

Simulative Grobplanung von Kommissioniersystemen – Analyse des Einflusses einzelner Planungsprobleme auf die Systemleistung bei variierender Systemgröße

Draft planning of order picking systems by simulation –
Impact of various planning problems on the performance development of
different order picking systems

*Dirk Kauke
Angelika Rett
Johannes Fottner*

*Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Fakultät für Maschinenwesen
Technische Universität München*

Für viele Unternehmen, insbesondere aus dem Bereich des E-Commerce, dienen Kommissioniersysteme, neben der Lieferzeit, als der wesentliche Unternehmensbereich, um Wettbewerbsvorteile zu generieren. Nicht selten müssen Betreiber bestehende Systeme erweitern oder reduzieren. In diesem Zuge stellt sich häufig die Frage, ob die definierten Ansätze der Lagerbelegung oder des Auftragsbatchings auch in dem veränderten Umfeld weiterhin die wirksamste Alternative darstellen. Diese Arbeit zeigt auf, dass manche Planungsprobleme durch die Systemgröße beeinflusst werden, andere hingegen weniger.

*[Schlüsselwörter:
Kommissioniersysteme, Planungsprobleme, Simulation]*

For many companies, especially from the e-commerce sector, order picking systems are the essential business area to generate competitive advantages. Operators often have to expand or reduce existing systems. In this context, the question often arises whether the defined approaches of storage location, order batching & Co. continue to be the most effective alternative even in the changed environment. This work shows that some planning problems are influenced by the system size, others less.

*[Keywords:
Order picking system, planning problems, simulation]*

1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Globalisierung und das anhaltende Wachstum des Onlinehandels steigern die Anforderungen an die Versandleistung von Unternehmen stetig. Lieferzeiten sollen möglichst kurz und kostengünstig sein, da die dazugehörigen Prozesse nicht wertschöpfend sind. Die Wirtschaftlichkeit ist daher ein Kernaspekt bei der Bewertung von Kommissioniersystemen. Die Planung und Auslegung von Kommissioniersystemen ist die größte Stellschraube des Unternehmens hinsichtlich Versandleistung. Ziel der Auslegung ist es, ein Optimum der Kommissionierleistung in Abhängigkeit von verschiedenen Kenngrößen des Kommissioniersystems zu erreichen.

Zur Auslegung von Kommissioniersystemen gibt es bereits zahlreiche Veröffentlichungen, die verschiedene Teilaspekte und deren Auswirkung auf die Kommissionierleistung untersuchen. Es lassen sich allerdings nur wenige bis keine Berichte finden, die ganzheitliche Untersuchungen auswerten und dabei auch die Größe des Lagers berücksichtigen. Meist ist ein Lager mittlerer Größe Ausgangspunkt der Untersuchung.

Ziel dieses Beitrags ist es daher, möglichst allumfassend verschiedene Aspekte eines Kommissioniersystems zu untersuchen und Aussagen über dessen Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit von der Lagergröße zu treffen. Hierfür wird ein generisches Simulationsmodell genutzt, in dem die verschiedenen Ausprägungen bei gleichbleibender Auftragslast simuliert werden können. Diese werden dann anhand der benötigten Auftragserfüllungszeit (AEZ) miteinander verglichen und bewertet.

In den folgenden Kapiteln wird zunächst genauer auf den aktuellen Stand der Forschung sowie die Kernpunkte bei der Planung von manuellen Kommissioniersystemen eingegangen. Im Anschluss werden das für diese Untersuchung zugrundeliegende Simulationsmodell und die untersuchten Parameter vorgestellt. Abschließend werden die Simulationsergebnisse ausgewertet und Aussagen zur Auslegung von manuellen Kommissioniersystemen in Abhängigkeit der Lagergröße getroffen.

2 STAND DER FORSCHUNG

Die Untersuchung und Optimierung von Lager- und Kommissioniersystemen findet in der Wissenschaft seit vielen Jahren eine breite Anwendung. Recherchiert man in wissenschaftlichen Datenbanken und nutzt dafür den Suchbegriff „Order picking system optimization“ findet man je nach Datenbank etwa 300 Artikel. Die ältesten Untersuchungen wurden bereits in den 70er und 80er Jahren des letzten Jahrhunderts durchgeführt [KG75, AG85].

Üblicherweise untersuchen die einzelnen Artikel ein Teilspektrum der Kommissioniersysteme. Beispielsweise wird das optimale Auftragsbatching [GV05], die optimale Wegführung der Kommissionierer [KP98] oder die bestmögliche Anordnung des Layouts [CMP10] untersucht. Zu jedem dieser Bereiche und darüber hinaus gibt es eine Vielzahl an Quellen, die sich den Fragestellungen aus unterschiedlichen Richtungen nähern und verschiedene Werkzeuge (analytische Ansätze, Simulation etc.) zur Lösungsfindung einsetzen. Van Gils et. al. haben im Rahmen ihrer Arbeit eine umfassende Sekundärstudie bestehender Arbeiten und der behandelten Ansätze durchgeführt [GRC18].

Neben der Herleitung der Problemstellung wird zu Beginn häufig ein definiertes System mit bestehendem Layout, Routing oder Lagerbelegung vorgestellt [CMP98, GV05, KP98]. Einige Quellen, wie beispielsweise Lorenc et al., betrachten zudem mehrere Systemgrößen, beziehen sich dabei häufig nur auf eine Planungskomponente beziehungsweise möchten an Hand unterschiedlicher Systemgrößen die Effektivität ihres entwickelten Konzeptes untermauern [CWQ13, Hal93, LL19, Vau99, RV06]. Letztlich konnte keine Arbeit gefunden werden, die den Fokus auf mehrere Planungskomponenten legt und dabei den Einfluss einzelner Komponenten untersucht.

3 PLANUNGSGEGENSTÄNDE IN DER MANUELLEN KOMMISSIONIERUNG

3.1 STRATEGISCHE UND OPERATIVE PLANUNGSPROBLEME

Die Planungsprobleme der manuellen Kommissionierung werden je nach Quelle in unterschiedlich viele Gruppen unterteilt. Nennenswerte Quellen in diesem Bereich sind

unter anderem [KLR06, GRC18], die sich mit dem Thema der Planungsprobleme und der Einteilung dieser näher beschäftigen. Van Gils unterteilt die verschiedenen Planungsprobleme dabei in strategische, taktische und operative. Er geht davon aus, dass beispielsweise das Layout als ein strategisches Planungsproblem zu Beginn der Planung definiert wird und dementsprechend nur selten angepasst wird, wohingegen das Batching oder das Routing durchaus regelmäßig auf Grund von äußeren Einflüssen angepasst werden können [GRC18].

