



Karl Dörner • Michael Reeh  
Christine Strauss • Gerhard Wäscher

**Evaluation von Artikelanordnungsmustern  
in der Mann-zur-Ware-Kommissionierung**

Working Paper Nr. 3/2004

***F E M M***

*Faculty of Economics and Management  
Magdeburg*

***Working Paper Series***



Karl Dörner<sup>1</sup> • Michael Reeh<sup>2</sup> • Christine Strauss<sup>1</sup> • Gerhard Wäscher<sup>1</sup>

**Karl Dörner • Michael Reeh  
Christine Strauss • Gerhard Wäscher**

März 2004

Wirtschaftsuniversität Wien

Wirtschaftsinformatik

# Evaluation von Artikelanordnungsmustern in der Mann-zur-Ware-Kommissionierung

Obst- und Gemüse-Department Magdeburg

Technische Universität Braunschweig

Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik

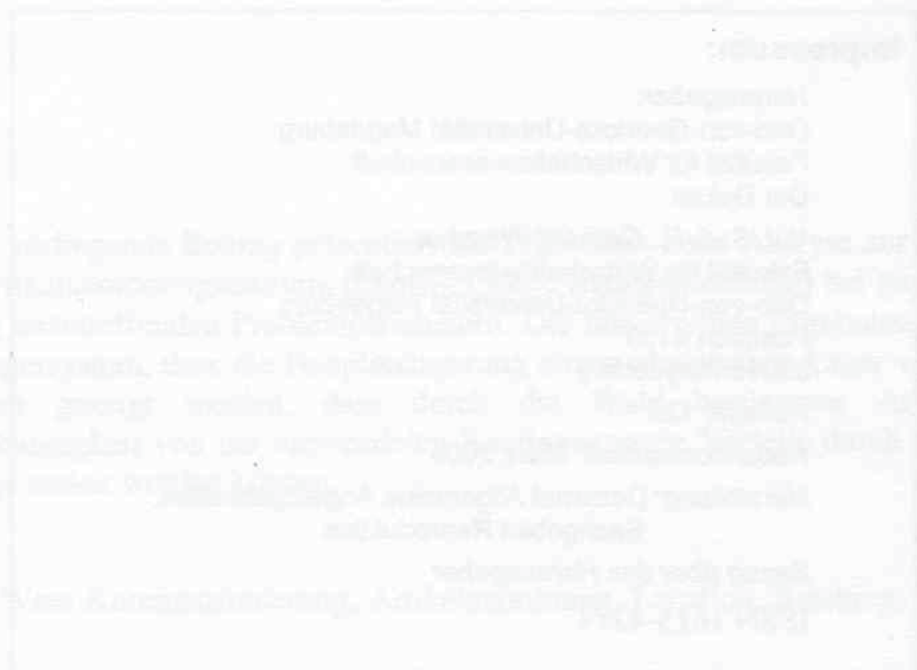
Management / Logistik

Postfach 4100

D-38104 Magdeburg

(mailto:gerhard.waecher@wz-wiwi.uni-magdeburg.de)

März 2004



Working Paper No. 3/2004

### **Impressum:**

*Herausgeber:*

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Fakultät für Wirtschaftswissenschaft  
Der Dekan

*V. i. S. d. P.:* Gerhard Wäscher

Fakultät für Wirtschaftswissenschaft  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Postfach 4120  
39016 Magdeburg

*Auflage:* 120

*Redaktionsschluß:* März 2004

*Herstellung:* Dezernat Allgemeine Angelegenheiten,  
Sachgebiet Reproduktion

*Bezug über den Herausgeber*

ISSN 1615-4274

**Karl Dörner<sup>1</sup> · Michael Reeh<sup>1</sup> · Christine Strauss<sup>1</sup> · Gerhard Wäscher<sup>2</sup>**

## **Evaluation von Artikelanordnungsmustern in der Mann-zur-Ware-Kommissionierung**

März 2004

<sup>1</sup> Universität Wien  
Institut für Betriebswirtschaftslehre  
Produktion und Logistik  
Brünner Straße 72  
A – 1210 Wien,  
{karl.doerner|christine.strauss@univie.ac.at} {Michael.Reeh@gmx.net}

<sup>2</sup> Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Fakultät für Wirtschaftswissenschaft  
Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre  
- Management Science -  
Postfach 4120  
D – 39106 Magdeburg  
{gerhard.waescher@ww.uni-magdeburg.de}

**Zusammenfassung:** Der vorliegende Beitrag präsentiert die Ergebnisse einer Analyse zur Auswahl eines geeigneten Artikelanordnungsmusters (Längs-, Quer-, Radialanordnung) bei gegebenen, in der Praxis häufig anzutreffenden Problemparametern. Die numerischen Ergebnisse zeigen für ein gegebenes Lagersystem, dass die Festplatzlagerung einem chaotischen Lager vorzuziehen ist. Ferner kann gezeigt werden, dass durch die Wahl bestimmter Artikelanordnungsmuster in Abhängigkeit von der verwendeten Routingstrategie Vorteile durch reduzierte Kommissionierwege erzielt werden können.

**Schlagworte:** Mann-zur-Ware-Kommissionierung, Artikelanordnung, Location, Batching, Routing

## Inhalt

1	Einführung.....	1
2	Problemstellung und Lösungsverfahren.....	1
2.1	Grundstruktur von Mann-zur-Ware-Kommissioniersystemen.....	1
2.2	Operative Entscheidungsfelder in der Kommissionierung und ihre Lösungsansätze.....	2
2.2.1	Artikelanordnung (Storage Location) .....	2
2.2.2	Auftragsbildung (Batching).....	3
2.2.3	Tourenplanung (Routing) .....	4
3	Numerische Experimente – Zielsetzung und Testdesign .....	6
4	Ergebnisse.....	7
4.1	Artikelanordnung bei Routingverfahren „Largest Gap“ .....	7
4.2	Artikelanordnung bei Routingverfahren „S-Shape“ .....	8
5	Schlussfolgerungen und Resümee .....	9

