

Beitrag zur analytischen Leistungsermittlung von Kommissioniersystemen

von der Fakultät Maschinenbau
der Universität Dortmund
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Diplom-Ingenieur
Volker Sadowsky
aus Hamm

Berichter: Univ.-Prof. Dr. Michael ten Hompel
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Willibald A. Günthner

Dortmund, 6. Juli 2007

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen der Universität Dortmund.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Michael ten Hompel, Leiter des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen, danke ich für die Möglichkeit, diese Arbeit an seinem Lehrstuhl durchführen zu können und für die Übernahme des Referates.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Willibald. A. Günthner, Leiter des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik an der Universität München, danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Koreferates.

Allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen danke ich für die Ratschläge, die kritischen und konstruktiven Diskussionen sowie für ihre Unterstützung. Meinen studentischen Hilfskräften Jörg Zellerhoff und Eike-Niklas Jung danke ich für die intensiven Fachgespräche und Ihr persönliches Engagement.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Thomas Fender, der mich bei der Entwicklung der ersten, grundlegenden Ansätze zu dieser Arbeit maßgeblich unterstützt hat.

Meiner Frau Andrea und meinen Eltern danke ich in besonderer Weise für das Verständnis und die Unterstützung als wesentliche Voraussetzung für das Entstehen dieser Arbeit.

Dortmund, im Juli 2007

Volker Sadowsky

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	2
1.2	Zielsetzung und Abgrenzung	3
1.3	Vorgehensweise	4
2	Stand der Wissenschaft und Technik	7
2.1	Aufbau von Kommissioniersystemen	8
2.1.1	Materialflusssystem	9
2.1.2	Organisationssystem	11
2.1.3	Informationsfluss	14
2.2	Teilsysteme in Kommissioniersystemen	15
2.2.1	Lagersystem	16
2.2.2	Fördersystem	21
2.2.3	Sortier- und Verteilsysteme	26
2.2.4	Grundtypen der Kommissionierung	31
2.3	Strategien zur Leistungssteigerung	38
2.3.1	Einlagerstrategien	38
2.3.2	Wegstrategien	39
2.4	Publizierte Berechnungsverfahren	44
3	Berechnungsgrundlagen	47
3.1	Einflussgrößen der Kommissionierleistung	47

3.2	Richtlinien und Normen	50
3.3	Leistungsermittlung von Lagersystemen	52
3.4	Leistungsermittlung von Förderelementen	61
3.4.1	Förderelemente vom Typ (1/1)	62
3.4.2	Förderelemente vom Typ (m/n)	62
3.4.2.1	Stochastische Abfertigung	66
3.4.2.2	Schubweise Abfertigung	68
3.4.2.3	Vorfahrt	69
3.5	Leistung von Sortier- und Verteilanlagen	72
4	Berechnungsverfahren	77
4.1	Berechnungsansatz	77
4.2	Ermittlung von Bearbeitungszeiten	82
4.2.1	Methoden der Zeitermittlung	84
4.3	Ermittlung der Zusammenführungszeit	88
4.3.1	Mann-zur-Ware	88
4.3.1.1	Ermittlung des Basisweges	101
4.3.1.2	Berechnung des Gassenwechselweges	102
4.3.1.3	Berechnung des Gassenweges	103
4.3.2	Ware-zum-Mann	112
4.3.2.1	Bereitstellsystem – Vollautomatische Lager	112
4.3.2.2	Fördersystem	115
4.3.2.3	Sortier-und Verteilsystem	117
4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	118
5	Validierung und Bewertung	121
5.1	Validierung des Berechnungsverfahrens	122
5.1.1	Gleichverteilung – Validierung des Simulationsmodells	123
5.1.2	Exponentialverteilung	133
5.2	Approximation durch Exponentialverteilungen	139