Üblicherweise gehen ebenfalls diverse Grundlagenliteratur wie [Gud12, HSB11] auf die Planungsprobleme ein, jedoch erfolgt keine nähere Clusterung wie bei [KLR06, GRC18]. Eine entsprechende Zusammenfassung liefert [Koc14], der nach [CMP98] folgende Einteilung vornimmt:

- Lagerbelegung
- Picker Routing
- Order Batching

Diese sollen um die strategischen Planungsbereiche *Kommissioniertechnik* und *Lagerlayout* erweitert und nachfolgend näher beschrieben werden. [GRC18].

3.2 LAGERLAYOUT

Kommissionierlager sind üblicherweise rechteckig aufgebaut, die Lagergassen verlaufen parallel zueinander. Gudehus nennt allerdings auch noch L-, U-, H- sowie Kreuz-Layout, wobei die Lagergassen nicht parallel zueinander angeordnet sein müssen. Desweiteren kann ein Lager auch aus verschiedenen Bereichen mit jeweils eigenem Layout bestehen. Als typische Fragestellungen bei einem rechteckigen Layout nennen de Koster et al. die Anzahl und Länge der Lagergassen, die Existenz und Anzahl von Quergassen sowie die Position der Basis, an welcher die kommissionierte Ware für den Versand vorbereitet wird [GRC18, KLR06].

3.3 KOMMISSIONIERTECHNIK

Die Kommissioniertechnik behandelt nach Gudehus folgende vier Einzelbereiche:

- Bereitstellung der Zugriffsmenge
- Fortbewegung des Kommissionierers
- Entnahme der Ware
- Abgabe der Auftragsmengen

Die elementaren Kommissioniersysteme unterscheiden dabei zwischen statischer und dynamischer Bereitstellung. Eine statische Bereitstellung erfolgt in Regalen oder am Boden wobei sich der Kommissionierer zu diesem Lagerplatz bewegt. Bei einer dynamischen Bereitstellung werden die Artikel durch eine Fördertechnik ausgelagert

und an den festen Arbeitsplatz des Kommissionierers transportiert. Die Fortbewegung des Kommissionierers erfolgt ein- oder zweidimensional. Eine ebenerdige Fortbewegung ist eindimensional, kann der Kommissionierer sich z.B. mit Hilfe eines Regalbediengerätes o.ä. auch vertikal fortbewegen, so spricht man von zweidimensionaler Fortbewegung. Die Entnahme der Ware erfolgt manuell oder mechanisch. Im Gegensatz zur manuellen Entnahme nutzt der Kommissionierer bei der mechanischen Entnahme eine Greifhilfe wie etwa einen Saugnapf. Die Abgabe der Artikel geschieht entweder an einer zentralen Position im Lager oder dezentral bspw. an einer Basis außerhalb der Regalreihen [Gud12].

3.4 LAGERBELEGUNG

Die Lagerbelegung beschäftigt sich mit der Frage, an welcher Position im Lager ein Artikel gelagert werden soll, um die Kommissionierwege möglichst kurz zu halten. Eine etablierte Strategie ist dabei die klassenbasierte Lagerplatzvergabe. Hierbei wird das Artikelsortiment meist entsprechend der Nachfrageintensität in verschiedene Klassen unterteilt, welchen im Lager feste Bereiche zugewiesen sind. Innerhalb dieser Bereiche werden die Artikel zufällig verteilt. Die gängigste Klasseneinteilung unterscheidet zwischen häufig nachgefragten A-Artikeln, normal oft nachgefragten B-Artikeln und selten nachgefragten C-Artikeln. Je häufiger eine Artikelgruppe nachgefragt wird, desto näher an der Basis werden die entsprechenden Artikel gelagert. Die Anzahl der Klassen ist beliebig und nicht auf drei beschränkt. So kommt es für den Fall, dass nur eine Klasse gebildet wird, zu einer komplett zufälligen Lagerbelegung [Koc14, KLR06].

3.5 PICKER ROUTING

Das Problem des Picker Routings behandelt die Reihenfolge, in der der Kommissionierer die Artikel an verschiedenen Lagerplätzen kommissioniert, um die Kommissionierweglänge möglichst kurz zu halten. Die bekanntesten Routing Strategien nach [Koc14, KLR06] werden im Folgenden vorgestellt.

Bei der S-Shape-Strategie werden betretene Gassen immer komplett durchgangen. Der Kommissionierer bewegt sich auf S-förmigen Wegen durch das Lager und betritt nur die Gassen, in denen Artikel zu picken sind.

Folgt das Routing hingegen der Return-Strategie, so betritt der Kommissionierer alle Gassen von der gleichen Seite aus, dreht um sobald er alle Artikel in dieser Gasse gepickt hat und verlässt die Gasse wieder dort wo er sie betreten hat.

Die Mid-Point-Strategie erweitert die Return-Strategie. Eine Gasse kann von beiden Seiten aus betreten werden und es wird maximal bis zur Hälfte der Gasse gegangen um Artikel zu picken und dann wieder umgedreht. Artikel

in der hinteren Hälfte der Gasse werden von der anderen Seite aus gepickt.

Die Largest-Gap-Strategie verbessert die Mid-Point-Strategie dahingehend, dass der Wendepunkt nicht in der Mitte der Gasse liegt, sondern so gesetzt wird, dass der nicht durchquerte Teil der Gasse, nachdem die Gasse von beiden Seiten betreten wurde, möglichst groß ist.

Die Combined-Strategie kombiniert S-Shape- und Return-Strategie. Jede Lagergasse wird nur einmal betreten, es kann aber innerhalb einer Gasse gewendet werden.

3.6 ORDER BATCHING

Beim Order Batching werden mehrere Kundenaufträge zu einem Kommissionierauftrag zusammengefügt. Dabei wird zwischen einstufigem Batching, wobei ein Kundenauftrag immer eindeutig einem Kommissionierauftrag zugeordnet wird, und zweistufigem Batching unterschieden. Hierbei kann ein Kundenauftrag auf mehrere Kommissionieraufträge aufgeteilt werden, dabei entsteht allerdings ein hoher Sortieraufwand im Anschluss an das Kommissionieren [Koc14, KLR06].

