

# Ermittlung der Umschlagleistung von Hochregallagern unter Berücksichtigung lagerorganisatorischer Rahmenbedingungen

PROF. DR.-ING. K. NENDEL

DIPL.-ING. M. SCHUMANN

INSTITUT FÜR ALLGEMEINEN MASCHINENBAU UND KUNSTSTOFFTECHNIK, PROFESSUR FÖRDERTECHNIK, TU CHEMNITZ

## Zusammenfassung

**Umschlagleistung, Stellplatzzahl und Stellplatzkosten sind häufig für Lagersysteme die bedeutendsten Kenngrößen. Die Einflussfaktoren auf die Umschlagleistung lassen sich in technische und organisatorische Größen einteilen. Während für die technischen Parameter eine Reihe von Berechnungsvorschriften existieren, werden die organisatorischen Einflussgrößen meist nur qualitativ beschrieben oder durch Simulationsmodelle in speziellen Einzelfällen untersucht. Es soll hier eine Methode vorgestellt werden, die es ermöglicht, die Umschlagleistung unter Berücksichtigung ausgewählter organisatorischer Einflussgrößen durch Nutzung von Simulationsdatenbanken zu berechnen. Die allgemeingültigen Simulationsergebnisse können mittels eines Berechnungsprogramms auf jedes beliebige Hochregallager übertragen werden. Dafür sind neben MS Excel keine weiteren Softwareprodukte erforderlich.**

## Abstract

**Inventory turnover, storage space and storage costs are the most significant parameters of warehouse systems. Influencing factors on the turnover can be divided into technical and organisational parameters. While for technical parameters a number of guidelines and standards of calculation exist, organisational parameters are only specified in individual cases or analysed in simulation models. This article will introduce a method which allows the calculation of warehouse turnover in consideration of selected organisational conditions with the help of simulation databases. The generalised simulation output can be transferred to any high bay warehouse by using a calculation program. This calculation requires no other software than MS Excel.**

## 1. Einleitung

Die produktionswirtschaftlichen Anforderungen an die Unternehmen sind zunehmend geprägt durch Globalisierung und damit durch eine zunehmende Komplexität sowie vertiefte Arbeitsteiligkeit. Es entsteht eine zunehmend breitere Streuung der Fertigungsstandorte und Kooperationsbeziehungen. Es gibt letztlich mehr Lager- und Umschlagprozesse in der Lieferkette. Andererseits bringt der erhöhte Qualitäts- und Kostendruck steigende Fixkosten mit sich, er zwingt zur ständigen Rationalisierung der Materialwirtschaft. Es besteht der Zwang zum Einsatz neuer technisch-elektronischer Mittel zur Kontrolle und Steuerung der logistischen Ketten. Im Lager bedeutet das eine zunehmende Nutzung der Informations- und Kommunikationstechnik zur Lager- und Fertigungssteuerung, auch in Verbindung mit Forderungen der Rückverfolgbarkeit der Produkte.

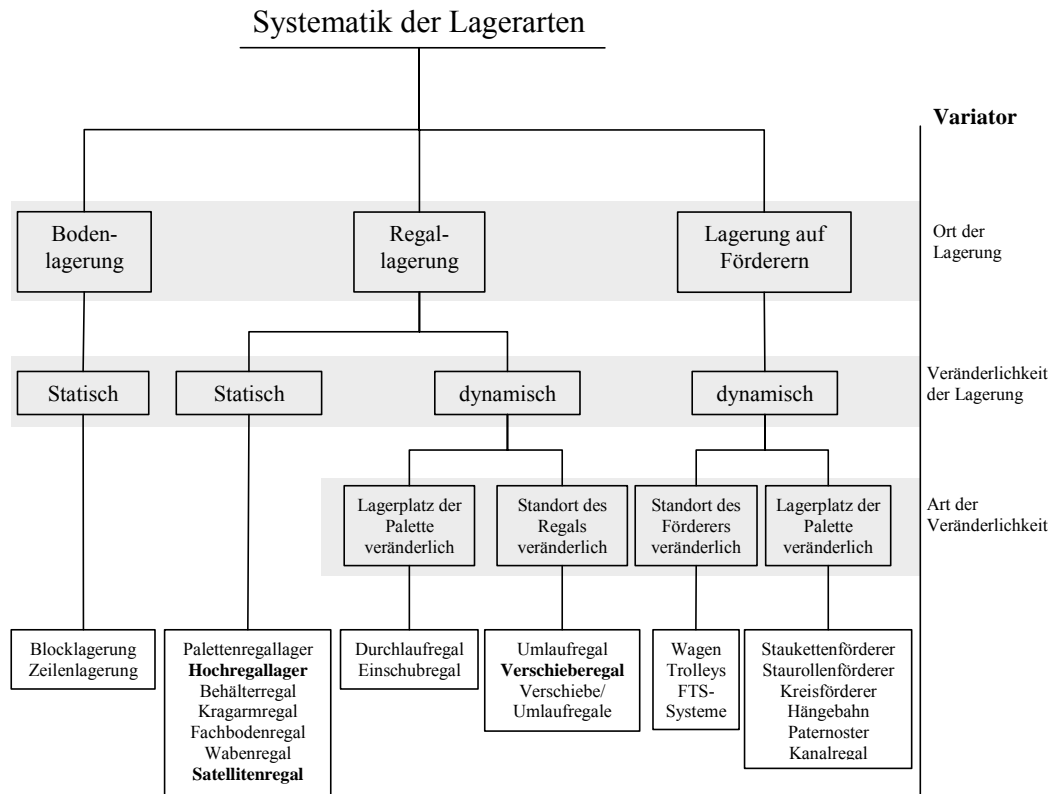
An die Logistikleistungen werden damit Anforderungen wie Schnelligkeit, Qualität und Kostenminimierung gestellt. Letztlich bestehen die Warenbereitstellungs- und Verteilsysteme aus der technischen Grundstruktur, dem Lagertyp und dessen Geometrie sowie der dabei einsetzbaren Bedientechnik und deren kinematischen Daten. Der organisatorische Rahmen dieser Systeme ist gekennzeichnet durch die Nutzung diverser Ein- und Auslagerstrategien, die auch wesentlich Kosten und Leistungen (Umschlagleistung) des zu betrachtenden Lagersystems bestimmen. Aufgrund der genannten Forderungen muss es gelingen, aus dem eingesetzten technischen System durch organisatorisch effizienten Betrieb maximale Leistung bei gleichzeitig minimal eingesetzten Kosten zu erzielen.