## 1 Einführung

Das Kommissionieren ist eine Lagerhausfunktion, welche die Entnahme von gelagerten Artikeln und ihr Zusammenführen gemäß vorgegebener Kundenaufträge zum Gegenstand hat. Bei einem Mann-zur-Ware-Kommissioniersystem sind die Artikel typischerweise in parallelen Gängen angeordnet und das Kommissionierpersonal entnimmt die durch Kommissionieraufträge vorgegebenen Waren auf einem Rundweg an den jeweiligen Stellplätzen. Grundsätzlich lassen sich drei operative Entscheidungsfelder mit starken Interdependenzen identifizieren: (1) Artikelanordnung in Abhängigkeit von Artikelzugriffshäufigkeiten und Artikelvolumen (Storage Location), (2) Zusammenfassung mehrerer Kundenaufträge zu Kommissionieraufträge (Batching) und (3) Bestimmung eines Wegs, den der Kommissionierer durch das Lager nimmt, um die Artikel entsprechend des Kommissionierauftrags zu entnehmen (Routing) [1,13].

Dieser Beitrag evaluiert unter Berücksichtigung sämtlicher Entscheidungsfelder die Eignung unterschiedlicher Artikelanordnungsmuster (Längs-, Quer-, Radialanordnung) bei verschiedenen ausgeprägten Artikelzugriffshäufigkeiten, variiert Gassenanzahl und verschiedenen Routingverfahren („Largest Gap“ und „S-Shape“). Als weitere Einflussgrößen werden das Fassungsvermögen des Kommissioniergeräts, der Auslastungsgrad des Lagers und die Größe der Kundenaufträge berücksichtigt. Ferner wird als Auftragsbildungsverfahren ein savingsbasiertes Batchingverfahren angewendet.

Nach einer Beschreibung der Grundstruktur von Mann-zur-Ware-Kommissioniersystemen werden in Kapitel 2 die in der Evaluation verwendeten Verfahren jeweils für die drei operativen Entscheidungsfelder erläutert, der Artikelanordnung, der Auftragsbildung und der Tourenplanung. Kapitel 3 beschreibt den Aufbau der numerischen Experimente, deren Zielsetzungen und das Testdesign. Kapitel 4 beinhaltet die Ergebnisse und ihre Interpretation für die hier behandelten Routingverfahren „S-Shape“ und „Largest Gap“, sowie die Formulierung grober Entscheidungsregeln, die unter vergleichbaren Voraussetzungen als Entscheidungsunterstützung herangezogen werden können.

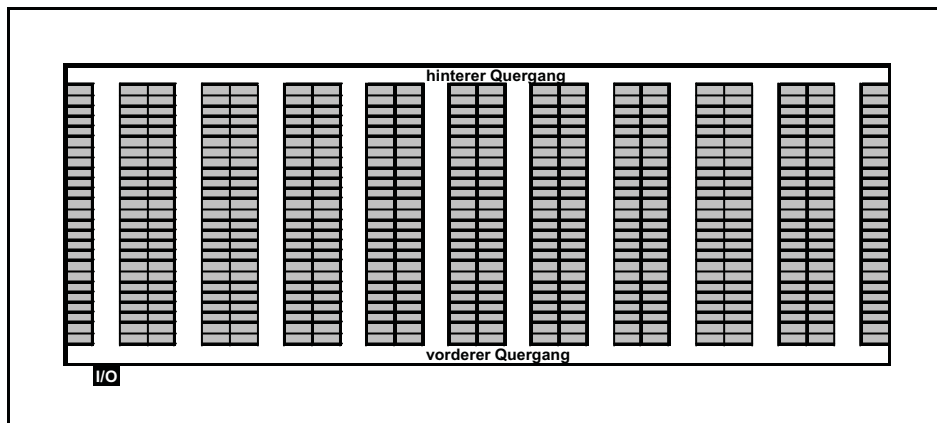
## 2 Problemstellung und Lösungsverfahren

In Mann-zur-Ware-Kommissioniersystemen mit manuell betriebenen Kommissioniergeräten geben unterschiedliche Strategien den Rahmen vor für die anschließend zu bewältigenden Planungsaufgaben in den drei Teilbereichen: Stellplatzzuordnung (Storage Location), Auftragsbildung (Batching) und Tourenplanung (Routing). In diesem Abschnitt wird eingangs die Grundstruktur von Mann-zur-Ware-Kommissioniersystemen erläutert und anschließend die für das jeweilige Entscheidungsfeld verwendeten Lösungsansätze dargestellt.

### 2.1 Grundstruktur von Mann-zur-Ware-Kommissioniersystemen

Ein in der Praxis häufig anzutreffender Lagertyp besitzt typischerweise einen Blockaufbau und geht von einem rechteckig angelegten Entnahmebereich mit nur je einem Quergang an der Front- und Rückseite aus. Pro Artikel ist ein Stellplatz vorgesehen; die Stellplätze sind in Regalzeilen auf einer Ebene angeordnet und haben gleiche Abmessungen. Die Regalzeilen sind parallel in gleich großen Abständen angeordnet. An der Vorder- und Rückseite befindet sich je ein Quergang, der alle Kommissioniergänge miteinander verbindet. Der Zu- und Abgang vom Lager wird auch I/O-Punkt (input/output point) oder Depot genannt und befindet sich in der unteren Ecke

gegenüber dem Gang zwischen den ersten beiden Regalzeilen. Der Kommissionierer beginnt an dieser Stelle die Kommissioniertour und kehrt am Ende hierher zurück (Abb. 1).