4 UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND

In diesem Kapitel werden der Aufbau und das Layout des Lagers erörtert (Abschnitt 4.1) und die verwendete Kommissioniertechnik vorgestellt (Abschnitt 4.2). Anschließend werden betrachtete Strategien zur Lagerbelegung erklärt (Abschnitt 4.3) sowie die verwendeten Batchbildungsmechanismen und die daraus resultierende Kommissionierorganisation dargelegt (Abschnitt 4.4). Zum Schluss werden die untersuchten Parameter in variable und fixe Parameter unterteilt (Abschnitt 4.5).

4.1 LAGERAYOUT

Bei dem betrachteten Lager handelt es sich um ein manuelles Kleinteilelager. Das Lager besteht aus mehreren parallelen Lagergassen gleicher Länge, die in regelmäßigen Abständen Stopps zum Picken vorsehen. Gassen können nur in eine Richtung durchfahren werden und ein gegenseitiges Überholen ist nicht möglich. Daher kann hier von einer S-Shape-Strategie ausgegangen werden. An der Basis werden Kommissionieraufträge verteilt und gepickte Waren an der Entladestation ausgeladen. Die Basis befindet sich standardmäßig in der linken unteren Ecke des Layouts, kann aber auch mittig links oder mittig unten angeordnet sein (vgl. Abbildung 1). Je nach Systemausprägung können nur unterschiedlich viele Kommissionierer gleichzeitig ihre Aufträge an der Basis ablegen.

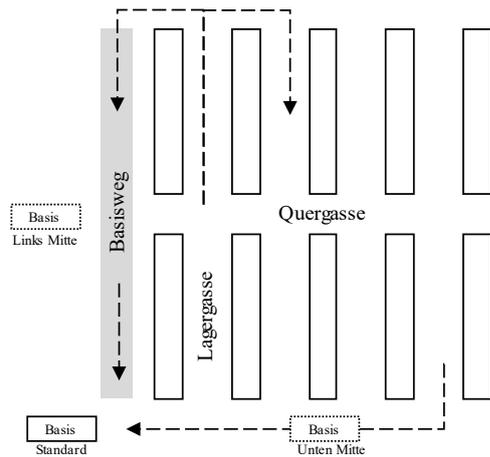


Abbildung 1. Beispielhaftes Layout mit vier Lagergassen, einer Quergasse sowie einem Basisweg.

Das Lager kann über Quergassen verfügen, welche Lagergassen in gleichlange Abschnitte teilen und nebeneinanderliegende Gassen miteinander verbinden. Innerhalb der Quergassen werden keine Artikel gepickt. Des Weiteren gibt es die Option eines Basiswegs, der außerhalb der Regalreihen parallel zu den Lagergassen auf direktem Weg zurück zur Basis führt. Auch der Basisweg dient lediglich als Verkehrsweg ohne zusätzliche Pickvorgänge.

4.2 KOMMISSIONIERTECHNIK

Die Kommissionierung erfolgt mit Kommissionierwägen, die mehrere Ablagefächer besitzen, sodass ein Multi-Order-Picking durchgeführt werden kann. Ein Kommissionierer geht mit einem Wagen durch das Lager und muss diesen manuell bestücken. Dem Kommissionierwagen wird, je nach Systemausprägung, eine unterschiedliche Ladekapazität zugewiesen.

4.3 LAGERBELEGUNG

Die betrachteten Strategien der Lagerbelegung sind die „Freie Belegung“, die „ABC-Verteilung gassenweise“ und die „ABC-Verteilung innerhalb einer Gasse“. Bei der freien Belegung sind die gelagerten Artikel keinem System folgend frei im Lager verteilt.

Bei der gassenweisen ABC-Verteilung wird das Artikelsortiment entsprechend ihrer Umschlagshäufigkeit gelagert, sodass einzelne Gassen mit ausschließlich A-Artikeln, B-Artikeln usw. vorzufinden sind. Die „schnelldrehenden“ A-Artikel befinden sich in den Lagergassen nahe der Basis, die „langsamdrehenden“ C-Artikel in den am weitesten entfernten Gassen.

Bei der ABC-Verteilung innerhalb einer Gasse wird das Sortiment ebenfalls in A-, B- und C-Artikel unterteilt, allerdings werden diese gemischt blockweise innerhalb der Gassen gelagert. Hierbei werden die Verteilungen ABC, CBA und ABCBA betrachtet, welche die Reihenfolge der

Artikelgruppen innerhalb einer Gasse beginnend vom Gassenbeginn angeben (vgl. Abbildung 2).

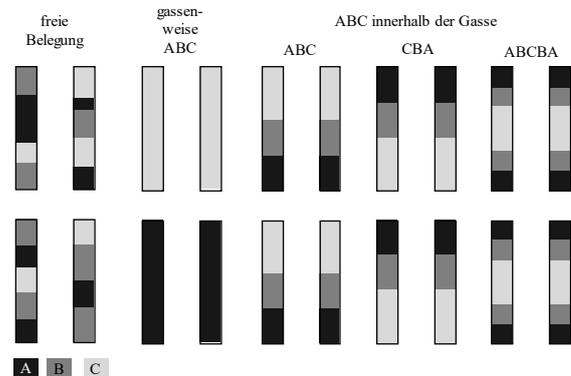


Abbildung 2. Untersuchte Lagerbelegungsstrategien.

4.4 ORGANISATION UND BATCHBILDUNG

Im Rahmen der Untersuchung wird stets eine Auftragslast von 2000 Aufträgen unterstellt, die gleichverteilt aus bis zu fünf Positionen je Auftrag bestehen können. Jeder Position wird zudem eine fiktive Kapazität von 1 oder 2 zugeordnet. Diese beschreibt den Platzbedarf auf dem Kommissionierwagen und wird im Rahmen der Batchbildung entsprechend berücksichtigt.

Die Batchbildung beschreibt das Zusammenfassen mehrerer Auftragspositionen zu einem Kommissionierauftrag (Batch), um möglichst effizient kommissionieren zu können. Ein Batch soll die Kapazität des Kommissionierwagens möglichst gut ausschöpfen und nah beieinanderliegende Artikel enthalten, um so möglichst kurze Wegstrecken zu erreichen.

Im Zuge dieser Untersuchung wird auf eine klassische Seed-Heuristik zurückgegriffen, die zwar keine exakte Lösung liefert, aber auf Grund ihrer kurzen Laufzeit zur Berechnung und einer nahezu optimalen Lösung häufig in der Praxis Anwendung findet [Koc14].