Neben den Investitionskosten sind bei der Planung von automatischen Lagersystemen die erreichbaren mittleren Spielzeiten der Bedientechnik von entscheidender Bedeutung, um die erforderliche Umschlagleistung des Lagers zu gewährleisten. Hierzu existieren eine Reihe von Berechnungsvorschriften und –normen. Diese Berechnungen berücksichtigen jedoch nicht die Auswirkungen der Lagerorganisation, wie beispielsweise fahrzeitminimale

Kombinationen von Ein- und Auslageraufträgen bei Doppelspielen, Zonierungsmaßnahmen, die Auswirkungen von verschiedenen Füllgraden des Lagers oder Lagerplatzstrategien.

## 2. Stand der Technik

### 2.1. Lagertypen



**Abbildung 1: Systematische Einteilung der Lagertypen**

In Abbildung 1 sind verschiedene Lagertypen dargestellt und nach Kriterien eingeteilt. Soll eine Einschränkung hinsichtlich am Markt häufig vorkommender automatischer Palettenlager getroffen werden, so sind besonders die in der Abbildung hervorgehobenen Typen zu nennen. Eine Auswahl der einzelnen Lagertypen erfolgt dann anhand von Kosten, Umschlagleistung und bei Kompaktlagern vorrangig anhand von Flächen- und Raumnutzungsgrad.

Werden die Kostenunterschiede bei Personal, Rechentechnik und Steuerungssoftware in den verschiedenen Lagertypen und -ausführungen der jeweiligen Typen vernachlässigt, unterscheiden sich die Gesamtkosten der Lager lediglich in der Bedientechnik sowie in den statisch bedingten Kosten der Regalkonstruktion. Die wichtigsten Kosteneinflüsse auf die Regale sind wiederum Bauhöhe und Bauart (Regalkonstruktion oder selbsttragendes Bauwerk).

Abbildung 2 zeigt die zu erwartenden Umschlagleistungen<sup>1)</sup> der verschiedenen Lagertypen in Abhängigkeit der benötigten Stellplatzanzahl. Die darauf folgende Abbildung 3 zeigt die zu erwartenden Investitionskosten<sup>1)</sup> je Stellplatz. Die berücksichtigten Kenngrößen sind nachstehend dargestellt.

Die abgebildeten Kurven machen deutlich, dass insbesondere Umschlagleistung der Lager und deren Flächen- bzw. Raumnutzungsgrad gegensätzlich verlaufen. Somit sind auch die Einsatzgebiete der Lagertypen voneinander abgrenzbar. Während Hochregallager für Anwendungsfälle mit hohem Gutumschlag in Frage kommen, werden die Kompaktlager eher in Objekten mit begrenztem Platz oder hohen Raumkosten (bspw. Kühlager) eingesetzt. Somit sind Kompaktlager auch häufig für die Umplanung bzw. der notwendigen Vergrößerung der Lagerkapazität innerhalb einer bestehenden baulichen Hülle interessant.

<sup>1)</sup> Die in den nachstehenden Abbildungen dargestellten Kosten und Fahrleistungen sowie die Bedienhöhen der Geräte und Regale wurden bei Hersteller- und Projektierungsfirmen im Zeitraum 2005/2006 abgefragt.