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	IX
5.2.1 Realdaten 1	141
5.2.2 Realdaten 2	145
5.3 Bewertung des Berechnungsverfahrens	149
6 Anwendung des Berechnungsverfahrens	151
6.1 Systembeschreibung	151
6.2 Berechnung der Kommissionierleistung	152
6.3 Untersuchung von Systemvarianten	158
7 Zusammenfassung und Ausblick	161
8 Verzeichnisse	165
9 Anhang	189

Kapitel 1

Einleitung

Durch die immer stärker werdende Notwendigkeit zur Rationalisierung und Kosteneinsparung in Unternehmen zur Sicherung der Konkurrenzfähigkeit gegenüber anderen Marktteilnehmern kommt dem Materialflusssystem und insbesondere dem Kommissioniersystem in der Warendistribution ein immer höherer Stellenwert als Träger dieser Einsparungs- und Optimierungspotenziale zu.

Bei der Planung eines Kommissioniersystems stellt sich daher die Aufgabe, die förder- und lagertechnischen Komponenten dieser Systeme und die damit verbundenen Betriebsstrategien kostenoptimal an die Anforderungen des Marktes, die sich in der Artikel- und Auftragsstruktur sowie den geforderten Auftragsdurchlaufzeiten widerspiegeln, anzupassen.

Da sich die Anforderungen des Marktes in immer kürzeren Zeitabständen verändern, muss ein Kommissioniersystem gleichzeitig eine möglichst hohe Flexibilität aufweisen. Um in diesem Spannungsfeld eine für das Unternehmen optimale Lösung zu finden, werden unterschiedliche Lösungsvarianten entwickelt, die dann im Rahmen einer Nutzwertanalyse nach kundenspezifischen Kriterien bewertet werden.

Bei der Entwicklung unterschiedlicher Lösungsvarianten muss der Planer für jedes System prüfen, ob die Leistungsanforderungen erfüllt werden. Dabei ist er bestrebt, die Leistung unter Berücksichtigung aller real nutzbaren Optimierungspotenziale zu ermitteln, um so eine möglichst kostengünstige Lösung zu finden. Die Leistungsermittlung erfolgt im Rahmen der Grobplanungsphase aufgrund der vielfältigen Realisierungsmöglichkeiten in der Regel mit Hilfe analytischer Methoden.

1.1 Ausgangssituation

Die Berechnung der Leistungsfähigkeit eines Kommissioniersystems ist von vielen unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängig. Bei der Berechnung kann zwischen der Kommissionierung nach dem Prinzip *Ware-zum-Mann (WzM)*, welches auch als konventionelle Kommissionierung bezeichnet wird, und dem Prinzip *Mann-zur-Ware (MzW)* unterschieden werden [Arn05].

Bei der Bestimmung der Leistung von MzW-Systemen geht es im Wesentlichen um die Bestimmung der Wegstrecke, die der Kommissionierer bei der Zusammenstellung eines Auftrags zurücklegt [Kun75]. In der Literatur existiert eine Vielzahl von Veröffentlichungen, die die Berechnung der Kommissionierleistung für eindimensionale WzM-Systeme unter Berücksichtigung unterschiedlicher Restriktionen beschreiben [Kun75, Sch96, Car98, Hwa04]. Vielfach wird vorausgesetzt, dass die Zugriffshäufigkeiten auf die Lagerplätze eines Kommissionierlagers gleichverteilt sind.

Diese Annahme wird in vielen Fällen nicht erfüllt. Häufig werden in der Praxis die Artikel mit hohen Zugriffshäufigkeiten am Gassenanfang positioniert und Artikel mit geringeren Zugriffshäufigkeiten am Gassenende [Pet99]. In Kombination mit der richtigen Wegstrategie kann so die mittlere Wegstrecke des Kommissionierers reduziert werden. Die Annahme gleichverteilter Zugriffe auf die Lagerfächer trifft allerdings in diesem Fall nicht mehr zu.