Das Simulationsmodell ist in der Lage, sowohl eine einstufige als auch zweistufige Kommissionierung abzubilden. Da die notwendigen Prozesse zur Zusammenführung aufgeteilter Aufträge im Rahmen der zweistufigen Kommissionierung vernachlässigt werden, hat die Wahl der Ablauforganisation hauptsächlich einen Einfluss auf die Batchbildung.

Die einstufige Batchbildung kombiniert mehrere Kundenaufträge mit dem Ziel, möglichst wenige verschiedene Gassen zu durchfahren. Dabei wird zu Beginn eines jeden Batchingprozesses ein Auftrag mit einer maximal hohen Anzahl an Positionen ausgewählt. Daraus resultiert eine Basismenge an Lagergassen, die auf jeden Fall durchfahren werden müssen. Anschließend wird nach weiteren Aufträgen

gen gesucht, die Artikel aus den gleichen Lagergassen benötigen. Erreicht der Batch eine definierte Kapazitätsauslastung des Kommissionierwagens nicht, erlaubt es der Algorithmus, zunächst einen weiteren Auftrag hinzuzufügen, der die bestehende Basismenge an Lagergassen um maximal eine zusätzliche Lagergasse erweitert

Bei der Batchbildung zur zweistufigen Kommissionierung werden die Positionen aller Aufträge einzeln betrachtet. Es werden vorrangig Positionen mit Artikeln in der gleichen Lagergasse, aber bei Bedarf auch mit Artikeln in den direkt umliegenden Gassen zu einem Batch zusammengefügt.

4.5 UNTERSUCHTE KONFIGURATIONEN

Im Rahmen der Simulationsstudie werden die definierten Parameter variiert. Damit die Anzahl an Experimenten beherrschbar bleibt, werden die Parameter in fixe und variable Gruppen unterteilt. Die fixen Parameter werden dazu in drei Lagerkonfigurationen überführt (vgl. Tabelle 1). Typ 1 stellt ein kleines, Typ 2 ein mittleres und Typ 3 ein großes Lager dar. Im Rahmen einzelner Studien werden anschließend die variablen Parameter für die drei Lagertypen variiert (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 1. Feste Parameter für drei Lagerkonfigurationen

	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Anzahl Gassen	4	8	12
Länge Gassen in Meter	20	40	80
Abstand Stopps in Meter	0,4	0,8	0,8
Anzahl Entladeplätze	1	3	6
Anzahl Kommissionierwagen/Kommissionierer	5	15	30

Tabelle 2. Variable Parameter der Simulationsstudie

Anzahl Quergassen	0	1	2
Basisweg	Ja		Nein
Position Basisstation	Standard	Mitte links	Mitte unten
Kapazität Wagen	20		40
Lagerbelegung	Freie Belegung	ABC gassenweise	ABC innerhalb einer Gasse

Artikelverteilung (bei ABC innerhalb Gasse)	ABC	CBA	ABCBA
Organisation/Batching	Einstufig		Zweistufig

4.6 SIMULATIONSUMGEBUNG

Die Studie wird mit der Simulationssoftware Tecnomatix Plant Simulation durchgeführt. Plant Simulation ist eine ereignisdiskrete Simulationsumgebung, die insbesondere für die Simulation von Materialflüssen und Produktionsprozessen angewendet wird. Wie bereits in Kapitel 4.5 näher ausgeführt, wurde der Einfluss der variablen Parameter auf die notwendige Auftragsersetzungszeit für die drei Lagertypen untersucht. Um mögliche statistische Schwankungen auszuschließen, wurde jeder Simulationsschritt drei Mal wiederholt.

5 ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulationsstudie ausgewertet und Erkenntnisse zur Auslegung von manuellen Kommissioniersystemen in Abhängigkeit von der Lagergröße getroffen. Zuerst werden die untersuchte Zielgröße (Abschnitt 5.1) sowie erste grundlegende Beobachtungen erläutert (Abschnitt 5.2). Im Anschluss daran werden nacheinander die Untersuchungsergebnisse der Parameter Anzahl an Quergassen (Abschnitt 5.3), Existenz eines Basisweges (Abschnitt 5.4), Batchbildung (Abschnitt 5.5), Lagerbelegung (Abschnitt 5.6) sowie Basisposition (Abschnitt 5.7) vorgestellt.

5.1 ZIELGRÖßEN

Wesentliche Zielgröße der Simulationsstudie ist die benötigte Zeit, um alle 2000 Aufträge abzuarbeiten (Auftragsersetzungszeit bzw. AEZ). Diese kann in Form der Simulationszeit zwischen den verschiedenen Lagertypen verglichen werden. Die Zeit gibt direkt Auskunft darüber, welchen Einfluss ein Parameter auf die Kommissionierleistung hat.

5.2 ALLGEMEINE ERKENNTNISSE

Betrachtet man zunächst die AEZ der einzelnen Systemgrößen kann festgestellt werden, dass diese trotz des größeren Lagers abnimmt. Die AEZ liegt im Mittel für Typ 1 bei etwa 6 Stunden, für Typ 2 bei ca. 3,5 Stunden und für Typ 3 bei ca. 2,5 Stunden. Mit der Zunahme der Lagergröße steigen in diesem Beispiel jedoch auch die Anzahl der Kommissionierer, die dem System zur Verfügung stehen, sodass sich trotz längerer Wege die AEZ deutlich reduziert.

Unabhängig vom Lagertyp konnte zudem festgestellt werden, dass eine Vergrößerung der Kapazität der Kommissionierwagen von 20 auf 40 dazu führt, dass sich die Anzahl an gebildeten Batches annähernd halbiert. In diesem Zuge reduziert sich auch die Simulationszeit um etwa 40%. Durch die erhöhte Kapazität jedes einzelnen Kommissionierwagens, steigt auch die Anzahl der Stopps pro Tour. Dies wiederum hat zur Folge, dass die durchschnittliche Blockierzeit je Batch, da ein Überholen nicht möglich ist, drastisch zunimmt. Je nach Systemtyp und Ausprägung der Variablen hat sich die durchschnittliche Blockierzeit verdreifacht.