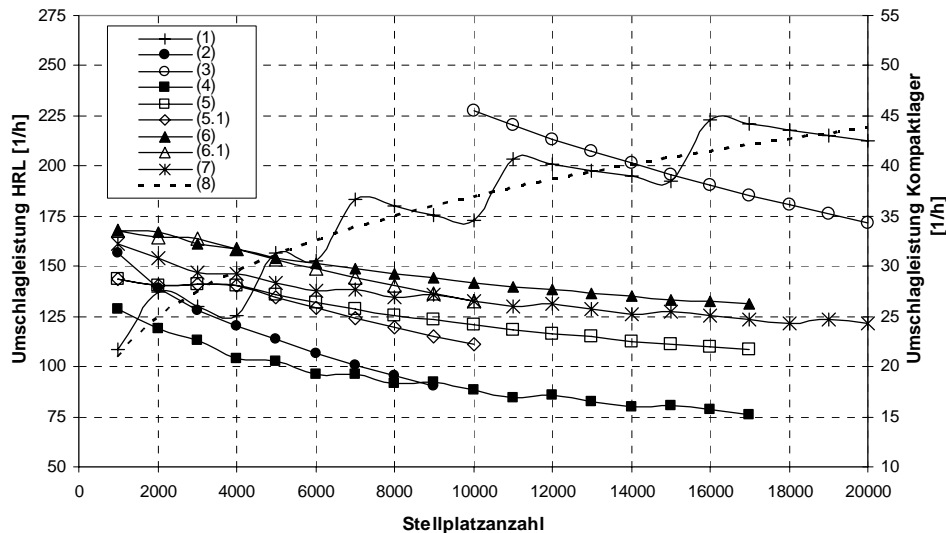


Abbildung 2: Umschlagleistungen der verschiedenen Lagertypen

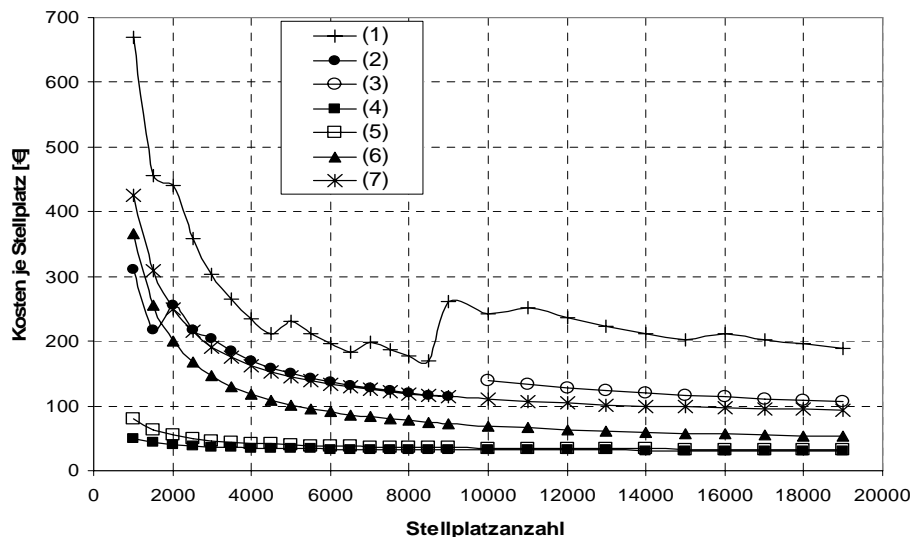


Abbildung 3: Investitionskosten der einzelnen Lagertypen

- (1) Hochregallager, es wurde in jeder Gasse ein Regalbediengerät installiert, Lagerplatzverteilung: maximale Gassenhöhe  $H_{\max} = 42$  m, Breite des Lagerblockes/ Gassentiefe =  $1/2$ ,  $v_x = 2$  m/s,  $v_y = 1$  m/s, Übergabezeit 20 s
- (2) Hochregallager mit einem Bediengerät,  $H_{\max} = 42$  m, keine Berücksichtigung des Verhältnisses von Breite des Lagerblockes/ Gassentiefe, alle Lagerplätze befinden sich in einer Gasse,  $v_x = 2$  m/s,  $v_y = 1$  m/s, Übergabezeit 20 s
- (3) Hochregallager mit zwei Bediengeräten, Aufteilung der Plätze analog (2) jedoch auf 2 Gassen  $v_x = 2$  m/s,  $v_y = 1$  m/s, Übergabezeit 20 s
- (4) Regallager mit 1 Stapler im Lager, Lagerplatzverteilung: maximale Gassenhöhe  $H_{\max} = 12$  m, Breite des Lagerblockes/ Gassentiefe =  $1/2$ ,  $v_x = 1$  m/s,  $v_y = 0,5$  m/s, Übergabezeit 25 s
- (5) Verschieberegallager, ein Regalbediengerät mit Umsetzer im Lager, Lagerplatzverteilung: maximale Gassenhöhe  $H_{\max} = 20$  m, Gassenhöhe/ Gassentiefe =  $1/2$ ,  $v_x = 1$  m/s,  $v_y = 0,5$  m/s, Verschiebedauer 60 s, Verschiebewahrscheinlichkeit 0,2, Übergabezeit 20 s
- (5.1) Verschieberegallager, analog (5) jedoch maximale Gassenhöhe  $H_{\max} = 10$  m
- (6) Satellitenlager, ein Regalbediengerät mit Satellitenwagen im Lager, max. 10 Paletten je Kanal, Lagerplatzverteilung: maximale Gassenhöhe  $H_{\max} = 20$  m, Gassenhöhe/ Gassentiefe =  $1/2$ ,  $v_x = 2$  m/s,  $v_y = 1$  m/s, Umlagerdauer 60 s, Umlagerwahrscheinlichkeit 0,2; Übergabezeit 20 s
- (6.1) Satellitenlager, analog (5) jedoch maximale Gassenhöhe  $H_{\max} = 10$  m
- (7) Hochregallager, ein Regalbediengerät mit Umsetzer im Lager, Lagerplatzverteilung: maximale Gassenhöhe  $H_{\max} = 20$  m, Breite des Lagerblockes/ Gassentiefe =  $1/2$ ,  $v_x = 2$  m/s,  $v_y = 1$  m/s, Umsatzdauer 60 s, Umsatzwahrscheinlichkeit 0,2, Übergabezeit 20 s
- (8) Ausgleichsgerade zu Kurve (1), potentiell

## 2.2. Einzel-/ Doppelspiele

Um anhand der Technik und der geometrischen Verhältnisse im Lager die höchstmögliche Umschlagleistung zu erzielen, ist es sinnvoll, Doppelspiele (DS) zu generieren. Somit ist nicht wie bei Einzelspielen (ES) je umgeschlagene Ladeeinheit eine Leerfahrt erforderlich, sondern nur je zweiter Ladeeinheit. Das Bediengerät fährt also vom Einlagerpunkt direkt zum Auslagerpunkt, ohne zum Übergabepunkt zurückkehren zu müssen. Diese Vorgehensweise setzt die Kenntnis der nächsten Fahraufträge und gegebenenfalls die Möglichkeit der Veränderung der Reihenfolge voraus. Für eine Optimierung der Umschlagleistung ist die bei DS entstehende Leerfahrt (Zwischenfahrstrecke) und damit die Zwischenfahrzeit zu minimieren (vgl. 3.5). Nachfolgend beschriebene Untersuchungen beziehen sich jeweils auf Doppelspiele.

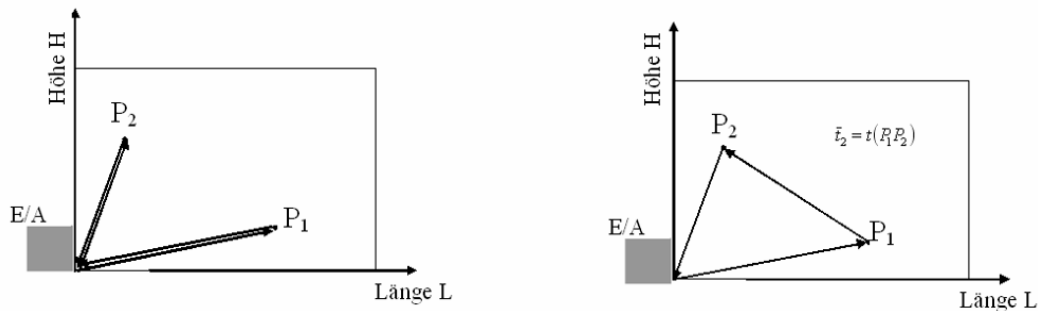


Abbildung 4: Darstellung der anzufahrenden Lagerplätze in der Regalwand, links: Einzelspiel, rechts: Doppelspiel