*Abb. 1: Lagerlayout eines Standard-Kommissioniersystems*

Der eigentliche Kommissioniervorgang basiert auf einer Reihe von Kundenaufträgen, die selbst wieder aus einzelnen Positionen bestehen. Eine Position eines Kundenauftrags bezeichnet einen Artikel oder Artikeltyp sowie die vom Kunden gewünschte Menge. Es wird davon ausgegangen, dass die Menge der Kundenaufträge vorab bekannt ist (off-line Problem). Aus der Menge der Kundenaufträge werden Kommissionieraufträge (Pick-Listen) erstellt, die aus einer Menge von Kundenaufträgen bestehen. Die Kommissionierung selbst beginnt, wenn der Kommissionierer im Eingangsbereich die Pick-Liste übernimmt, auf welcher die Menge der Artikel und deren Stellplätze angegeben sind, sowie die Reihenfolge, in der die Artikel entnommen werden sollen. Der Kommissionierer benützt ein Kommissioniergerät bestimmter Größe um die entnommenen Artikel transportieren zu können und um mehrere Stellplätze im Zuge einer Tour aufsuchen zu können, bevor er sich wieder zum Ausgangsbereich begibt. Es wird ferner angenommen, dass die Gänge einerseits schmal genug sind, so dass der Kommissionierer links und rechts der Gänge die Waren ohne nennenswerte Positionsänderung entnehmen kann, andererseits auch breit genug sind, um ein Überholen oder Begegnen zuzulassen.

Als Zielsetzung wird hier ein gängiges Optimierungskriterium von Standard-Kommissionierproblemen gewählt, nämlich die Minimierung der Wegstrecke, die zurückgelegt werden muss, um eine gegebene Menge von Kundenaufträgen abzuarbeiten. Zur Erreichung dieser Zielsetzung kann die Planung und Ausführung der beschriebenen Abläufe und Tätigkeiten in drei stark interdependente Entscheidungsfelder gegliedert werden, nämlich die Artikelanordnung, die Auftragsbildung und die Tourenplanung.

## 2.2 Operative Entscheidungsfelder in der Kommissionierung und ihre Lösungsansätze

### 2.2.1 Artikelanordnung (Storage Location)

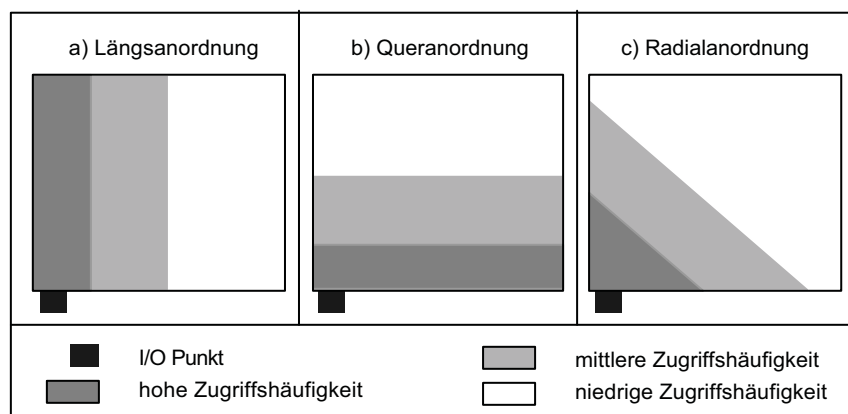
Beim Problem der Artikelanordnung sollen bei gegebenem Lagerlayout, gegebenen potenziellen Stellplätzen und gegebenen Kundenaufträgen eine Zuordnung der Artikel zu Stellplätzen gefunden werden, so dass die vom Kommissionierer zurückzulegende Strecke minimal ist. Strategien der Stellplatzzuordnung unterscheiden zwischen Festplatzlagerung und chaotischer Artikelanordnung, wobei erstere auf die längerfristig gültige Bestimmung eines Stellplatzes für jeden Artikel abzielt, während die Problemstellung bei chaotischer Stellplatzvergabe die Auswahl eines freien Stellplatzes für einen zu lagernden Artikel beinhaltet.



Das Problem der Stellplatzzuordnung steht in sehr engem Zusammenhang mit der Bildung von Kommissionieraufträgen und der Tourenplanung. Üblicherweise wird bei der Lösung des Problems der Stellplatzzuordnung die Auftragsbildung ausgeklammert und von Kundenaufträgen ausgegangen. Würden bereits Kundenaufträge vorliegen und hätte bereits eine Tourenplanung stattgefunden, dann ließe sich das Stellplatzvergabeproblem auf ein quadratisches Zuordnungsproblem, das NP-schwer ist, reduzieren. Da diese jedoch tatsächlich nicht vorliegen, kann davon ausgegangen werden, dass das Artikelanordnungsproblem auch mindestens NP-schwer ist [13].

Für Problemstellungen realistischer Größenordnung kommen daher in der Praxis vor allem Heuristiken in Betracht, welche die Artikel nach ihrer Zugriffshäufigkeit bewerten und die Stellplätze nach dem Kriterium der Entfernung vom Eingangsbereich zuordnen: der am häufigsten kommissionierte Artikel bekommt den Stellplatz mit der geringsten Entfernung zum I/O-Punkt, der zweithäufigste Artikel den zweiträchsten Stellplatz etc. In der Praxis wird die Orientierung an den Entfernungen durch die Verwendung von Anordnungsmuster überlagert [7,8]. Dabei werden Zonen festgelegt, innerhalb derer die Artikel entsprechend einer Längs-, Quer- oder Radialanordnung gelagert werden.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch drei schematische Darstellungen der genannten Anordnungsmuster jeweils für Artikel mit hoher, mittlerer und geringer Zugriffshäufigkeit. Bei Anwendung der Längsanordnungsstrategie ist jene Gasse, die sich in unmittelbarer Nähe zum Eingangsbereich befindet - im vorliegenden Fall die an der linken Seite gelegene Gasse - für Artikel mit hoher Zugriffshäufigkeit vorgesehen (Abb. 2a). Analog sind für querangeordnete Artikel jene Stellplätze unmittelbar am vorderen Quergang für die häufig nachgefragten Artikel vorgesehen, Stellplätze am hinteren Quergang für jene mit geringer Zugriffshäufigkeit (Abb. 2b). Hingegen beruht das radiale Anordnungsmuster auf der Distanz des Stellplatzes zum I/O-Punkt. Artikel mit der höchsten Zugriffshäufigkeit erhalten jene Stellplätze, die dem I/O-Punkt am nächsten sind. Bei dem hier gewählten Lagertyp ergibt sich beim Stellplatzbereich für Artikel mit hoher Zugriffsrates eine typische Dreiecksform, die Zonen der Artikel mit geringen Zugriffshäufigkeiten liegen entsprechend weiter vom I/O-Punkt entfernt (Abb. 2c).



