichkeit, dass ein Umlagern erforderlich ist
- Erwartungswert des Weges, um den umgelagert werden muss
- Erwartungswert der Be- und Entladezeiten beim Umlagern

- Erwartungswert für die Fahrzeit beim Umlagern
- Erwartungswert der Zwischenumkehrzeit = die Bedienzeit für die Berechnung der Umschlagleistung

**Erwartungswert für Be- und Entladezeiten der Shuttles ohne Umlagern**

Im Folgenden ist mit Be- und Entladen immer das Be- und Entladen des Shuttles gemeint. Die Übergabezeiten sind abhängig von der Behälterposition innerhalb eines Lagerstands, (Tabelle 2)

Nachfolgende Gleichung beschreibt den Erwartungswert der Zeit für das Be- und Entladen des Shuttles bei doppeltierter Lagerung:

$$E(t_{Be-Entladezeit}) = t_{Beladen\_Puffer} + f \cdot t_{Entladen\_Regal-1} + (1-f) \cdot t_{Entladen\_Regal-2} + f \cdot t_{Beladen\_Regal\_voll} + (1-f) \cdot t_{Beladen\_Regal-1} + t_{Entladen\_Puffer} \tag{4}$$

- Beladen\_Puffer... Beladezeit aus dem Puffer
- Entladen\_Regal-1... Entladezeit in ein Regalfach, wo der erste Platz nicht belegt ist
- Entladen\_Regal-2... Entladezeit in ein Regalfach wo kein Platz belegt ist
- Beladen\_Regal\_voll... Beladezeit aus einem vollen Regalfach
- Beladen\_Regal-1... Beladezeit aus einem Regalfach wo der erste Platz nicht belegt ist
- Entladen\_Puffer... Entladezeit in dem Puffer
- f... Lagerfüllgrad

Der erste Term steht für das Beladen aus dem Puffer, der zweite steht für das Entladen in den vorderen Platz eines Lagerstands. Dieser Term beinhaltet die Wahrscheinlichkeit (f), dass der hintere Lagerstand belegt ist. Der dritte Term dieser Gleichung stellt die Zeit für das Entladen in die hintere Position des Lagerstands dar. Diese beinhaltet die Wahrscheinlichkeit (1-f), dass dieser frei ist. Der vierte Term steht für die Zeit für das Beladen aus einem vollen Regal. Dieser beinhaltet die Wahrscheinlichkeit (f), dass diese befüllt ist. Der fünfte Term steht für die Zeit des Beladens aus dem hinteren Platz eines Lagerstands. Dieser beinhaltet die Wahrscheinlichkeit (1-f), dass der erste Platz nicht belegt ist. Der letzte Term steht für die Zeit des Entladens in den Output-Puffer. Bei der gesamten Gleichung wird angenommen, dass beim Entladen in einen Lagerstand immer ein freier Platz vorhanden ist und dass beim Beladen aus einem Slot immer eine Fördereinheit vorhanden ist. In Bild 3 sind die einzelnen

Termine grafisch dargestellt. Die Zahl in den Fördereinheiten spiegelt den Term in der Gleichung wider.

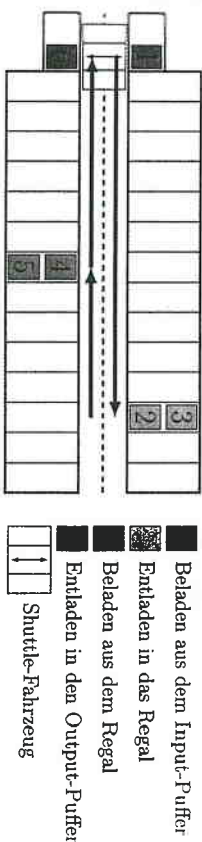


Bild 3: Draufsicht auf ein gefülltes Lager beim Be- und Entladen

**Wahrscheinlichkeit, dass ein Umlagern erforderlich ist:**

Nachfolgende Gleichung gibt bei doppelt tiefer Lagerung die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Umlagern erforderlich ist:

$$W_{Umlagern} = \frac{1}{2} f^2 \tag{5}$$

Sie beinhaltet die Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei Behälter in dem Lagerstand befinden (f). Diese wird noch mit der Wahrscheinlichkeit, dass der hintere Behälter genommen wird (1/2), multipliziert. In Tabelle 3 sind die Wahrscheinlichkeiten für die Anzahl an Fördereinheiten je Lagerstand aufgetragen sowie die Wahrscheinlichkeiten für die Anzahl der Umlagervorgänge. Diese Tabelle kann für höhere Lagerhöhen erweitert werden. Daraus kann die Gleichung für die Wahrscheinlichkeit der Umlagervorgänge, entsprechend Gleichung 5, abgeleitet werden.