Berechnungsmodelle, die die Einlagerstrategie nach der Zugriffshäufigkeit in MzW-Systemen berücksichtigen, sind aufgrund einschränkender Bedingungen nicht auf jedes Kommissioniersystem übertragbar oder liefern nur Lösungen für ausgewählte Wegstrategien des Kommissionierers [Hal93, Car98, Car00, Hwa04]. Das bedeutet, dass kein analytisches Berechnungsverfahren existiert, mit dem die Leistungsfähigkeit konventioneller Kommissioniersysteme ohne wesentliche Einschränkungen ermittelt werden kann.

WzM-Systeme bestehen in der Regel aus förder- und lagertechnischen Teilsystemen, die je nach Anforderungsprofil miteinander kombiniert werden. Die Leistungsfähigkeit der einzelnen Teilsysteme kann durch bekannte analytische Verfahren ermittelt werden [Gro84, Arn05, Gud04]. Die Leistung des Kommissioniersystems kann allerdings nicht unmittelbar aus der Leistungsfähigkeit der Teilsysteme abgeleitet werden, da sich Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen ergeben, die bei der Leistungsbestimmung berücksichtigt werden müssen.

In der Planung werden diese Wechselwirkungen im Einzelfall geprüft und so die Teilsysteme aufeinander abgestimmt. Die Vorgehensweise und Darstellung bei der Überprüfung ist dem Planer in der Regel freigestellt, da keine Richtlinien oder Normen bezüglich des Verfahrens existieren.

1.2 Zielsetzung und Abgrenzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines allgemeinen, teilsystemübergreifenden Berechnungsalgorithmus für die Leistungsermittlung von Kommissioniersystemen. Der Algorithmus soll die Leistungsermittlung systematisieren und so eine einheitliche Vorgehensweise liefern. Dabei sind die Wechselwirkungen der Teilsysteme in WzM-Systemen und in zweistufigen Kommissioniersystemen zu berücksichtigen.

In vielen Fällen wird die erste Stufe zweistufiger Kommissioniersysteme durch ein eindimensionales MzW-System realisiert. Aber auch in anderen Kommissioniersystemen ist das Prinzip MzW ein wesentlicher Bestandteil (Inverse Kommissionierung, Pick-to-Belt). Um mit Hilfe des Berechnungsalgorithmus die Leistung eines allgemeinen Kommissioniersystems zu ermitteln, ist die Kenntnis der Kommissionierleistung des MzW-Systems von wesentlicher Bedeutung.

Aufgrund der oben beschriebenen Einschränkungen bestehender Lösungsverfahren für eindimensionale MzW-Systeme ist es ein wesentliches Ziel dieser Arbeit, ein Berechnungsverfahren zu entwickeln, das alle leistungsrelevanten Parameter berücksichtigt und die Restriktionen bestehender Lösungsansätze auflöst.

Die Berechnungsverfahren für Teilsysteme von Kommissioniersystemen sind größtenteils in der Literatur beschrieben [Gud73, Gro84, Arn05, Gud04]. Die Ergebnisse der jeweiligen Berechnungen können allerdings nicht direkt in den Berechnungsalgorithmus übernommen werden. Die Ableitung der bestehenden Formeln in eine Form, die die direkte Übertragung der Ergebnisse auf den Berechnungsalgorithmus erlaubt, stellt einen Bestandteil der Arbeit dar.

Der Berechnungsalgorithmus wird auf die Ermittlung der reinen Kommissionierleistung beschränkt. Somit finden Nachschubprozesse bei der Berechnung der Leistung keine Berücksichtigung. Es wird davon ausgegangen, dass die erforderlichen Nachschubprozesse ohne Beeinflussung der Kommissionierung durchgeführt werden. Zudem werden die nachgelagerten Prozesse der Kommissionierung wie Verpackung, Konsolidierung und Versand nicht berücksichtigt.