5.3 ANZAHL AN QUERGASSEN

Quergassen innerhalb eines Lagersystems sollen dem Kommissionierer ermöglichen, dass dieser die Lagergasse vorzeitig verlassen kann, wenn er keine weiteren Aufträge dort zu picken hat. Eine zu erwartende Konsequenz ist daher, dass mit der Einführung einer Quergasse die AEZ sinken sollte, da Wegstrecken minimiert werden können.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine deutliche Reduzierung der AEZ im Zuge der Einführung einer Quergasse nur bei den Typen 2 und 3 festgestellt werden konnte. Bei Typ 1 konnte die Quergasse keine Verbesserungen hervorrufen bzw. hat im Rahmen einzelner Konfiguration sogar zu einer minimalen ($\leq 1\%$) Steigerung der AEZ geführt. Die Auswirkungen einer Quergasse sind demnach von der zu erwartenden Einsparung einzelner Wegstrecken abhängig. Bei Typ 1 verringert sich die Gasenlänge von 20 auf 10 Meter, bei Typ 2 von 40 auf 20 Meter und bei Typ 3 von 80 auf 40 Meter.

Bei der Einführung einer zweiten Quergasse zeigt sich abschließend der Einfluss der Lagerbelegung sowie die Ablauforganisation. Pauschal kann festgestellt werden, dass die Einführung einer zweiten Quergasse nicht zu einer ähnlichen Minimierung der AEZ führt, wie es die erste Quergasse erreichen konnte. Allerdings wird deutlich, dass die Systeme mit einer ABC gassenweisen Lagerbelegung minimal mehr von einer zweiten Quergasse profitieren. Dies kann damit begründet werden, dass ein mögliches Blockieren, auf Grund des konzentrierten Aufkommens in der A-Gasse, durch ein vorzeitiges Verlassen der Gasse minimiert werden kann. Gleiches gilt für die Systeme, die nach einem einstufigen Verfahren arbeiten. Hier sind die Batches auf Grund der längeren Wegstrecken grundsätzlich weniger performant, sodass auch hier ein vorzeitiges Verlassen der Gasse Vorteile bringt.

Tabelle 3. Gegenüberstellung der AEZ bei freier Belegung (in Stunden).

Freie Belegung Standard Basis Kapazität 20 Kein Basisweg		Quergassen		
		0	1	2
Typ 1	Zweistufig	07:43:34	07:48:19	07:46:07
	Einstufig	07:53:07	07:56:52	07:55:10
Typ 2	Zweistufig	03:02:54	02:58:26	02:58:21
	Einstufig	04:14:00	03:51:31	03:48:37
Typ 3	Zweistufig	02:15:49	02:08:03	02:04:25
	Einstufig	03:51:12	03:28:56	03:23:04

Tabelle 4. Gegenüberstellung der AEZ bei gassenweiser ABC-Belegung (in Stunden).

Gassenweise ABC Standard Basis Kapazität 20 Kein Basisweg		Quergassen		
		0	1	2
Typ 1	Zweistufig	07:39:18	07:42:52	07:40:34
	Einstufig	07:40:08	07:42:57	07:45:50
Typ 2	Zweistufig	03:11:28	03:11:11	03:04:42
	Einstufig	03:41:40	03:31:45	03:26:02
Typ 3	Zweistufig	02:24:36	02:11:09	02:09:26
	Einstufig	03:10:12	02:58:02	02:41:52

Abschließend kann festgehalten werden, dass mit steigender Größe des Lagers die Einführung einer oder mehrerer Quergassen zur Reduzierung der Wegstrecken und daher eine Minimierung der AEZ hervorrufen können. Neben der Wegstrecke können zudem mögliche Blockierzeiten reduziert werden. Diese haben insbesondere bei einer hohen Anzahl an Kommissionierern einen stärkeren Einfluss auf die AEZ. Im praktischen Umfeld muss zudem berücksichtigt werden, dass mit der Einführung einer jeden Quergasse die verfügbare Lagerfläche reduziert wird. Der zu erwartende Zeitgewinn muss daher stets den zusätzlichen Flächenkosten gegenübergestellt werden.

5.4 BASISWEG

Ähnlich wie die Quergassen soll der Basisweg eine Reduzierung der AEZ bewirken. Da in den betrachteten Layoutkonfigurationen der Basisweg keine Reduzierung der Wegstrecke ermöglicht, können lediglich Blockierungen vermieden werden, da auf dem Basisweg kein Pickvorgang erfolgt.

Da beide Basispositionen (Standard & Mitte links), die von einem Basisweg direkt profitieren, miteinander verglichen werden sollen, verfügen die einzelnen Lagertypen jeweils über eine Quergasse. Zudem werden wie zuvor die Lagerbelegungsstrategien Freie Belegung und ABC gassenweise Belegung betrachtet.

Zunächst wird deutlich, dass bei der Standard Basis und einem Basisweg die größten Einsparpotentiale bei der größeren Gesamtkapazität (40) des Kommissionierwagens erreicht werden. Dies liegt vornehmlich an der Anzahl an Stopps je Batch, die bereits im Kapitel 5.2 näher erläutert wurde. Der Basisweg ermöglicht es daher, dass die Kommissionierer, ohne durch weitere Gassen durchfahren zu müssen, auf direktem Wege zurück zur Basisstation fahren können. Ohne diesen kann es vorkommen, dass die Kommissionierer, die auf dem Rückweg zur Basis sind, durch die pickenden Kommissionierer blockiert werden. Am deutlichsten wird dies bei der ABC gassenweise Belegung, da dort die Konzentration an Kommissionierern in einzelnen Gassen deutlich höher ist und durch den Einsatz eines Basisweges entsprechend entzerrt werden kann.

Darüber hinaus zeigt die Simulationsstudie, dass die zu erwartende Steigerung der Systemleistung durch den Einsatz eines Basisweges bei der einstufigen Kommissionierung deutlich geringer ausfällt, als beispielsweise bei der Einführung einer Quergasse. Bei der freien Belegung sind die AEZ mit und ohne Basisweg nahezu identisch. Erst bei der gassenweisen ABC-Belegung erreicht auch hier der Basisweg Zeitvorteile. Der wesentliche Grund dafür liegt, wie bereits zuvor erwähnt, vornehmlich in der schlechteren Wegstrecken-Optimierung der Batches. Da der Kommissionierer im Vergleich zur zweistufigen Kommissionierung in deutlich mehr Gassen picken muss, fallen die Effekte des Basisweges geringer aus.

Erwähnenswert ist außerdem der Einfluss eines Basisweges bei Positionierung der Basis Mitte links. Hier kann unabhängig von der Systemgröße, der Gesamtkapazität und auch der Lagerbelegung festgestellt werden, dass die AEZ sich nur marginal reduziert bzw. stagniert und sogar teilweise höher ausfällt. Dies kann damit begründet werden, dass der Basisweg im Vergleich zur Standard Basis in diesem Fall nicht nur als Rückweg zur Basis, sondern auch als Hinweg zu der ersten Kommissioniergasse genutzt wird. Im Zuge einer ABC-Belegung kann dies vereinzelt zu längeren Wegstrecken führen.