*Abb. 2: Alternative Artikelanordnungsmuster bei Lage des I/O-Punkts vorn links*

### 2.2.2 Auftragsbildung (Batching)

Strategien der Auftragsbildung haben die Umwandlung von Kundenaufträgen in Kommissionieraufträge zum Ziel. Zwischen Einzelauftragskommissionierung, bei der jeder Kundenauftrag einem Kommissionierauftrag entspricht, und der Auflösung von Kundenaufträgen zum Zweck der Kommissionierung mit anschließender Rücktransformation sind als Mischform die Aufspaltung

eines Kundenauftrags und die Gruppierung mehrerer Kundenaufträge zu einzelnen Kommissioniertouren verbreitet. Die letztgenannte Form ist Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Das Problem der Auftragsbildung beinhaltet unter dem Aspekt der Wegeminimierung die Aggregation vorliegender Kundenaufträge zu Kommissionieraufträgen bei gegebener Stellplatzzuordnung, gegebenem Fassungsvermögen des Kommissioniergeräts und unter der Prämisse, dass einzelne Kundenaufträge ungeteilt in einem Kommissionierauftrag integriert werden sollen. Dieser Problemtyp ist ebenfalls NP-schwer, daher kommt heuristischen Verfahren zentrale Bedeutung zu, die sich in drei Kategorien einteilen lassen: Prioritätsregelverfahren, Seed- und Savings-Algorithmen [3].

Prioritätsregelverfahren bestimmen für jeden vorliegenden Kundenauftrag den Prioritätswert und ordnen den Auftrag dann einem Kommissionierauftrag unter Berücksichtigung der Kapazitätsbeschränkung des Kommissioniergeräts zu. Das First-Come-First-Serve Verfahren ist ein in der Praxis weit verbreitetes Verfahren, das sich wie alle anderen Vertreter dieser Kategorie (z.B. Space-filling Curves, Next Fit, First Fit und Best Fit) an einem einfachen Kriterium orientiert, nämlich dem Zeitpunkt des Auftragsesinganges.

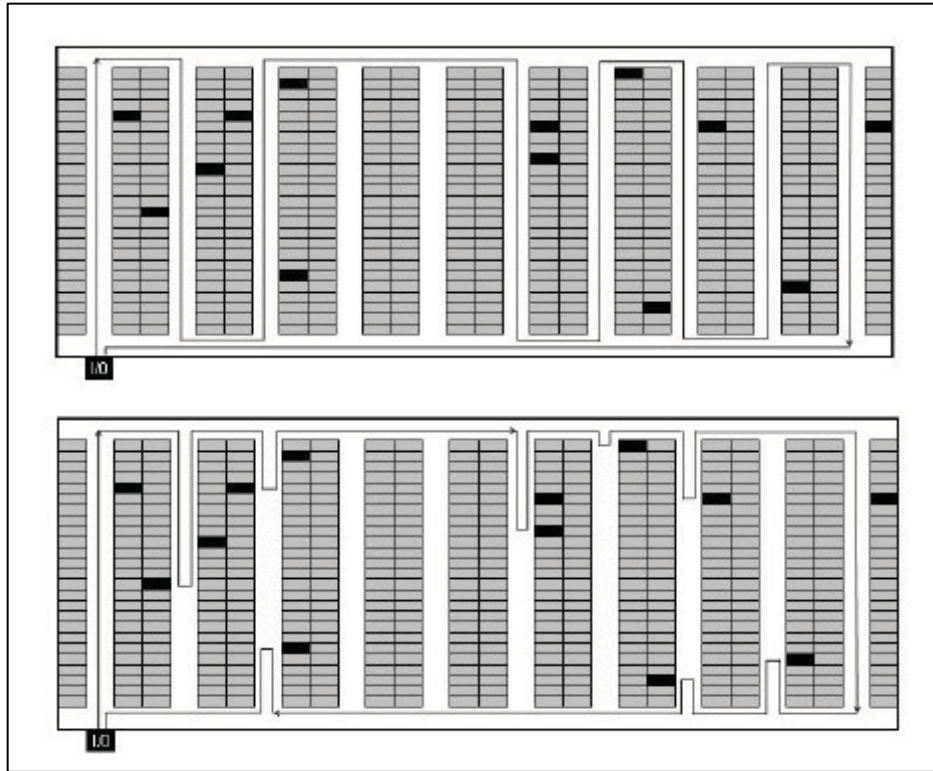
Im Gegensatz dazu beurteilen Seed- und Savings-Verfahren die Ähnlichkeit der vorliegenden Aufträge. Während bei der Berechnung der Ähnlichkeit der einzelnen Aufträge bei Seed-Algorithmen meist einfache Distanzmaße herangezogen werden, verwenden Savings-Verfahren hierfür die konkreten Wegeinsparungen, die sich durch die Zusammenfassung zweier Aufträge oder Teiltouren im Vergleich zur Einzelkommissionierung ergeben. Die Savingswerte hängen stark von dem zugrunde gelegten Routingverfahren ab. Im Rahmen dieser Analyse wird das EQUAL-Verfahren [4] angewandt, das (wie alle Savingsverfahren) auf dem Clarke-and-Wright-Verfahren [2] beruht und den Kommissionierauftrag sequentiell erzeugt (im Unterschied dazu geschieht das beim Small-Large-Verfahren [4] kumulativ). Der erste Kommissionierauftrag wird mit jenem Auftragspaar gebildet, das den größten Savingswert aufweist, und solange um jene Aufträge schrittweise erweitert, die jeweils den größten Savingswert mit dem erweiterten Kommissionierauftrag aufweisen, bis die Kapazitätsgrenze des Kommissioniergeräts erreicht ist. Danach wird der nächste Kommissionierauftrag auf die gleiche Weise errechnet. Seed-Algorithmen hingegen beginnen den Batching-Prozess durch eine sorgfältige Auswahl eines Startauftrages nach einem zuvor gewählten Kriterium [3] und bestimmen die Ergänzungsaufträge durch Ermittlung des geringsten „Abstands“ zum Startauftrag. Dieser „Abstand“ kann unterschiedlich festgelegt werden [5,11].