Tabelle 3: Wahrscheinlichkeit für Umlagern bei zweifachtiefer Lagerung.

Anzahl $j$ der Förderereinheiten pro Lagerstot	Wahrscheinlichkeit, dass sich $j$ Behälter im Lagerstot befinden	Wahrscheinlichkeit, dass Umlagern nicht erforderlich ist	Wahrscheinlichkeit, dass Umlagern erforderlich ist
0	$(1-f)^2$	0	0
1	$2 \cdot f \cdot (1-f)$	1	0
2	$f^2$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$

Um die Zeit, die für das Umlagern benötigt wird, zu erhalten, muss noch die Fahrstrecke für das Umlagern errechnet werden.

#### Erwartungswert des Weges, um den umgelagert werden muss:

Zuerst werden hier die Wahrscheinlichkeiten für die Anzahl der Fächer, um die verfahren werden muss, berechnet und diese zum Schluss aufsummiert.

Im Bild 4 ist zu sehen, wie sich die einzelnen Gleichungen für den Umlagerweg ergeben. Kreuzschraffiert ist der Behälter dargestellt, der ausgelagert werden soll. Die vertikal schraffierte Förderereinheit steht ihm im Weg und muss umgelagert werden.

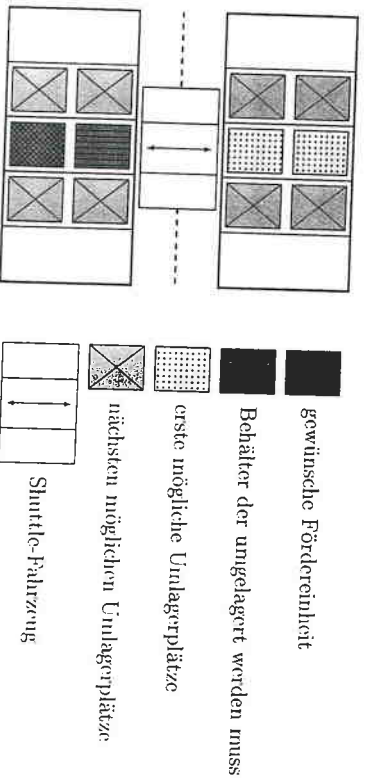


Bild 4: Draufsicht auf ein gefülltes Lager beim Umlagern

Die erste mögliche Umlagerposition ist der Lagerstot genau gegenüber dem Fach, aus dem der Behälter ausgelagert werden soll (gepunktet). Die Wahrscheinlichkeit, dass in diesen

Stot umgelagert werden kann, ergibt sich aus der Wahrscheinlichkeit, dass dieser nicht vollständig befüllt ist:

$$w(0) = 1 - f^2 \quad (6)$$

Da dieser Slot komplett befüllt sein, muss um eine Position weiter gefahren werden (ausgekreuzt). Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Fall eintritt lässt sich mit folgender Gleichung berechnen.

$$w(1) = f^2 \cdot [1 - (f^2)^4] \quad (7)$$

$w(1)$ , ..., Wahrscheinlichkeit, dass um eine Position verfahren werden muss

(Diese Gleichung enthält im ersten Term ( $f^2$ ) die Wahrscheinlichkeit, dass der gegenüberliegende Slot befüllt ist und im zweiten Term  $[1 - (f^2)^4]$  die Wahrscheinlichkeit, dass die vier angrenzenden Slots nicht komplett gefüllt sind.

Sind diese Slots ebenso befüllt, muss um zwei Fächer verfahren werden. Die Wahrscheinlichkeit dafür ergibt sich zu:

$$w(2) = (f^2)^4 \cdot f^2 \cdot [1 - (f^2)^4] \quad (8)$$

Diese Gleichung enthält wie schon die vorige die Wahrscheinlichkeit, dass der gegenüberliegende Lagerstot und die vier Nachbarfächer voll sind und die vier übernächsten Fächer nicht vollständig gefüllt sind.

Man erkennt aus diesen beiden obigen Gleichungen, dass sie bis auf den ersten Term gleich sind. Daraus lässt sich eine Summenformel für die mittlere Zahl an Fächern, um die verfahren werden muss, berechnen:

$$n_{\text{Umlagerpositionen}} = \sum_{n=1}^{20} n \cdot f^2 \cdot [1 - (f^2)^4] \cdot [(f^2)^4]^{n-1} \quad (9)$$

$n_{\text{Umlagerpositionen}}$ , ..., mittlere Anzahl an Positionen, um die umgelagert werden muss



Die Summenformel wurde auf 20 begrenzt, da es bei weiterer Erhöhung zu keiner signifikanten Änderung des Ergebnisses mehr kommt. Das heißt, es ist sehr unwahrscheinlich, dass um mehr als 20 Fächer verfahren werden muss.