1.3 Vorgehensweise

Der Aufbau von Kommissioniersystemen und die Beschreibung der systemtechnischen Grundlagen führen in Kapitel 2 in die Thematik ein und dienen als Basis der weiteren Betrachtungen. Es folgt die Darstellung der wesentlichen Inhalte der Richtlinien, die sich unmittelbar mit Kommissioniersystemen beschäftigen. Zudem werden die Richtlinien zur Leistungsermittlung einzelner Gewerke eines Kommissioniersystems diskutiert. Im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit werden anschließend die unterschiedlichen Bausteine von Kommissioniersystemen dargestellt und die in der Praxis vorkommenden Grundtypen der Kommissionierung vorgestellt, die die Basis des allgemeinen Berechnungsalgorithmus bilden. Die Beschreibung der leistungsbeeinflussenden Strategien bildet einen weiteren Schwerpunkt des Kapitels. Abschließend werden die in der Literatur bekannten Verfahren zur Berechnung der Kommissionierleistung zusammenfassend dargestellt und gegeneinander abgegrenzt.

In Kapitel 3 werden zunächst der Leistungsbegriff im Zusammenhang mit Kommissioniersystemen definiert und die leistungsbeeinflussenden Größen spezifiziert. Anschließend werden die Methoden zur Leistungsermittlung der förder- und lagertechnischen Teilsysteme, die Bestandteil eines Kommissioniersystems sein können, ausführlich beschrieben.

In Kapitel 4 wird zunächst ein systemübergreifender Berechnungsalgorithmus aufgestellt, der die Vorgehensweise zur Leistungsbestimmung eines allgemeinen Kommissioniersystems beschreibt. Im Rahmen dieses Berechnungsalgorithmus wird ein neues Berechnungsverfahren für die Kommissionierung nach dem Prinzip MzW entwickelt, mit dem die Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Lagerstrategie, der Wegstrategie, der Artikelstruktur und der Auftragsstruktur analytisch ermittelt werden kann. Die aus Kapitel 3 bekannten Berechnungsformeln zur Leistungsermittlung der Teilsysteme werden so weiterentwickelt, dass sie unmittelbar in den allgemein formulierten Berechnungsalgorithmus übernommen werden können, damit eine geschlossene Berechnungssystematik für ein allgemeines Kommissioniersystem entsteht.

Die Validierung des neu entwickelten Berechnungsverfahrens für MzW-Systeme erfolgt in Kapitel 5. Hier werden die Ergebnisse mit den Werten einer Simulationsstudie für drei unterschiedliche Kommissioniersysteme verglichen und bewertet. Dabei wird für jedes Kommissioniersystem die Anzahl der Auftragspositionen zwischen eins und 50 variiert. Im Rahmen weiterer Untersuchungen wird geprüft, welche Genauigkeit bei den Berechnungen der Kommissionierleistung konventioneller Kommissioniersysteme erzielt werden, wenn die Artikelzugriffshäufigkeit durch eine Exponentialverteilung approximiert wird.

In Kapitel 6 werden der allgemeine Berechnungsalgorithmus zur Leistungsermittlung

von Kommissioniersystemen auf ein konkretes Beispiel angewendet und die einzelnen Schritte der Berechnungen erläutert. Eine abschließende Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Ausblick auf weiterführende Untersuchungen erfolgen in Kapitel 7.

Kapitel 2

Stand der Wissenschaft und Technik

Die Kommissionierung ist die zentrale, wertschöpfende Funktion der Warendistribution. Sie stellt selbst in modernen Logistiksystemen einen der kostenintensivsten Bereiche dar [tH03]. Dies ist im Wesentlichen auf den hohen Personalanteil zurückzuführen, der sich aufgrund der komplexen Handhabungsprozesse ergibt. Jedes Unternehmen ist daher bestrebt, den Einsatz des Personals so effizient wie möglich zu gestalten.

Bei der Kommissionierung werden Artikel aus dem Sortiment des Herstellers oder Handelsunternehmens nach Kundenwunsch in unterschiedlicher Art und Menge zusammengestellt, um anschließend an den Kunden versandt zu werden. In der VDI-Richtlinie 3590 wird der Begriff Kommissionieren wie folgt definiert [VDI94a]:

Kommissionieren hat das Ziel, aus einer Gesamtmenge von Gütern (Sortiment) Teilmengen auf Grund von Anforderungen (Aufträge) zusammenzustellen.