## 2.3. Berechnungsvorschriften für Umschlagleistungen von Lagern

Es existieren eine Reihe von Vorschriften zur Berechnung der Umschlagleistung von Lagern, exemplarisch sind drei Berechnungsvorschriften dargestellt. Die Richtlinie **VDI 3561** [VDI3561] ermöglicht die Berechnung der Spielzeit auch für Doppelspiele. Dazu werden zwei Referenzpunkte festgelegt, die den Aus- bzw. Einlagerpunkt darstellen. Ein Doppelspiel besteht dann aus der Summe folgender Einzelzeiten:

- der Hinfahrt vom Übergabepunkt zum Einlagerpunkt ( $P_1$ ),
- der Leerfahrt vom Ein- zum Auslagerpunkt ( $P_2$ ) und der
- Rückfahrt vom Auslagerpunkt zum Übergabepunkt (vgl. Abb.4 rechts).

Die Summe dieser Einzelzeiten wird danach mit der Summe der Übergabezeiten addiert. Der Unterschied der Richtlinie und der Berechnungsvorschrift nach [Gud00] bestehen im wesentlichen aus der Lage der Ein- und Auslagerpunkte.

### Fahrzeitberechnung nach VDI 3561

$$P_1 \left( \frac{2}{3} L; \frac{1}{6} H \right); P_2 \left( \frac{1}{6} L; \frac{2}{3} H \right) \quad t_2 = t(\overline{EP_1} + \overline{P_1P_2} + \overline{P_2A})$$

### Fahrzeitberechnung nach Gudehus <sup>1)</sup>

$$P_1 \left( \frac{2}{3} L; \frac{1}{5} H \right); P_2 \left( \frac{1}{5} L; \frac{2}{3} H \right) \quad \tau_{EA} = t_{xy} \left( \frac{2}{3} L; \frac{1}{5} H \right) + t_{xy} \left( \frac{1}{5} L; \frac{2}{3} H \right) + t_{xy} \left( \frac{14}{30} L; \frac{14}{30} H \right)$$

<sup>1)</sup>Annahme: Vernachlässigung von Totzeiten, Lastaufnahmefaktor = 1

Wird davon ausgegangen, dass in Abhängigkeit der Gassengeometrie immer nur eine der beiden Fahrzeitanteile (vertikal bzw. horizontal) spielzeitbestimmend ist, so ergeben sich beide Fahrstrecken zu 4/3 der jeweiligen Gesamtabmessung. Der Unterschied der beiden Berechnungsvorschriften liegt lediglich in der Aufteilung der Gesamtfahrstrecke auf die Teilfahrstrecken Hin-, Rück- bzw. Zwischenfahrt. Da jedoch die Fahrzeit zu den Anfahrpunkten in der Regel nicht von der gleichen Fahrzeitkomponente bestimmt wird, kommt es in der Praxis zu Unterschieden im Berechnungsergebnis.

Die unter dem Titel „Leistungsnachweis für Regalbediengeräte, Spielzeiten“ stehende Norm **FEM 9.851** [FEM9.851] beschäftigt sich ebenfalls mit der Berechnung von Spielzeiten von Regalbediengeräten (RBG). Dabei werden sechs verschiedene Anwendungsfälle generiert, die am häufigsten in der Praxis vorkommen. Diese unterscheiden sich insbesondere in der Lage der Übergabepunkte für die Ein- und Auslagerung. Dabei werden die Punkte sowohl horizontal als auch vertikal verschoben. Es werden hierbei auch Fälle betrachtet, in denen der Auslagerpunkt nicht mit dem Einlagerpunkt übereinstimmt, sich beispielsweise auch an dem gegenüberliegenden Gassenende befinden kann. Wird der einfachste Fall betrachtet, dass sich der

Übergabepunkt für die Ein- und Auslagerung übereinstimmend an einer unteren Ecke der Gasse befindet, stimmen die Berechnungsformeln mit [Gud00] weitgehend überein.

## 2.4. Kritik und Untersuchungsansatz

Die Berechnung der mittleren Spielzeit der einzelnen Lagergassen durch die beschriebenen Normen erfolgt in der Regel ohne die Berücksichtigung der Geschwindigkeitsdiagonalen, deren Steigung  $c$  durch nachstehendes Verhältnis gegeben ist.

$$c = \frac{v_x}{v_y}$$

Eine genaue Betrachtung der verschiedenen Gassengeometrien im Verhältnis zu den Geschwindigkeiten der Bediengeräte zeigt, dass es bei ungünstiger Lage der Geschwindigkeitsdiagonalen in der Regalwand zu Abweichungen der Berechnungsnormen von der tatsächlich zu erwartenden mittleren Spielzeit kommt.

Im praktischen Lagerbetrieb wird mit verschiedenen Maßnahmen der Lagerorganisation versucht, die Umschlagleistung zu erhöhen. Diese Maßnahmen können jedoch mit den hier beschriebenen Normen und Berechnungsmethoden nicht berücksichtigt werden. Da Zonierungen, Lagerplatzstrategien oder Reihenfolgeoptimierungen der Ein- und Auslageraufträge (Zuordnungsproblem) Einfluss auf die Umschlagleistung des Lagers haben, sollten sie auch bei der Berechnung berücksichtigt werden.

In den zahlreichen Veröffentlichungen mit dem Ziel der Erhöhung der Umschlagleistung eines Lagerbereiches finden sich häufig Darstellungen, die einzelne Auswirkungen der Lagerorganisation untersuchen. Dabei bleiben aber die gegenseitigen Beeinflussungen und Wechselwirkungen meist unberücksichtigt.

Um dennoch solche Einflussgrößen realitätsnah berücksichtigen zu können, werden üblicherweise Simulationsmodelle erstellt, die den jeweiligen Anwendungsfall nachbilden. Die Erstellung solcher Modelle benötigt jedoch neben der entsprechenden Software Zeit und verursacht damit weitere Kosten. Aus diesem Grund ist ein solches Vorgehen erst bei einem bestimmten Grad an Komplexität der Anlage sinnvoll. Damit ist die Übertragbarkeit solcher Modelle auf verschiedene Anwendungsfälle nicht immer gegeben.