### 2.2.3 Tourenplanung (Routing)

Strategien, die darauf abzielen, in welcher Reihenfolge die Artikel an den einzelnen Standorten zu entnehmen sind, lassen sich in exakte und heuristische Verfahren einteilen. Exakte Verfahren bestimmen individuelle Touren, bei denen für jeden einzelnen Kommissionierauftrag die Entnahmereihenfolge bestimmt wird, während standardisierte Touren einem Routingmuster folgen, das üblicherweise vorsieht, nur jene Gänge zu betreten, in denen sich mindestens ein Kommissionierartikel befindet. Im Folgenden werden standardisierte Routen betrachtet.

Die Bestimmung der Tour des Kommissionierers durch das Lager ist formal gesehen ein Rundreiseproblem, das in seiner Ursprungsform NP-schwer ist. Große Probleme sind daher nicht effizient lösbar. Dieses spezielle Problem ist jedoch wegen der Anordnung der Stellplätze in Gängen mit polynomialen Aufwand lösbar [10]. Es ist jedoch festzustellen, dass keine Standardverfahren zur Verfügung stehen und sich Verfahren für individuelle Implementationen für Praktiker als zu schwierig darstellen. Daher haben sich in der Praxis für die Tourenbestimmung einfache Verfah-

ren etabliert, wobei das Largest Gap-Verfahren und das S-Shape-Verfahren (auch unter dem Begriff „Transversal Strategy“) besondere Verbreitung gefunden haben [6]. Daher wurden für die hier dargestellte Analyse diese beiden Verfahren herangezogen. Abbildung 3 zeigt exemplarisch ein Lager mit je einem Quergang an der Front- und Rückseite mit 10 Gassen mit je 50 Stellplätzen und einem Zugang (I/O) links vorne. Dunkel gefärbte Rechtecke repräsentieren Stellplätze, die aufgrund des Kommissionierauftrags vom Kommissionierer besucht werden müssen.



**Abb. 3.** Funktionsweise der Routingverfahren „S-Shape“ (oben) und „Largest Gap“ (unten)

Bei Anwendung des S-Shape-Verfahrens [12] beginnt der Kommissionierer nach Betreten des Lagers mit jenem Artikel, der im äußersten linken Gang zu kommissionieren ist und durchquert den gesamten Gang von der Front- bis zur Rückseite, anschließend geht er entlang des Quergangs an der Rückseite bis zum nächsten Kommissioniergang, der wieder zur Gänze durchschritten wird (Abb. 3, oben). Das S-Shape-Verfahren sieht charakteristischerweise vor, dass der Kommissionierer nicht wendet, sondern die Gasse, die er betreten hat, auf der gegenüberliegenden Seite verlässt. Eine Ausnahme kann die letzte Kommissioniergasse bilden, die auf der Depotseite (I/O) verlassen werden muss, wodurch ein Wendemanöver innerhalb dieser Gasse erforderlich werden kann [6].

Im Unterschied dazu lässt das Largest Gap-Verfahren Wendemanöver in allen Kommissioniergängen zu, mit Ausnahme der beiden äußersten Kommissioniergänge links bzw. rechts (Abb. 3, unten). Diese müssen zur Gänze durchschritten werden, um vorerst den Quergang an der Rückseite zu erreichen, um von dort aus bestimmte Artikel zu kommissionieren, und um später wieder den Quergang an der Frontseite und in weiterer Folge den Ausgang zu erreichen. In allen „inneren“ Gassen muss der Kommissionierer wenden, um den Gang auf der gleichen Seite zu verlassen, auf der er ihn betreten hat. Die Lage des Wendepunktes richtet sich nach der größten Distanz zwischen zwei Artikel bzw. zwischen Gasseneckpunkt und erstem Artikel in jeder Gasse.

### 3 Numerische Experimente – Zielsetzung und Testdesign

Die Zielsetzung der Untersuchung war die Evaluation dreier unterschiedlicher Anordnungsmuster (Längs-, Quer- und Radialanordnung) unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Einflüsse sämtlicher Entscheidungsfelder (Artikelanordnung, Auftragsbildung und Tourenplanung). Konkret wurden bei gegebenem Auftragsbildungsverfahren die Auswirkungen verschiedener Routingverfahren auf die Wahl der Artikelanordnung analysiert. Zu diesem Zweck wurden systematisch Testinstanzen generiert und ausgewertet. Im Gegensatz zu Petersen und Schmenner [8], die in ihrer Arbeit die Zusammenhänge von Anordnungsmuster, Artikelanordnung und Routingverfahren analysieren, wird in den vorliegenden Ergebnissen zusätzlich die Auftragsbildung berücksichtigt.

Ausgehend von einem rechteckigen Standard-Mann-zur-Ware-Kommissioniersystem mit einer Lagerkapazität von 500 Stellplätzen werden drei unterschiedliche Layouts des Lagers analysiert, die durch die Anzahl der Gassen (5, 10 und 25 Gassen mit je 50, 25 bzw. 10 Artikel pro Seite in jeder Gasse) bestimmt werden.