Dabei handelt es sich um die schwierigste Aufgabe der innerbetrieblichen Logistik [Gud04]. Dies lässt sich insbesondere auf die vielfältigen Möglichkeiten bei der Realisierung der Kommissionieraufgabe zurückführen. Hinzu kommt, dass Kommissionieren häufig in Distributionszentren des Handels durchgeführt wird und dort, aufgrund der durch die Zunahme des E-Commerce voranschreitenden Sendungsgrößendegression und der gestiegenen zeitlichen Anforderungen, viele Aufträge innerhalb von kurzer Zeit bearbeitet werden müssen. Dies verdeutlicht die zunehmende Bedeutung von effizienten und leistungsfähigen Kommissioniersystemen im heutigen Warenfluss.

Zur Durchführung der Kommissionierung werden die Artikel in Bereitstellungseinheiten in einem speziell für diesen Zweck betriebenen Kommissionierlager bevorratet. Unter einer Bereitstellungseinheit versteht man nach [tH06]

eine Einheit, mit der dem Kommissionierer die (Artikel-) Einheiten zur Entnahme angeboten werden. Die Bereitstellungseinheit ist in vielen Fällen nicht die Lagereinheit oder Ladeeinheit.

Das Kommissionierlager bildet zusammen mit allen organisatorischen, informatischen und technischen Mitteln zur Erfüllung der Kommissionieraufgabe das sogenannte Kommissioniersystem. Das Kommissioniersystem wird unter anderem durch die Eigenschaften der Artikel (Abmessungen, Gewicht etc.) und der geforderten Kommissionierleistung bestimmt. Die Kommissionierleistung wird dabei wie folgt definiert [Gud73]:

Die Kommissionierleistung eines Systems ist gleich der mittleren Anzahl Positionen, die maximal pro Stunde kommissioniert werden können.

Um den beschriebenen Anforderungen gerecht zu werden, müssen Kommissioniersysteme immer an den Einzelfall angepasst werden. Die Vielzahl der unterschiedlichen, zum Teil gegenläufigen Anforderungen führt dazu, dass unterschiedliche Systemvarianten die gestellten Anforderungen erfüllen können.

Unabhängig von der Realisierungsform lassen sich Kommissioniersysteme in drei Bereiche unterscheiden: das Materialflusssystem, die Organisationsform und den Informationsfluss [tH03]. Die Aufgaben und Funktionen dieser Bereiche sind Gegenstand des folgenden Kapitels. Im Anschluss daran werden die wesentlichen materialflusstechnischen Teilsysteme, aus denen sich Kommissioniersysteme zusammensetzen, vorgestellt und erläutert. Aufgrund der Anordnung und Kombination der Teilsysteme lassen sich in der Praxis acht wesentliche Typen von Kommissioniersystemen identifizieren. Diese Typen und ihre spezifischen Eigenschaften, insbesondere in Bezug auf die Leistungsfähigkeit, werden in Kapitel 2.2 beschrieben. Abschließend werden Strategien vorgestellt, die eingesetzt werden, um die Leistungsfähigkeit eines Kommissioniersystems unter den jeweiligen Randbedingungen zu optimieren.

2.1 Aufbau von Kommissioniersystemen

Grundsätzlich lassen sich Kommissioniersysteme in drei wesentliche Bereiche untergliedern [tH03]:

- Materialflusssystem
- Organisation
- Informationsfluss

Diese Teilsysteme sind Bestandteil eines jeden Kommissioniersystems und lassen sich in Anlehnung an Jünemann/Schmidt und ten Hompel/Schmidt weiter spezifizieren [Jün99, tH03].

2.1.1 Materialflusssystem

Das Materialflusssystem realisiert den physischen Warentransport innerhalb des Kommissioniersystems. Zur Beschreibung dieser Vorgänge werden materialflusstechnische Einheiten unterschieden. Alle innerhalb des Kommissioniersystems bevorrateten Güter werden als Lagereinheiten bezeichnet. Sie stellen den Bestand des Lagers dar. Werden diese zur Entnahme angeboten, bezeichnet man sie als Bereitstelleinheiten. Eine Bereitstelleinheit besteht wiederum aus mehreren Entnahmeeinheiten. Dabei beschreibt eine Entnahmeeinheit die Menge eines Artikels, die der Kommissionierer bei einem Zugriff aus der Bereitstelleinheit entnimmt.