5.5 ORGANISATION UND BATCHBILDUNG

Das Batching für die einstufige Kommissionierung ist sehr strikt bei der Auswahl von Aufträgen und ergänzt nur solche zu einem Batch, die ausschließlich die identischen Lagergassen beinhalten wie die anderen Aufträge in diesem Batch. Das führt einerseits dazu, dass die Batches schlechter ausgelastet sind, so dass der Kommissionierwagen noch Kapazität zur Verfügung hätte, es aber keinen passenden Auftrag mehr gibt, um den Wagen zu füllen. Dadurch werden bei der einstufigen Batchbildung geringfügig mehr Batches gebildet als bei der zweistufigen Batchbildung, was bereits zu einer Steigerung der AEZ führt. Andererseits ist die Zusammensetzung der Batches beim zweistufigen Batching meist effizienter.

Da Auftragspositionen einzeln betrachtet werden, können Positionen aus den gleichen oder direkt aneinander angrenzenden Gassen kombiniert und die Fahrwege so möglichst kurz gehalten werden. Beim einstufigen Batching kann es vorkommen, dass die Lagergassen eines Batches weit voneinander entfernt liegen, wodurch die Kommissionierzeit im Vergleich zum einstufigen Batching ebenfalls verlängert wird. Das zeigen auch die Simulationsergebnisse. Im Falle des Lagertyps 1, keiner Quergasse, keinem Basisweg und einer Standard Basis liegt die durchschnittliche AEZ je Batch bei der zweistufigen Kommissionierung bei circa 03:50 min, bei der einstufigen Kommissionierung bei circa 06:15 min bei fast identischen Blockierzeiten je Batch.

Überträgt man dies auf die gesamte AEZ, wird deutlich, dass je größer das Lager ist, desto größer ist die Differenz der AEZ bei der ein- und zweistufigen Batchbildung. Aber auch hier treten die bereits mehrfach diskutierten Vorteile der ABC gassenweisen Lagerbelegung auf. Dabei wird deutlich, dass im Vergleich zur freien Belegung die Steigerungen der AEZ von zweistufig zu einstufig deutlich geringer ausfallen. Da die einstufigen Batches keine optimale Wegstreckenoptimierung berücksichtigen, ergibt sich jedoch aus der ABC-Lagerung eine zentralisiertere Lagerbelegung, die die Batches optimiert (vgl. Abbildung 3).

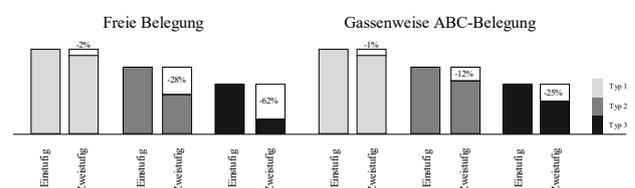


Abbildung 3. Einfluss der Ablauforganisation auf die Systemgröße

Interessanterweise hat die Kapazität des Kommissionierwagens keinen Einfluss auf die relativen Zeitunterschiede zwischen einstufigem und zweistufigem Batching.

Die Verlängerung der AEZ durch die einstufige Kommissionierung ist nahezu identisch bei einer Kapazität von 20 oder 40.

Zu betonen ist an dieser Stelle nochmals, dass die zweistufige Kommissionierung in dieser Simulation nicht das Zusammenführen der Positionen eines Auftrags nach der Kommissionierung berücksichtigt. Die Zeitersparnis, die durch die zweistufige Kommissionierung erzielt wurde, muss noch mit der benötigten Zeit für das Zusammenführen verrechnet werden. Je größer das Lager ist, desto größer ist die Zeitersparnis bei der zweistufigen Kommissionierung durch kürzere Wege. Es ist also festzuhalten, dass die Leistungssteigerung durch Wahl von ein- oder zweistufigem Batching vor allem von der Größe des Lagers abhängt.

5.6 LAGERBELEGUNG

In den vorangegangenen Kapiteln wurde beim Vergleich der Lagerbelegungsstrategien hauptsächlich die freie Belegung mit der gassenweisen ABC-Belegung verglichen. Der Grund hierfür wird in der näheren Betrachtung der einzelnen Lagerbelegungsstrategien deutlich. Im direkten Vergleich zwischen der freien Belegung und der ABC-Belegung innerhalb der Gasse kann festgestellt werden, dass die freie Belegung minimal bessere Werte liefert. Dieser Umstand lässt sich damit begründen, dass die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Wagen in eine Gasse fahren muss, bei beiden Lagerbelegungen gleich groß ist. Die Artikel sind statistisch gleichverteilt auf die verschiedenen Gassen verteilt, nur die Position innerhalb der Gasse ist bei der ABC-Verteilung abhängig davon, welcher Warengruppe der Artikel angehört. Da die Gasse aber in jedem Fall ganz durchfahren werden muss und ein Kommissionierwagen den anderen nicht überholen kann, macht es bei den gegebenen Parametern kaum einen Unterschied, an welcher Stelle der Gasse gehalten werden muss. Durch die ABC-Belegung sind die Haltepunkte jedoch innerhalb der Lagergasse konzentrierter, sodass es vermehrt zu Blockierungen an den gleichen Positionen kommen kann.

Auch in der näheren Analyse der Lagerbelegung wird deutlich, dass im Rahmen der einstufigen Kommissionierung die gassenweise ABC-Belegung die kürzesten AEZ realisiert. Wohingegen bei einer zweistufigen Kommissionierung, insbesondere bei Systemen ohne Quergänge, die freie Belegung häufig die bessere Alternative darstellt.

Letztlich wird deutlich, dass im Rahmen dieser Untersuchung die ABC-Belegung innerhalb der Gasse keine erfolgsversprechenden Ergebnisse erzielen konnte, sodass sie einerseits für den näheren Vergleich verschiedener anderer Alternativen nicht zwingend herangezogen werden muss. Andererseits, aus Sicht der Praxis, muss die Frage gestellt werden, in wie weit der Aufwand einer spezifischen ABC-Belegung innerhalb der Gasse gerechtfertigt ist.

5.7 BASISPOSITION

In Kapitel 5.4 wurde bereits der Basisweg näher untersucht. Um eine Vergleichbarkeit der drei Positionen zu gewährleisten, sind die einzelnen Systemgrößen ohne Basisweg jedoch mit einer Quergasse ausgestattet.