Zur Evaluation der Artikelanordnungsmuster Längs-, Quer- und Radialanordnung wurde ein Problemgenerator implementiert, der zufällige Kundenaufträge und Artikelanordnungen erzeugt; beide Problemparameter werden über zwei voneinander unabhängige Zufallszahlenströme gesteuert. Es werden jeweils 10 verschiedene Kundenauftragsbestände und 10 verschiedene Artikelanordnungen generiert [9]. Aus der paarweisen Kombination jedes Kundenauftragsbestands mit jeder Artikelanordnung ergeben sich daher jeweils 100 Probleminstanzen. Die Größe der Kundenauftragsbestände nehmen alternativ die Werte 10, 25, 50 und 100 Kundenaufträge an; die Größe der Kundenaufträge selbst folgt einer Gleichverteilung auf dem Intervall  $[5, \dots, 25]$  mit einem Mittelwert  $\mu$  von 15 Artikel pro Auftrag. Die Kommissionieraufträge werden dann mittels EQUAL Verfahren gebildet. Die Ausprägungen der alternativen Kapazitätsbeschränkungen durch das Kommissioniergerät betragen  $2\mu, \dots, 5\mu$ , daher also 30, 45, 60 und 75 Artikel. Die drei Artikelanordnungsmuster werden - getrennt nach den beiden Routingverfahren, „Largest Gap“ und „S-Shape“ - hinsichtlich ihrer Interdependenzen mit dem Lagerlayout analysiert. Pro Routingverfahren werden neun Ausprägungen der betrachteten Zielgröße (Länge der Kommissioniertour) angegeben, welche jeweils die Kombination einer von drei verschiedenen Lagerformen (5, 10 und 25 Gassen) mit einer von drei verschiedenen Artikelanordnungsmuster (Längs-, Quer- und Radialanordnung) bewerten. Jede dieser neun Ausprägungen ist jeweils eine Aggregation über drei verschiedene Auslastungsgrade des Lagers (80%, 90% und 100%), vier verschiedene Kapazitäten des Kommissioniergeräts (30, 45, 60 und 75 Artikel) und vier verschiedene Größen von Auftragsbeständen (10, 25, 50 und 100 Kundenaufträge). Je Routingverfahren wurden daher 43.200 Probleminstanzen bewertet; jede Ausprägung bedeutet also eine Aggregation über 4.800 Probleminstanzen. Die drei Artikelanordnungsalternativen werden zur chaotischen Artikelanordnung in Relation gesetzt, die als Basis (Benchmark) fungiert. Als Messgröße dient die durchschnittliche relative Verbesserung der Ergebnisse, die gegenüber chaotischer Artikelanordnung erreicht werden. Als Artikelzugriffshäufigkeit wird eine 60:20-Häufigkeit unterstellt, bei der angenommen wird, dass auf 20% der Artikel 60% der Zugriffe erfolgen.

Tabelle 1 zeigt die verwendeten Verfahren, sowie die gewählten Problemparameter und ihre Ausprägungen im Überblick.

Entscheidungsfeld	Verfahren
Artikelanordnung (storage location)	chaotisches Lager, Längs-, Quer-, Radialanordnung
Auftragsbildung (batching)	EQUAL
Tourenplanung (routing)	„S-Shape“, „Largest Gap“
Problemparameter	Ausprägung
Anzahl Stellplätze	500
Größe der Kundenaufträge	U [5,...,25]
Gassenanzahl	5, 10, 25
Artikelzugriffshäufigkeit	$x^3$
Lagerauslastung	80%, 90%, 100%
Kap. des Komm.geräts [Anzahl Artikel]	30, 45, 60, 75
Größe der Auftragsbestände [Anzahl Kundenaufträge]	10, 25, 50, 100

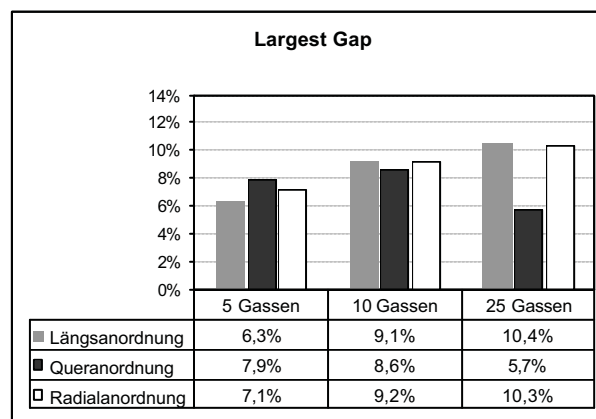
**Tab. 1:** Verfahrens- und Parameterübersicht

## 4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen sind jeweils getrennt nach den beiden Routingverfahren „Largest Gap“ (Abb. 4) und „S-Shape“ (Abb. 5) dargestellt. Das relative Verbesserungspotenzial, das gegenüber einer chaotischen Stellplatzvergabe im Mittel erzielt werden kann, wird durch die Höhe der Säulen visualisiert. In jeder Darstellung werden Lagerlayouts mit 5, 10 und 25 Gassen unterschieden.

### 4.1 Artikelanordnung bei Routingverfahren „Largest Gap“

Die numerischen Ergebnisse der beschriebenen Tests bei Verwendung von Largest Gap als Routingverfahren, EQUAL als Batchingverfahren und drei alternativen Artikelanordnungsmustern (Längs-, Quer- und Radialanordnung) stellt Abb. 4 als Balkendiagramm in einer Übersicht dar.



**Abb. 4:** Mittlere, relative Wegeinsparung durch Artikelanordnungsmuster gegenüber chaotischem Lager bei Verwendung von „Largest Gap“ als Routingverfahren

Bei der Anwendung des Largest Gap-Verfahrens sind bei einem Lager mit 5 Gassen fast 8% relative Einsparung bei Queranordnung gegenüber einer chaotischen Stellplatzvergabe möglich. Der Vorteil von Largest Gap, das gänzliche Traversieren einer Gasse zu vermeiden, bringt in Kombination mit langen Gassen und einer Queranordnung nach Zugriffshäufigkeiten ein etwas höheres Einsparungspotenzial als die Längsanordnung mit 6,3% und die Radialanordnung mit 7,1%. Bei 10 Gassen zeigen alle drei Anordnungsmuster annähernd gleiches Verbesserungspotenzial von ungefähr 9% gegenüber chaotischem Lager. Bei 25 Gassen und gleichzeitig ab-