## 3. Dynamische Spielzeitberechnung

### 3.1. Vorgehen und Abgrenzung zum Forschungsstand

Um die Auswirkungen der Lagerorganisation auf die Umschlagleistung sinnvoll abschätzen zu können, wurde ein allgemeingültiges Simulationsmodell erstellt. Dieses Modell startet sich nach vorgeschriebener Simulationszeit selbstständig neu mit vordefinierten Änderungen der Eingangsgrößen wie z. B. Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Bedientechnik in Abhängigkeit der Gassengeometrie. Nacheinander konnten somit ausgewählte, in das Modell implementierte Lagerorganisationsformen untersucht werden. Der Unterschied zu bisherigen in der Literatur dokumentierter Untersuchungen besteht in der Berücksichtigung gegenseitiger Wechselwirkungen der Lagerorganisation. Bisher wurden dagegen die verschiedenen Strategien und Regeln im Lagerbetrieb meist nur losgelöst voneinander unter einem speziellen abgegrenzten Blickwinkel betrachtet.

Um die Menge an Simulationsergebnissen für einen praktischen Einsatz zur Verfügung zu stellen, wurde ein Programm auf Basis von MS Excel erstellt, das die relevanten Simulationsdaten aufarbeitet und dem Anwender einfach und übersichtlich zur Verfügung stellt. Es ist somit möglich, die gefundenen Simulationsergebnisse auf verschiedenste Hochregal-Lagersysteme zu übertragen. Das Berechnungsmodell wurde an einem existierenden Hochregallager getestet. Es können Aussagen hinsichtlich der optimalen, d. h. spielzeit- und kostenminimalen Lagergeometrie unter Berücksichtigung gegebener Randbedingungen getroffen werden.

### 3.2. Übergabepunkte

Neben den verschiedenen untersuchten Lagerstrategien wurde zunächst nach Möglichkeiten gesucht, die Umschlagleistungen des Typs der herkömmlichen Hochregallager unter technischen Gesichtspunkten zu verbessern. Dabei wurde v. a. die Verlegung des Übergabepunktes in die Mitte der Gassenwand untersucht. Dies hat das Ziel, die mittleren Verfahrswege der Bedientechnik im Lager zu halbieren.

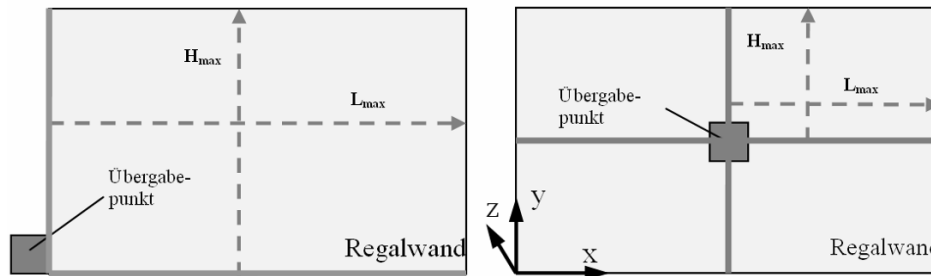


Abbildung 5: Maximale Verfahrswege der Bedientechnik in der Regalgasse

Die Ver- und Entsorgung des Materials an den Übergabepunkten mit Lagergut kann hierbei durch zwei verschiedene Möglichkeiten gelöst werden:

- Zuführung in x- oder y-Richtung,
- Zuführung in z-Richtung.

Ersteres Vorgehen führt in Abhängigkeit der Anzahl der Zu- und Abführkanäle zu einem großen Verlust an Lagerplätzen. Bei letzterem Vorgehen liegen die Versorgungskanäle senkrecht zu den Verfahrswegen der Bedientechnik. Das hat den Vorteil, dass die Versorgung der Übergabepunkte über die gleichen Ver- und Entsorgungskanäle erfolgt und somit erheblich weniger Lagerplatz benötigt wird. Dieses Vorgehen benötigt jedoch neben erhöhtem Steuerungsaufwand eine veränderte konstruktive Gestaltung der Gassenübergänge z. B. durch klappbare Brücken oder ein entsprechendes aus- und einfahrbares Gabelsystem. Da sich hierbei die RBG und das Lagergut behindern können, wurden Simulationsuntersuchungen zur Minimierung der Wartezeiten der RBG durchgeführt.

Je mehr Kanäle für die Ein- und Auslagerung zur Verfügung stehen, umso kürzer sind die Wartezeiten der Bediengeräte. Dabei bieten sich insbesondere zwei Optimierungsstrategien an, die diese Wartezeiten minimieren können. Einerseits verursachen gassenreine Kanäle keine zusätzlichen Wartezeiten der RBG, da die benötigte Palette im jeweiligen Einlagerungskanal zur Verfügung steht. Zudem reduzieren sich die Einlagerungskanäle, je weiter die Mitte des Lagerblocks erreicht wird. Andererseits steigen die Wartezeiten der RBG schnell an, je ungünstiger das Verhältnis von Gassenanzahl zu Einlagerungskanälen wird. Dies gilt auch bei sinnvoller Begrenzung der Gassenanzahl pro Einlagerungskanal.

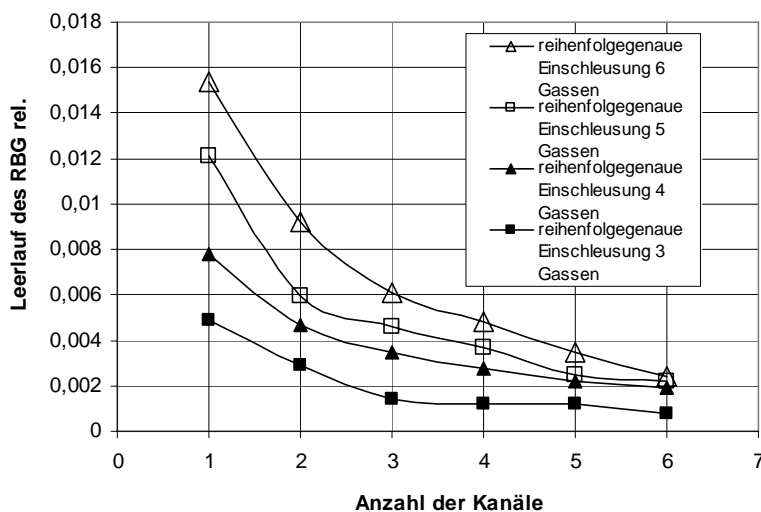


Abbildung 6: Reihenfolgeoptimale Einschleusung der Einlagerpaletten, keine Beschränkung der Gassen pro Kanal