Wie bereits in diversen Untersuchungen zuvor, wird auch bei der unterschiedlichen Positionierung der Basis deutlich, dass nennenswerte Auswirkungen auf die AEZ erst mit Zunahme der Systemgröße auftreten. Die zeitliche Differenz zwischen dem besten und schlechtesten Fall bei Typ 1 liegt bei circa zwölf Minuten (07:48 h zu 07:36 h). Bei Typ 3 liegt die Differenz bei circa 30 min (03:28 h zu 02:58 h).

In Kapitel 5.4 wurde bereits die Basis Mitte links in Zusammenhang mit einem Basisweg untersucht. Dort unterlag die Basis Mitte links deutlich der Standard-Basis. Hier, im Fall ohne einen Basisweg, erreicht die Basis Mitte links insbesondere bei der zweistufigen Lagerbelegung im Vergleich die besten Leistungen.

Zusammenfassend kann bei der Positionierung der Basis ebenfalls festgestellt werden, dass mit Zunahme der Systemkomplexität (größeres System, einstufige Organisation) die Leistungsunterschiede einzelner Ausprägungen zunehmen. Allerdings muss ebenfalls hervorgehoben werden, dass die Ergebnisse der unterschiedlichen Basispositionen den bereits erlangten Erkenntnissen aus der Lagerbelegung ähneln. Auch hier wird deutlich, dass bei einer einstufigen Kommissionierung, unabhängig von der Systemgröße, eine gassenweise ABC-Belegung in den meisten Fällen die beste Lösung darstellt.

6 RELEVANZ DER PARAMETER AUF DIE SYSTEMGRÖßE

Im vorangegangenen Kapitel wurden die wesentlichen Ergebnisse der Simulationsstudie vorgestellt. Im nun folgenden Abschnitt sollen diese nochmals kurz zusammengefasst und ihr Einfluss auf die Leistungsentwicklung der drei Systemtypen beurteilt werden.

6.1 ANZAHL AN QUERGASSEN

Die Effizienz von Quergassen zeigt sich erst mit der Zunahme der Systemgröße. Der Vorteil, dass die zu durchquerende Lagergassenlänge reduziert wird und dementsprechend kürzere Wegstrecken absolviert werden müssen, wird erst ab einer bestimmten Systemgröße erkennbar.

Darüber hinaus wurde deutlich, dass die Reduzierung der AEZ von keiner Quergasse hin zu einer Quergasse im System deutlich stärker ausfällt, als bei der Erweiterung um eine zweite Quergasse. Lediglich im großen System sind minimale Reduzierungen von circa 3 % zu erkennen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei mittleren und größeren Kommissioniersystemen eine oder mehrere Quergassen Vorteile bringen können, jedoch in diesem Zusammenhang stets der Verlust der Lagerfläche miteinbezogen werden muss.

6.2 BASISWEG

Der Einfluss eines Basisweges auf die AEZ wurde an Hand von zwei Basispositionen überprüft. Allgemein konnte gezeigt werden, dass die Standard-Basis im Vergleich zur Basis Mitte links die AEZ deutlicher reduzieren kann. Des Weiteren konnte im Vergleich zur Anzahl an Quergassen keine Kausalität zwischen der Systemgröße und der Effizienz des Basisweges festgestellt werden. In diesem Zusammenhang nimmt die verfügbare Kapazität des Kommissionierwagens eine entscheidende Rolle ein. Durch die vermehrten Stopps, die durch eine größere Gesamtkapazität resultieren, ermöglicht der Basisweg eine Entzerrung des Verkehrsaufkommens, wodurch die AEZ reduziert werden kann.

6.3 ORGANISATION UND BATCHBILDUNG

Im Zuge der Ablauforganisation und folglich in der Gestaltung der Batchbildung, stellt sich meist die Frage, ob und wann sich eine zweistufige Kommissionierung lohnt. Im Rahmen der Simulationsstudie konnte eine deutliche Korrelation zwischen Systemgröße und dem Einfluss einer zweistufigen Kommissionierung festgestellt werden.

Innerhalb des Typ 1 ermöglicht eine zweistufige Kommissionierung eine Leistungssteigerung von nur circa 2 %, unabhängig von der verfügbaren Gesamtkapazität des Kommissionierwagens. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich bereits beim Lagertyp 2. Hier kann bei einer zweistufigen Kommissionierung die AEZ um bis zu 28 % reduziert werden. Am deutlichsten wird es dementsprechend beim größten Lagersystem. Dort kann durch den Schritt hin zu einem zweistufigen Ablauf die AEZ um bis zu 62 % minimiert werden.

Letztlich zeigt die Untersuchung, dass je größer das Lager ist, desto größer ist auch das Einsparpotential einer zweistufigen Kommissionierung aufgrund kürzerer Wege. Bei kleinen Lagern ist es möglich, dass die Zeit für das Zusammenführen der Auftragspositionen die Zeitersparnis übersteigt, weshalb für kleine Lager auf Grund des zusätzlichen zeitlichen Aufwandes der Auftragszusammenführung eine zweistufige Kommissionierung häufig nicht die zu erwartende Leistungssteigerung hervorbringt.

6.4 LAGERBELEGUNG

Im Rahmen der Studie wurden drei Lagerbelegungsstrategien untersucht. Hervorzuheben ist, dass sowohl bei Lagersystemen mit keiner Quergasse als auch mit einer Quergasse keine Notwendigkeit zur Anpassung der

Lagerbelegung bei steigender Systemgröße festgestellt werden konnte.

Die freie Belegung erzielt im Rahmen der zweistufigen Kommissionierung bei allen drei Systemgrößen Ergebnisse nahe dem Optimum. Im Fall der einstufigen Kommissionierung liefert die gassenweise ABC-Belegung die kürzesten AEZ.

Die ABC-Belegung innerhalb einer Gasse liefert im Vergleich zu den anderen beiden Strategien ähnliche Ergebnisse, allerdings rechtfertigt sie im Rahmen der untersuchten Lagertypen nicht den besonderen Aufwand zur Lagerbelegung. Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die Wahl der Lagerbelegung weniger von der Systemgröße abhängig ist, sondern hauptsächlich von der Ablauforganisation geprägt ist. Innerhalb dieser Anwendungsfelder sind die freie Belegung und die gassenweise ABC-Belegung ausreichend.