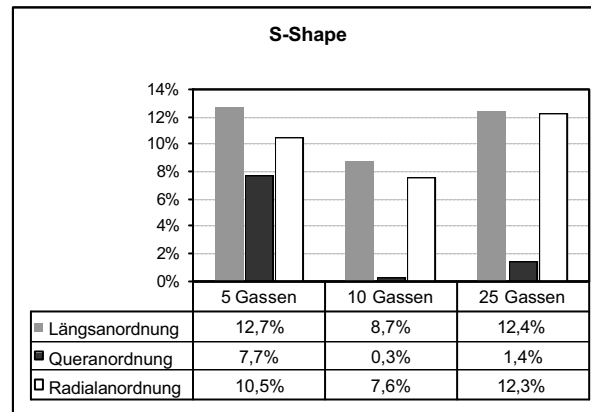
nehmender Gassenlänge bieten querangeordnete Artikel nur noch eine Verbesserung von 5,7%, da die Queranordnung den Kommissionierer zwingt, jede Gasse vom vorderen Quergang aus zu betreten und deshalb jeweils ein Wendemanöver durchzuführen. Die Wegstrecke, die eventuell im Inneren der sehr kurzen Gasse (nur 10 Artikel pro Gassenseite) eingespart werden kann, verliert im Verhältnis zum Wendemanöver und dem gänzlichen Traversieren des hinteren Querganges an Bedeutung. Hingegen ermöglichen längs- und radialangeordnete Artikel auch hier jeweils Wegeinsparungen von etwas mehr als 10%.

## 4.2 Artikelanordnung bei Routingverfahren „S-Shape“

Bei Verwendung von „S-Shape“ als Routingverfahren erweist sich die Längsanordnung als Artikelanordnungsmuster allen anderen Anordnungsmustern gegenüber als überlegen. Da das S-Shape-Verfahren vorsieht, jede Gasse, in der ein Artikel zu kommissionieren ist, zur Gänze zu durchlaufen, profitiert dieses Verfahren von der Längsanordnung mit über 12% Wegeinsparung besonders bei ungerader Gassenanzahl, da die Wahrscheinlichkeit relativ hoch ist, dass in der letzten Gasse keine Artikel zu kommissionieren sind und somit das Betreten dieser letzten (ungeraden) Gasse und das damit verbundene Wendemanöver wegfällt. Bei 10 Gassen führt der Wegfall des Kommissionierens in der letzten Gasse zu einem Wendemanöver (falls alle Gassen besucht werden müssen), das einen Teil der Wegersparnis wieder egalisiert. Tests in modifiziertem, kleinerem Rahmen lassen die Vermutung zu, dass dies auf alle Lagerlayouts in diesem Kontext mit gerader Gassenanzahl zutrifft.

Die Queranordnung erweist sich in Verbindung mit „S-Shape“ verglichen mit den anderen beiden Anordnungsmustern am wenigsten effektiv. Im Vergleich zu chaotischer Einlagerung kommt es zwar bei geringer Gassenanzahl zu einer Einsparung von immerhin fast 7%, weil die Artikel mit großer Zugriffshäufigkeit unmittelbar beim vorderen Quergang liegen und der Kommissionierer schon nach kurzer Strecke wenden kann. Im Gegensatz dazu ist bei zufälliger Stellplatzvergabe die Wahrscheinlichkeit höher, dass Artikel zu kommissionieren sind, die wesentlich weiter im Inneren der Gasse, eventuell sogar in der Nähe des hinteren Quergangs liegen. Da die Anzahl der Stellplätze in der vorliegenden Untersuchung als fix angenommen wird, bedeutet eine höhere Gassenanzahl gleichzeitig eine entsprechend verringerte Gassentiefe. Bei 25 Gassen beträgt die Gassentiefe nur noch 10 Stellplätze (im Vergleich zu 50 Stellplätzen bei 5 Gassen) und ein deutlich verringertes Wegeinsparungspotenzial: ob ein Artikel in einer kurzen Gasse direkt beim vorderen Quergang oder irgendwo in der Gasse zu kommissionieren ist, macht nur einen relativ geringen Unterschied und führt hier im Vergleich mit chaotischer Einlagerung nur noch zu einer Ersparnis von rund 1,5%. Bei 10 Gassen können keine nennenswerten Verbesserungen gegenüber einem chaotischen Lager erzielt werden.

Bei geringer Gassenanzahl bietet die Radialanordnung um etwas mehr als 2% weniger Einsparungspotenzial als die Längsanordnung, mit wachsender Gassenanzahl erreicht sie jedoch ein fast ebenso hohes Einsparungspotenzial wie die Längsanordnung. Der Grund liegt ebenso wie bei der Längsanordnung in der reduzierten Wahrscheinlichkeit, in den äußersten, linken Gassen Artikel entnehmen zu müssen. Abbildung 5 stellt die numerischen Ergebnisse der beschriebenen Tests bei gegebenem S-Shape-Routingverfahren, gegebener Auftragsbildung mit EQUAL mit drei Artikelanordnungsmustern, Längs-, Quer- Radialanordnung, als Balkendiagramm übersichtlich dar.



*Abb. 5: Mittlere, relative Wegeinsparung durch Artikelanordnungsmuster gegenüber chaotischem Lager bei Verwendung von „S-Shape“ als Routingverfahren*

## 5 Schlussfolgerungen und Resümee

Die vorliegende Arbeit analysiert die Vorteilhaftigkeit von Artikelanordnungsmustern, nämlich der Längs-, Quer- und Radialanordnung, im Vergleich zu chaotischer Stellplatzvergabe an Hand eines exemplarischen Standard-Kommissionierlagers. Numerische Ergebnisse mit unterschiedlichen Kundenauftragsstrukturen, Auslastungsgraden, und Kapazitäten zeigen unter Berücksichtigung der Auftragsbildung das Verbesserungspotenzial gegenüber chaotischer Einlagerung getrennt nach zwei in der Praxis weit verbreiteten Routingverfahren, dem Largest Gap und dem S-Shape-Verfahren.