Durch die Bearbeitung eines Kommissionierauftrags, bei der mehrere Entnahmeeinheiten eines Artikels oder mehrere unterschiedliche Artikel zusammengestellt werden, entsteht die Sammel- bzw. Kommissioniereinheit.

Besteht ein Kommissionierauftrag aus mehreren Kommissioniereinheiten, so werden diese zu einer Versandeinheit zusammengefasst. Die Versandeinheit stellt somit die Summe aller Artikel eines Auftrags dar.

Die physische Kommissionierung setzt sich aus den folgenden Grundfunktionen zusammen [Jün99]:

- Bewegung der Güter zur Bereitstellung
- Bereitstellung
- Fortbewegung des Kommissionierers zur Bereitstellung
- Entnahme der Güter durch den Kommissionierer
- Transport der Entnahmeeinheit zur Abgabe
- Abgabe der Entnahmeeinheit
- Transport der Kommissioniereinheit zur Abgabe
- Abgabe der Kommissioniereinheit
- Rücktransport der angebrochenen Ladeinheit

Anhand des in Abbildung 2.1 dargestellten morphologischen Kastens lassen sich durch die Kombination einzelner Elemente Strukturen und Lösungen für Kommissioniersysteme erarbeiten bzw. beschreiben. Bei der Kombination der Elemente ist darauf zu achten, dass sich entweder der Kommissionierer zur Ware bewegt (MzW), oder die Ware zum Kommissionierer (WzM). Der eigentliche Kommissionierprozess beginnt mit der

Kommissioniervorgang	Realisierungsmöglichkeiten			
	Bewegung der Güter zur Bereitstellung	keine Bewegung	Bewegung	
1-dimensional			2-dimensional	3-dimensional
manuell			mechanisiert	automatisiert
Bereitstellung	statisch		dynamisch	
	zentral		dezentral	
	geordnet	teilgeordnet	ungeordnet	
Fortbewegung des Kommissionierers zur Bereitstellung	keine Fortbewegung	Fortbewegung		
		1-dimensional	2-dimensional	3-dimensional
		manuell	mechanisiert	automatisiert
Entnahme der Güter durch den Kommissionierer	manuell	mechanisiert	automatisiert	
	Einzelstückgut		Sammelstückgut	
Transport der Güter zur Abgabe	kein Transport	Transport		
		Kommissionierer		Fördermittel
		1-dimensional	2-dimensional	3-dimensional
		manuell	mechanisiert	automatisiert
Abgabe der Güter	statisch		dynamisch	
	zentral		dezentral	
	geordnet	teilgeordnet	ungeordnet	
Transport der Kommissioniereinheit zur Abgabe	kein Transport	Transport		
		Kommissionierer		Fördermittel
		1-dimensional	2-dimensional	3-dimensional
		manuell	mechanisiert	automatisiert
Abgabe der Kommissioniereinheit	statisch		dynamisch	
	zentral		dezentral	
	geordnet	teilgeordnet	ungeordnet	
Rücktransport der angebrochenen Ladeinheit	kein Rücktransport	Rücktransport ins Lager		Rücktransport ins Anbruchlager
		1-dimensional	2-dimensional	3-dimensional
		manuell	mechanisiert	automatisiert

Abbildung 2.1: Grundfunktionen des Materialflusssystems in der Kommissionierung nach [Jün99]

Bereitstellung der zu kommissionierenden Artikel. Diese kann sowohl statisch als auch dynamisch erfolgen. Bei der statischen Bereitstellung verbleibt die Bereitstellereinheit zwischen der Ein- und Auslagerung an einem Ort, das heißt z. B. in einem Regalfach. Bei dynamischer Bereitstellung wird die Bereitstellereinheit zum Entnahmeort befördert und anschließend zurückgelagert [tH03].