**Erwartungswert der Be- und Entladezeiten beim Umlagern:**

Nachfolgende Gleichung für das Be- und Entladen beim Umlagern entspricht im Wesentlichen der Gleichung für das Be- und Entladen ohne Umlagern (Gleichung 4) nur ohne die Zeiten für das Be- und Entladen der Puffer.

$$E(t_{Be-Entladezeit\_Umlagern}) = f \cdot t_{Beladen\_Regal\_voll} + (1-f) \cdot t_{Beladen\_Regal-1} + f \cdot t_{Entladen\_Regal-1} + (1-f) \cdot t_{Entladen\_Regal-2} \tag{10}$$

$E(t_{Be-Entladezeit\_Umlagern})$ ... Erwartungswert der gesamten Be- und Entladezeit des Shuttle für ein Umlagernspiel

**Erwartungswert für die Fahrzeit beim Umlagern:**

Die Fahrzeit für das Umlagern ergibt sich aus der mittleren Wegzeit, der Zeit, die für das Beschleunigen benötigt wird und der Zeit für das Be- und Entladen beim Umlagern

$$E(t_{Umlagern}) = \frac{2 \cdot n_{Umlagerpositionen} \cdot \Delta x}{v_{Shuttle}} + 2 \frac{v_{Shuttle}}{a_{Shuttle}} + E(t_{Be-Entladezeit\_Umlagern}) \tag{11}$$

$E(t_{Umlagern})$ ... Erwartungswert der mittleren Zeit, die für ein Umlagernspiel benötigt wird  
 $\Delta x$  ... Teilung des Regals in horizontaler Richtung

$v_{Shuttle}$  ... Geschwindigkeit der Shuttle  
 $a_{Shuttle}$  ... Beschleunigung der Shuttle

**Erwartungswert der Zwischenankunftszeit = die Bedienzeit für die Berechnung der Umschlagleistung**

Die Shuttle-Spielzeit der Shuttle mit Doppelspiel und Umlagern ergibt sich nach [3] zu:

$$f \cdot (t_{Shuttle}) = 1 \frac{t_{Regal}}{v_{Shuttle}} + 3 \frac{v_{Shuttle}}{a_{Shuttle}} + E(t_{Be-Entladezeit}) + W_{Umlagern} \cdot E(t_{Umlagern}) \tag{12}$$

$f \cdot (t_{Shuttle})$ ... Erwartungswert der Spielzeit der Shuttle für ein Doppelspiel mit Umlagern  
 $W_{Umlagern}$ ... Länge des Regals

Das Ergebnis dieser Gleichung ist gleichzusetzen mit der Bedienzeit in der Berechnung der Umschlagleistung mit dem Warteschlangensystem M|M|1|K

$$t_b = E(t_{Shuttle}) \tag{13}$$

(Die weitere Berechnung der Umschlagleistung erfolgt nach [3].

In Bild 5 sind die Spielzeiten einer Ebene mit doppelttiefer Lagerung eingetragen. Hier ist zu sehen, dass die Differenz zwischen Simulation und analytischer Berechnung sehr gering ist. Der mittlere quadratische Fehler bei Füllgraden von 10 bis 90 Prozent beträgt gerade einmal 0,76 Prozent. Bei Füllgraden von 10 bis 98 Prozent verringert sich die Fehlerquote auf 0,74 Prozent.

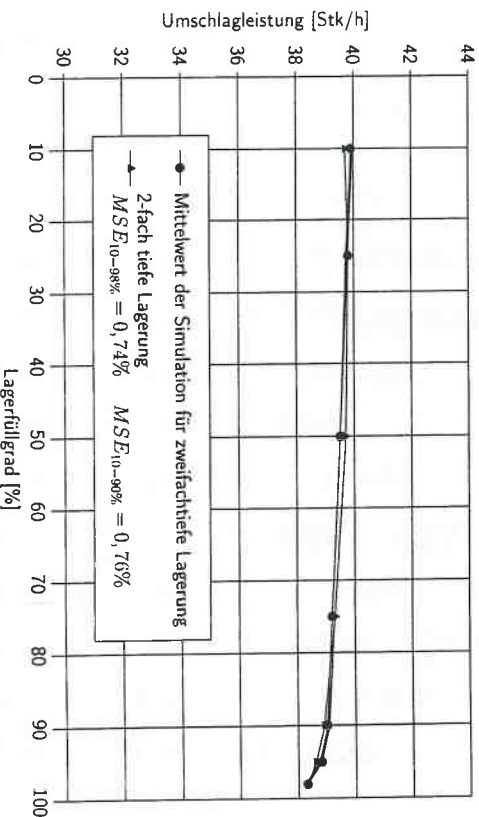


Bild 5: Spielzeit der Shuttle in einer Ebene über den Lagerfüllgrad