6.5 BASISPOSITION

Ähnlich wie bei der Lagerbelegung kann bei der Basisposition keine Notwendigkeit zur Anpassung der Position bei steigender Systemgröße identifiziert werden. Allerdings wird deutlich, dass die Differenz der einzelnen AEZ bei steigender Systemgröße deutlich zunehmen. Daher lässt sich hier keine pauschale Aussage treffen, welche Basisposition bei welcher Größe die größten Zeitgewinne erzielt. Dazu bedarf es zusätzlich der Lagerbelegungsstrategie sowie der jeweiligen Ablauforganisation. Jedoch sollte bei größeren Systemen die Basisposition stärker betrachtet werden als bei kleineren.

7 FAZIT

Das Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss verschiedener Planungsprobleme auf die Systemleistung bei variierender Systemgröße zu ermitteln. Dazu wurden zunächst drei Systemtypen mit definierten Parametern wie Lagergasenanzahl, -länge oder die Anzahl an Stopps definiert. Anschließend wurden verschiedene variable Parameter im Rahmen einer Simulationsstudie untersucht.

Es wurde deutlich, dass bestimmte Parameter (bspw. die Anzahl der Quergassen) und deren Einfluss auf die AEZ abhängig von der Systemgröße sind. Anderen Parameter hingegen kann man keinen direkten Zusammenhang zwischen Leistungsentwicklung und Systemgröße nachweisen. Dort lag zumeist eine Korrelation zwischen der Ablauforganisation (einstufig oder zweistufig) oder der Lagerbelegung vor (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5. Zusammenfassung des Einflusses der Parameter auf die AEZ in Bezug auf die Systemgröße.

	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Beeinflusst durch Ablauforganisation	Beeinflusst durch Lagerbelegung
Quergassen	○	◐	●	Nein	Nein
Basisweg	○	○	○	Nein	Ja
Organisation & Batchbildung	○	◐	●	-	Ja
Lagerbelegung	○	○	○	Ja	-
Basisposition	○	○	○	Ja	Ja

○ keinen Einfluss ◐ mittleren Einfluss ● hoher Einfluss

Letztlich konnte mit der Ausarbeitung gezeigt werden, dass kleinere Systeme zwar nicht weniger planungsintensiv sind, allerdings Änderungen in vielen Bereichen zu minimalen (positiven) Änderungen führen. Aus Gründen der Leistungsoptimierung sollte daher bei kleineren Systemen neben dem zu erwarteten Gewinn an Leistung, ebenfalls kritisch die zu leistenden finanziellen oder organisatorischen Aufwendungen gegenübergestellt werden.

Bei mittleren und großen Systemen hingegen kann es sehr wohl sinnvoll sein, bestehende Strategien kritisch zu prüfen und gegebenenfalls Anpassungen vornehmen. Eine der vielversprechendsten Ansätze ist dabei die Einführung einer zweistufigen Kommissionierung, die insbesondere bei Typ 3 zu einer erheblichen Reduzierung der AEZ geführt hat. Aber auch hier sollten vor einer abschließenden Entscheidung die notwendigen Maßnahmen, insbesondere in der Auftragszusammenführung, näher quantifiziert werden.

LITERATUR

- [AG85] Ashayeri, J.; Gelders, L. F.: Warehouse design optimization. In: European Journal of Operational Research, Jg. 21 (1985) Nr. 3, S. 285–294.
- [CMP98] Caron, F.; Marchet, G.; Perego, A.: Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems. In: International Journal of Production Research, Jg. 36 (1998) Nr. 3, S. 713–732.
- [CMP10] Caron, F.; Marchet, G.; Perego, A.: Optimal layout in low-level picker-to-part systems. In: International Journal of Production Research, Jg. 38 (2010)
- [CWQ13] Chen, F.; Wang, H.; Qi, C.; Xie, Y.: An ant colony optimization routing algorithm for two order pickers with congestion consideration. In: Computers & Industrial Engineering, Jg. 66 (2013) Nr. 1, S. 77–85.
- [GV05] Gademann, N.; Velde, S.: Order batching to minimize total travel time in a parallel-aisle warehouse. In: IIE Transactions, Jg. 37 (2005) Nr. 1, S. 63–75.
- [GRC18] Gils, T. van; Ramaekers, K.; Caris, A.; Koster, R. B.M. de: Designing efficient order picking systems by combining planning problems: State-of-the-art classification and review. In: European Journal of Operational Research, Jg. 267 (2018) Nr. 1, S. 1–15.
- [Gud12] Gudehus, T.: Logistik 2. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [Hal93] Hall, R. W.: Distance Approximations for Routing Manual Pickers in a Warehouse. In: IIE Transactions, Jg. 25 (1993) Nr. 4, S. 76–87.
- [HSB11] Hompel, M. ten; Sadowsky, V.; Beck, M.: Kommissionierung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.

- [Koc14] Koch, S.: Genetische Algorithmen für das Order Batching-Problem in manuellen Kommissioniersystemen. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014.
- [KP98] Koster, R. de; van der Poort, E.: Routing orderpickers in a warehouse: A comparison between optimal and heuristic solutions. In: IIE Transactions, Jg. 30 (1998)
- [KLR06] Koster, R. de; Le Duc, T.; Jan Roodbergen, K.: Design and Control of Warehouse Order Picking: A Literature Review. In: European Journal of Operational Research (2006), S. 481–501.
- [KG75] Kunder, R.; Gudehus, T.: Mittlere Wegzeiten beim eindimensionalen Kommissionieren. In: Zeitschrift für Operations Research, Jg. 19 (1975) Nr. 2, S. B53-B72.
- [LL19] Lorenc, A.; Lerher, T.: Effectiveness of product storage policy according to classification criteria and warehouse size. In: FME Transactions, Jg. 47 (2019)
- [RV06] Roodbergen, K. J.; Vis, I. F. A.: A model for warehouse layout. In: IIE Transactions, Jg. 38 (2006) Nr. 10, S. 799–811.
- [VAU99] Vaughan, T. S.: The effect of warehouse cross aisles on order picking efficiency. In: International Journal of Production Research, Jg. 37 (1999) Nr. 4, S. 881–897.

Dirk Kauke, M.Sc., Research assistant at the Chair for Materials Handling Material Flow Logistics at the Technical University of Munich.

Angelika Rett, Undergraduate assistant at the Chair for Materials Handling Material Flow Logistics at the Technical University of Munich.

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner, Professor and head of the Chair for Materials Handling Material Flow Logistics at the Technical University of Munich.

Kontakt:

Technische Universität München, Lehrstuhl fml,
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching, Germany,
Phone: +49 89 289 15930

E-Mail: dirk.kauke@tum.de