Aus der räumlichen Ausprägung der Bereitstellung lassen sich zwei grundlegende Prin-

zipien ableiten. Bei zentraler Bereitstellung findet die Artikelbereitstellung an einem örtlich festen Punkt oder zumindest an einem räumlich stark begrenzten Ort statt (z. B. zwei bis drei nebeneinander liegende Paletten). Wird die Ware vom Lagerort zum Bereitstellort befördert, spricht man von *WzM-Systemen*. Werden die Waren hingegen an mehreren unterschiedlichen (dezentralen) Orten bereitgestellt, ist eine Bewegung des Kommissionierers zur Ware erforderlich. Daraus leitet sich das Prinzip *MzW* ab.

Die Bewegung des Kommissionierers kann in MzW-Systemen auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Hierbei wird unterschieden, ob sich die Person manuell, d. h. zu Fuß, mechanisch mit Hilfe eines Flurförderzeuges oder automatisiert als passiver Mitfahrer auf einem automatischen Flur- oder Regalförderzeug bewegt. Bei konventionellen Systemen bewegt sich der Kommissionierer typischerweise eindimensional horizontal in der Ebene, das heißt er verbleibt während des gesamten Kommissionierprozesses am Boden. Werden Kommissionierstapler eingesetzt, mit denen auch Lagerplätze in größeren Höhen angesprochen werden können, spricht man von einer zweidimensionalen Kommissionierung.

Die Entnahme einer Lagereinheit kann nach Art der Bewegung in manuell, mechanisch und automatisch unterschieden werden. Bei manueller Entnahme greift ein Mensch nach der Entnahmeeinheit, bei mechanischer eine Maschine, deren Grundfunktionen vom Menschen gesteuert werden. Bei automatischer Entnahme erfolgt diese selbstständig ohne menschlichen Eingriff durch entsprechende Automaten.

Der Transport der Entnahmeeinheit zur Abgabe richtet sich nach der räumlichen Anordnung von Kommissionierplatz und Abgabeort. Bei räumlicher Trennung der Orte ist ein Transport erforderlich. Dieser kann vom Kommissionierer selbst oder von einem vom Kommissionierer unabhängigen Fördermittel durchgeführt werden. Die Unterscheidung erfolgt analog zu der Bewegung des Kommissionierers. Die unmittelbare Abgabe der Entnahmeeinheit auf einen Stetigförderer ohne vorherigen Transport wird auch als *Pick-to-Belt* bezeichnet.

Die Abgabe der Entnahmeeinheit lässt sich analog zur Bereitstellung in statisch-dynamisch und zentral-dezentral unterscheiden. Bei zentraler Abgabe bekommt jeder Kommissionierer eine feste Basis zugeordnet, an der die Ware abgegeben wird und die Rundfahrten gestartet und beendet werden. Bei dezentraler Abgabe gibt der Kommissionierer die Ware immer an der nächsten freien Basis ab und beginnt dort mit dem folgenden Rundlauf [Jün99].

2.1.2 Organisationssystem

Die Funktionalität und Leistungsfähigkeit eines Kommissioniersystems hängt neben der Wahl eines geeigneten Material- und Informationssystems insbesondere vom Organisa-

tionssystem ab [Jün99]. Das Organisationssystem kann in die Aufbauorganisation, die Ablauforganisation und die Betriebsorganisation gegliedert werden [tH03].