Ist die Zahl der Gassen des Lagerblockes größer als die Zahl der Einschleuskanäle, so ist eine optimale Reihenfolge der Paletten umzusetzen, bei der die Paletten gleichmäßig auf alle Kanäle verteilt werden. Abbildung 6 zeigt die so erreichten mittleren Wartezeiten der RBG. Hier ist der Abstand zwischen zwei Paletten, die in den gleichen Gang eingelagert werden müssen, am größten. Dies führt zu minimalen Stillstandszeiten der RBG. Für die Ausschleusung der Paletten aus dem Lagerblock ist jedoch ein Kanal ausreichend.

Eine technische Realisierbarkeit (auch hinsichtlich der Funktionssicherheit der Gassenbrücken) ist zu prüfen. Eine wirtschaftliche Umsetzung einer solchen Beschickung der RBG, so hat der Versuch gezeigt, macht Sinn. Es kann hierbei bei günstiger Lage der Übergabepunkte in der Regalwand nahezu 50 % der Fahrzeit eingespart werden. Bei vergleichsweise langen und hohen Gassen kann damit die mittlere Spielzeit teilweise um über 25 % gesenkt werden.

### 3.3. Lagerplatzstrategien

Es wurden insbesondere zwei verschiedene Strategien untersucht. Einerseits wurde zur besseren Vergleichbarkeit die chaotische Lagerplatzauswahl (nachfolgend: Strategie „*Chaotisch*“) sowie die in der Literatur auch als „*Kürzeste Fahrzeitregel (KFZ)*“ bezeichnete Strategie [Gla05]. Letztere soll nachfolgend aufgrund der Auswahl des jeweils vordersten Lagerplatzes als Strategie „*KFZ*“ bezeichnet werden.

In Abbildung 7 sind die bei zunehmender Gassengeometrie sich in Abhängigkeit der Strategien vergrößernden Fahrzeitunterschiede dargestellt. Damit ist bei höheren bzw. längeren Gassen die Strategie „*KFZ*“ empfehlenswert.

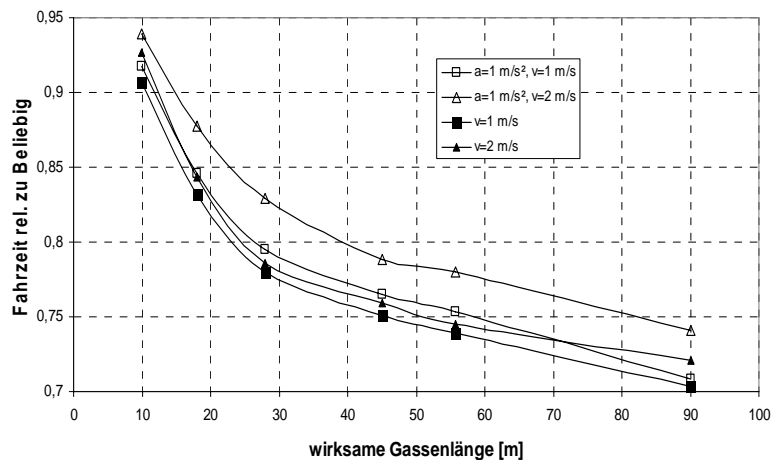


Abbildung 7: Vergleich der Strategien „*Chaotisch*“ und „*KFZ*“ bei unzonierter Lagergasse

In ist weiterhin zu erkennen, dass der Einfluss der Beschleunigung bei längeren Fahrstrecken abnimmt. Insbesondere bei kleinen Gassenabmessungen kann der Beschleunigungseinfluss nicht vernachlässigt werden. So sind in Abbildung 8 Gassenabmessungen angegeben, von wo ab die Beschleunigung der Bedientechnik der jeweiligen Richtungskomponente vernachlässigbar ist. Die Grenze des Beschleunigungseinflusses wurde mit 5 % der Gesamtfahrzeit willkürlich festgelegt. Es ist zu erkennen, dass der Beschleunigungseinfluss mit höherer Geschwindigkeit zunimmt, da das RBG eine längere Zeit und damit auch eine längere Fahrstrecke benötigt, um die Maximalgeschwindigkeit zu erreichen.

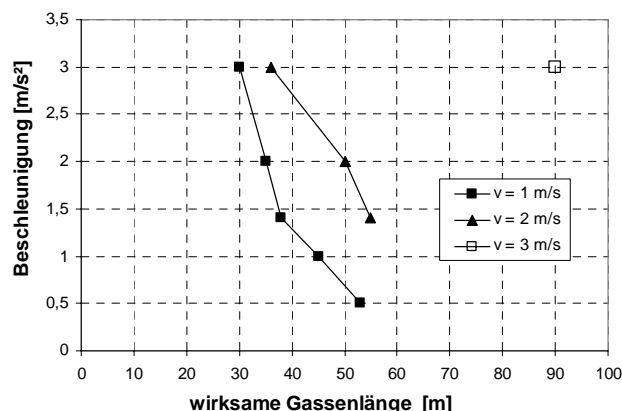


Abbildung 8: Vernachlässigungsgrenzen der Beschleunigung

Anhand des Diagramms ist weiterhin zu erkennen, dass die Beschleunigungen bei in der Praxis geläufigen Gassenlängen nicht zu vernachlässigen sind. Ein zur Validierung der Simulation genutztes Lager (ca. 80 x 40m,  $v_x \approx 1,8$  m/s,  $v_y \approx 0,8$  m/s) liegt hinsichtlich der Gassenlänge über der festgelegten Grenze, hinsichtlich seiner Höhe jedoch darunter. Somit sind auch hier die Beschleunigungen nicht zu vernachlässigen.