Die Resultate belegen, dass Festplatzlagerung einem chaotischen Lager prinzipiell vorzuziehen ist. Sie bestätigen im Wesentlichen die Ergebnisse von Petersen [7]. Ferner machen sie deutlich, dass das Ausmaß der Vorteilhaftigkeit von unterschiedlichen Anordnungsmustern bei einem Lagersystem des hier betrachteten Typs von dem angewendeten Routingverfahren abhängig ist. Die Tests präzisieren darüber hinaus mögliche Einsparungen durch Artikelanordnungsmuster hinsichtlich der insgesamt zurückgelegten Wegstrecke. Bei Verwendung von „Largest Gap“ in eher schmalen Kommissionierläger mit wenigen, aber langen Gassen erweist sich die Queranordnung etwas vorteilhafter, während in breiten Kommissionierläger mit vielen, aber kurzen Gassen die Längs- oder Radialanordnung vorzuziehen ist. Ferner kann gezeigt werden, dass sich bei Verwendung von „S-Shape“ die Längsanordnung in allen untersuchten Lagerlayouts den anderen beiden Mustern gegenüber überlegen erweist. Die Queranordnung ist den beiden anderen Anordnungsmustern deutlich unterlegen.

Generell kann festgestellt werden, dass Anordnungsmuster zu Wegeinsparungen zwischen 6,3% und 12,7% führen, mit Ausnahme der Queranordnung bei „S-Shape“ als implementiertes Routingverfahren und eher geringer Gassentiefe, dort bewegt sich die Einsparung nur im Prozentbereich. Die Längs- und Radialanordnung scheinen robuster als die Queranordnung zu sein, da sie meist entweder gleiche oder bessere Ergebnisse als die Queranordnung liefern; eine Ausnahme bilden einzig die Ergebnisse, wenn „Largest Gap“ als Routingverfahren verwendet wird und das Lager wenige, lange Gassen aufweist. In diesem Fall wird die Routingheuristik durch die Queranordnung besser unterstützt.

Die Längs- und Radialanordnung erzielen in dem hier gewählten Versuchsrahmen deshalb ähnliche Ergebnisse bei Instanzen mit vielen, kurzen Gängen, da die konkreten Ausprägungen der Stellplatzzuordnungen mit steigender Gassenanzahl bei konstanter Anzahl der Stellplätze nur noch geringe Unterschiede aufweisen.

Aus den vorliegenden Ergebnissen lassen sich als grobe Entscheidungsregel einige Aussagen formulieren: für ein Lagersystem des hier betrachteten Typs und unter Verwendung des Routingverfahrens „S-Shape“, kann durch Längs- oder Radialanordnung bei größerer Gassenanzahl durchschnittlich eine Wegeinsparung von rund 9% bis 13% erzielt werden; eine Queranordnung nach Zugriffshäufigkeit klassifizierter Artikel hat kaum Einsparungspotenzial. Erfolgt die Routenwahl hingegen nach dem Largest Gap-Verfahren, so ist nur bei wenigen, langen Gassen die Queranordnung vorzuziehen und lässt bei vergleichbarer Problemstellung eine Einsparung von rund 8% erwarten. Hingegen ist bei größerer Gassenanzahl der Längs- oder der Radialanordnung der Vorzug zu geben und eine Wegersparnis ebenfalls in einer Größenordnung von 9% bis 10% zu erzielen.

Weitere Tests haben gezeigt, dass auch bei Verwendung des äußerst einfachen, in der Praxis weit verbreiteten Batchingverfahrens, First Come First Serve, im Durchschnitt Einsparungen erzielt werden können, die rund 2 Prozentpunkte unter den hier mit dem savingsbasierten EQUAL gezeigten Ergebnissen liegen. Die Aussagen bezüglich Qualität und Vorteilhaftigkeit einzelner Anordnungsmuster im gegenseitigen Vergleich treffen bei First Come First Serve grundsätzlich ebenso zu wie bei Verwendung von EQUAL.

## Literatur

1. Caron, F.; Marchet, G.; Perego A. (1998):  
Routing Policies and COI-Based Storage Policies in Picker-to-Part Systems. *International Journal of Production Research* **36**, 713-732.
2. Clarke, G.; Wright, W. (1964):  
Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research* **12**, 568-581.
3. de Koster, M. B. M.; van der Poort, E. S.; Wolters, M. (1999):  
Efficient Order Batching Methods in Warehouses. *International Journal of Production Research* **37**, 1479-1504.
4. Elsayed, E. A.; Unal, O. I. (1989):  
Order Batching Algorithms and Travel-Time Estimation for Automated Storage/Retrieval Systems. *International Journal of Production Research* **27**, 1097-1114.
5. Gibson, D. R.; Sharp, G. P. (1992):  
Order Batching Procedures. *European Journal of Operational Research* **58**, 57-67.
6. Hall, R. H. (1993):  
Distance Approximations for Routing Manual Pickers in a Warehouse. *IIE Transactions* **24**, 76-87.
7. Petersen II, C. G. (1999):  
The Impact of Routing and Storage Policies on Warehouse Efficiency. *International Journal of Operations and Production Management* **19**, 1053-1064.
8. Petersen II, C. G.; Schmenner, R. W. (1999):  
An Evaluation of Routing- and Volume-based Storage Policies in an Order Picking Operation. *Decisions Sciences* **30**, 481-501.
9. Rardin, R. L.; Uzsoy, R. (2001):  
Experimental Evaluation of Heuristic Optimization Algorithms: A Tutorial. *Journal of Heuristics* **7**, 261-304.



10. Ratliff, H.; Rosenthal, A. (1983):  
Orderpicking in a Rectangular Warehouse: A Solvable Case of the Traveling Salesman Problem. *Operations Research* **31**, 507-521.
11. Rosenwein, M. B. (1994):  
An Application of Cluster Analysis to the Problem of Locating Items within a Warehouse. *IIE Transactions* **26**, 101-113.
12. Roodbergen, K. J. (2001):  
Layout and Routing Methods for Warehouses. Doctoral Dissertation, Erasmus Research Institute of Management (ERIM), Erasmus University, Rotterdam (ERIM Ph.D. Series Research in Management 4, TRAIL Thesis Series No. T2001/3).
13. Wäscher, G. (2003):  
Order Picking: A Survey of Planning Problems and Methods. *Supply Chain Management and Reverse Logistics*. (Eds.: Dyckhoff, H.; Lackes, R.; Reese, J.). Springer, Berlin et al. 2003, 315-339.