### 3.4. Zonierung

Die häufigste und bekannteste Form der Zonierung in der Lagergasse ist die ABC-Zonierung. Diese geht davon aus, dass durch eine Platzierung der umsatzstarken Paletten (Schneldreher) in der Nähe des Übergabeplatzes die mittleren Fahrstrecken der Bedientechnik vermindert werden.

Abbildung 9 zeigt das Verhältnis der mittleren Anfahrpunkte in Abhängigkeit der Zonierungsart. Die Zahlenkombination (80/20) kennzeichnet bspw. 80 % des Gesamtumsatzes zu dem ihn verursachenden 20 % Mengenanteil der gesamten eingelagerten Palettenzahl [Pfo96].

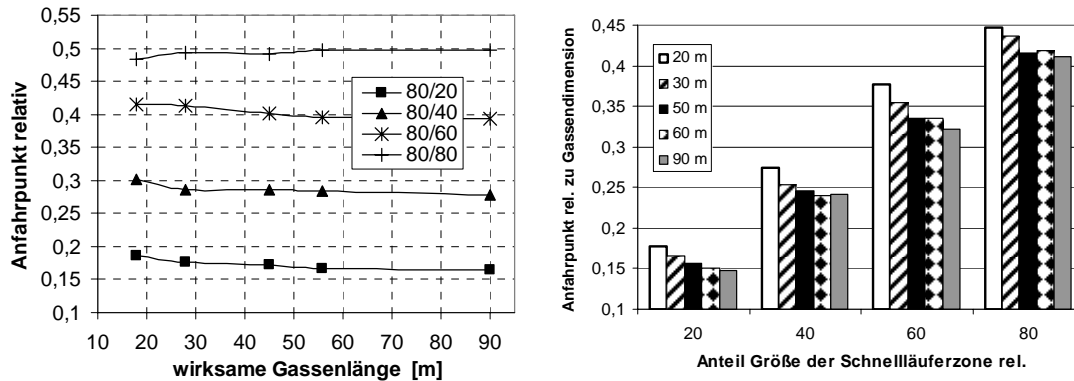


Abbildung 9: Mittlere Anfahrpunkte relativ zu den Gesamtabmessungen, chaotische Lagerplatzvergabe

Abbildung 10 stellt den Einfluss des Zusammenwirkens von Lagerplatzstrategien und der Zonierung dar. Dabei ist zu erkennen, dass sich bei ungünstiger Sortenverteilung von 80/80 (Umsatz-/ Mengenanteil) das Verhältnis der mittleren Fahrzeit gegenüber der unzonierten Gasse bei größeren Abmessungen erhöht. Bei günstigem Zonierungsfall (80/20) ist dieser Zusammenhang nicht zu beobachten. Hier bringt eine Zonierung Vorteile. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Vorteile einer Zonierung bei gleichzeitig verbesserter Lagerplatzstrategie geringer sind.

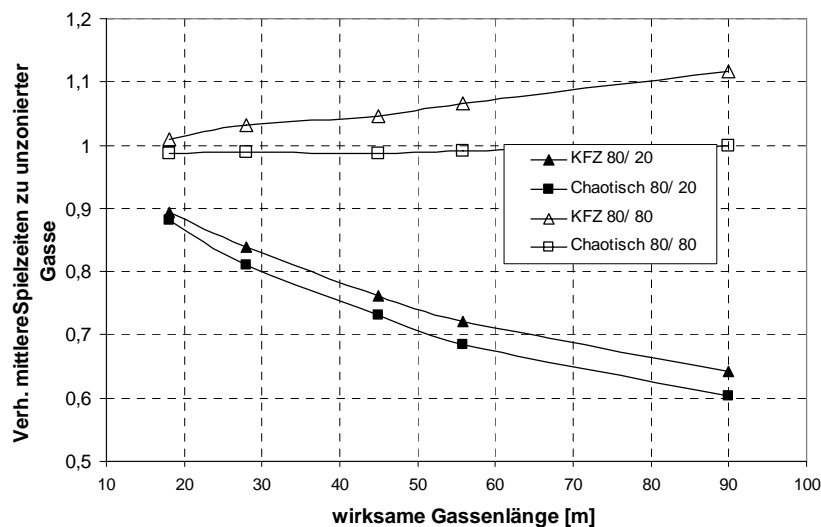


Abbildung 10: Zonierungsabhängige Auswirkungen der Lagerplatzstrategien auf die Fahrzeiten



### 3.5. Optimierung der Auftragsreihenfolge

Die beschriebenen Lagerplatzvergabestrategien und Zonierungen haben das Ziel, durch Verminderung der Anfahr- und Rückwege der Bedientechnik die Fahrstrecken und damit die Fahr- und Spielzeiten zu verringern. Eine Optimierung der Reihenfolge bzw. der Zuordnung der Ein- und Auslageraufträge bei der Bildung von Doppelspielen soll dagegen die Strecken der Leerfahrten zwischen den kombinierten Lagerplätzen verringern. Auch hier konnten Auswirkungen bspw. der Zonierung nachgewiesen werden.

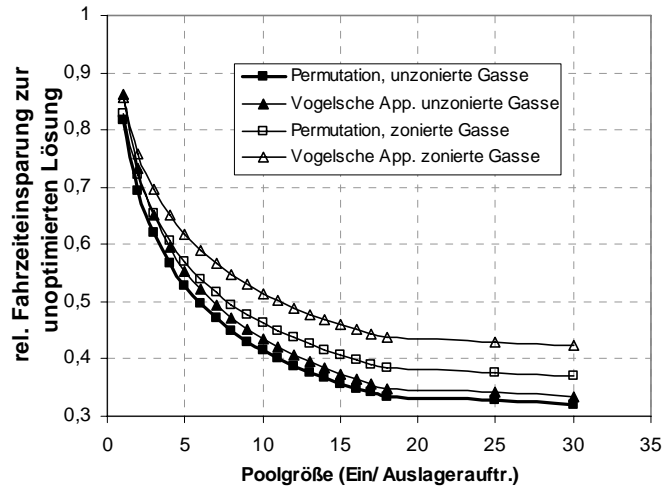


Abbildung 11: Optimierung der Zwischenfahrzeit, Fahrzeit im Vergleich zu unoptimierter Fahrzeit

Abbildung 11 zeigt die optimierten Zwischenfahrzeiten im Vergleich zu unoptimierten Zwischenfahrzeiten. Da eine Testung aller Möglichkeiten (Permutation) zu unzumutbarem Rechenaufwand führt, konnten hier nur Kombinationen von maximal  $8 \times 8$  Aufträgen durchgeführt werden. Um dennoch auch größere Auftragspools berechnen zu können, wurde auf das Vogelsche Approximationsverfahren zurückgegriffen. Die dargestellten Kurvenverläufe stellen eine idealisierte Kennlinie der gefundenen Ergebnisse dar. Um in der Praxis eine solche Optimierung durchführen zu können, müssen die jeweils folgenden Aufträge bekannt sein.

### 3.6. Füllgrad

Abbildung 12 zeigt Untersuchungen zum Füllgrad des Lagers. Minderungen der Umschlagleistungen waren ab einem Füllgrad von ca. 80% zu erkennen. Es konnten zwei Knickpunkte der Kurve der Umschlagleistung beobachtet werden. Der Punkt P1 stellt die Länge dar, unter der eine Verringerung der Leistung des Lagers eintritt. Der Punkt P2 beschreibt die Länge, unter der das Absinken der Umschlagleistung des Lagers verstärkt wird.

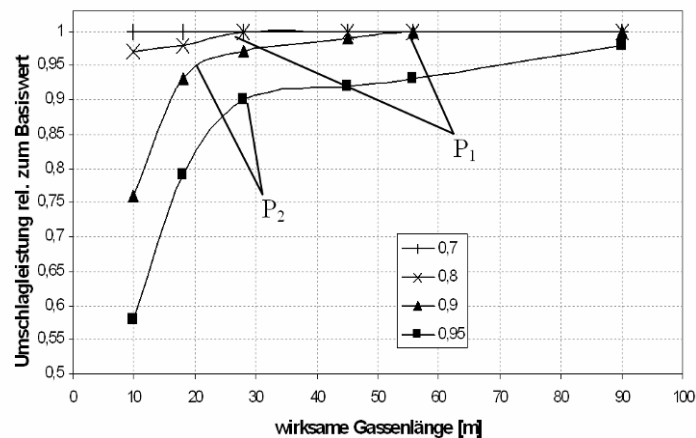


Abbildung 12: Auswirkungen des Füllgrades des Lagers auf die Umschlagleistung

### 3.7. Berechnungsprogramm

Um die Simulationsergebnisse auf beliebige Anwendungsfälle übertragen zu können, wurde ein Berechnungsprogramm erstellt. Durch Berechnung der wirksamen Gassenlänge werden die simulierten Fahrzeiten durch Interpolation auf die Daten des Anwendungsfalls übertragen. Es fließen insbesondere auch die untersuchten Auswirkungen der Lagerorganisation in die Berechnungen ein. Zur besseren Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse sowie zur Definition der durch die Lagerorganisation erreichten Leistungserhöhung, wurden die Ergebnisse den Berechnungsnormen gegenübergestellt. Als weiteres Ergebnis des Programms können die Kosten des Lagers abgeschätzt werden. Dabei werden die Kosten für das Lager insgesamt, als auch die je Lagerplatz berechnet.

Zunächst müssen bei zu projektierenden Lagern die Abmessungen, die Anzahl der Lagergassen und die technischen Daten der Bedientechnik festgelegt werden. Die Geometrie der Lagergasse bestimmt sich in diesem Stadium durch die Anzahl der benötigten Stellplätze und der räumlichen Restriktionen. Dabei werden unter Berücksichtigung der eingegebenen Grenzabmessungen für Breite, Tiefe und Höhe die Anzahl der Regalgassen berechnet. Hierzu werden durch den Einsatz von teuren RBG lange und hohe Gassen bevorzugt. Die Gassen werden so gestaltet, dass sowohl die Gassengeometrie optimal ist, als auch die maximale Bedienhöhe der Geräte erreicht wird. Um die geforderte Lagerplatzanzahl zu erlangen, werden Vielfache der so dimensionierten Regalgasse gebildet, bis die benötigte Stellplatzanzahl erstmals überschritten ist. Grenzen der Abmessungen können bspw. durch die einzusetzende Bedientechnik oder bereits bestehende Lagerhülle gegeben sein.

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der Untersuchungen wurde eine Möglichkeit aufgezeigt, die es dem Anwender ermöglicht, ohne zusätzliche Hilfsmittel und spezielle Kenntnis von Simulationsprogrammen die Umschlagleistung eines Lagers zu berechnen. Er greift durch die Nutzung eines Berechnungsprogramms, das in MS Excel- VBA (Visual Basic for Applications) erstellt wurde auf eine Simulationsdatenbank zu. Diese Simulationsdatenbank berücksichtigt wesentliche organisatorische und technische Daten eines Lagersystems. Der Bediener kann somit die Umschlagleistung für seinen Planungsfall unter Berücksichtigung der Lagerorganisation sowie deren Wechselwirkungen berechnen.

Um das Einsatzgebiet der Methode zu erweitern und allgemeiner zu gestalten sind weitere Vervollständigungen der Maßnahmenbibliothek sinnvoll. Zum Anderen ist es möglich, die Simulationsdatenbank um andere Lagertypen sowie mehrfachtiefe Einlagerungen zu erweitern.

## Literatur

- [FEM9.851] Fédération Européenne de la Manutention (FEM) 9.851 „Leistungsnachweis für RBG-Spielzeiten“.
- [Gla05] Glass, Marquardt: „Dynamische Optimierung des Lagerdurchsatzes durch Beeinflussung der Artikelverteilung“, Forschungsbericht FE179, TU-Dresden, Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik, 2005.
- [Gud00] Gudehus, T.: „Logistik2; Netzwerke, Systeme und Lieferketten“, Springer VDI, 2000.
- [Pfo96] Pfohl, H. Cr.: „Logistiksysteme, Betriebswirtschaftliche Grundlagen“, Springer, 1996, 5. Auflage.
- [VDI3561] VDI Richtlinie 3561 „Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen“, 1973.