Abbildung 2.2 stellt die Gliederung und die entsprechenden Kriterien der Realisierung dar. Die Aufbauorganisation (Infrastruktur) wird von den Eigenschaften der Artikel

ORGANISATIONSSYSTEM				
Teilsysteme	Kriterien	Realisierungsmöglichkeiten		Bestimmungsfaktoren (Beispiele)
Aufbauorganisation	Zonenaufteilung	einzonig	mehrzonig	Artikeleigenschaft baul. Gegebenheiten
Ablauforganisation	Sammeln	nacheinander	gleichzeitig	Durchlaufzeit Mengendurchsatz
	Entnahme	artikelorientiert	auftragsorientiert	Zugriffshäufigkeit
	Abgabe	artikelorientiert	auftragsorientiert	Auftragsgröße Auftragsvolumen
Betriebsorganisation	Auftragssteuerung	ohne Optimierung	mit Optimierung	Personalbedarf Versandart Systemleistung

Abbildung 2.2: Morphologischer Kasten, Organisationssystem [VDI94a]

bestimmt [VDI94a]. Artikel mit gleichen Eigenschaften werden zu Gruppen in Kommissionierzonen zusammengefasst. Eine Kommissionierzone ist eine räumliche Einheit von Artikeln, für die häufig eine spezielle Kommissioniertechnik eingesetzt wird. Für die Zonenbildung ist nicht die Struktur des einzelnen Auftrags maßgeblich, sondern Merkmale wie physikalische Artikeleigenschaften oder der mengenmäßige Umschlag [VDI94a].

Außerdem kann eine Teilung auch durch bauliche Gegebenheiten erforderlich sein. Die Bildung der Zonen kann einerseits durch Teilung des Gesamtsystems in Kommissioniermodule erfolgen, andererseits können die einzelnen Kommissioniermodule weiter in mehrere Zonen untergliedert werden, wobei für alle Zonen üblicherweise dieselbe Technik verwandt wird. Ein Beispiel hierfür ist eine Gruppierung der Artikel innerhalb eines Kommissioniermoduls nach ihrem mengenmäßigen Umschlag und die entsprechende räumliche Einteilung nach diesen Gruppen. Die diversen Vorteile eines mehrzonigen Systems (z.B. hohe Systemleistung oder optimierte Raumausnutzung) stehen unter anderem einer verringerten Übersichtlichkeit, einem höheren Steuerungsaufwand und einem aufwendigeren Materialfluss gegenüber. Dementsprechend werden kleinere Systeme mit homogenen Anforderungen eher einzonig, größere Systeme mit großer Artikel- und Zugriffsmenge eher mehrzonig ausgeführt [Jün99].

Die Ablauforganisation bestimmt, wie ein Kommissionierauftrag eine oder mehrere Kommissionierzonen durchläuft und zusammengestellt wird. Sie wird im Allgemeinen durch die Struktur der Aufträge bestimmt. Es wird zwischen serieller und paralleler sowie zwischen artikelweiser und auftragsweiser Bearbeitung der Kommissionieraufträge

unterschieden [tH03].

Seriell/parallel

Serielle Bearbeitung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein Auftrag nacheinander an verschiedenen Stationen bearbeitet wird. Ein Auftrag wird folglich niemals zeitgleich von mehreren Kommissionierern bearbeitet, wie es bei der parallelen Bearbeitung der Fall ist.

Die Parallelbearbeitung wird durch ein Aufteilen des Kommissionierauftrags in Teilaufträge ermöglicht. Dem durch die Teilung entstehenden höheren Aufwand steht eine schnellere Bearbeitung der Aufträge, insbesondere bei großen Systemen gegenüber.

Auftragsweise/artikelweise

Auftragsweise bzw. artikelweise Bearbeitung bezeichnet die Art der Erzeugung der Kommissionierlisten aus den Kundenaufträgen [Jün99]. Bei auftragsweiser Bearbeitung wird ein Kommissionierauftrag unmittelbar aus dem Kundenauftrag abgeleitet, indem lediglich die lagerspezifischen Informationen hinzugefügt werden und ggf. eine Änderung der Reihenfolge vorgenommen wird. Es besteht folglich ein direkter Bezug zwischen beiden Aufträgen. Eine weitere Konsolidierung ist in der Regel nicht erforderlich. Daher wird diese Form der Kommissionierung auch als *einstufige Kommissionierung* bezeichnet.

Als auftragsparallele Kommissionierung versteht man die gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Kunden- oder Kundenteilaufträge in verschiedenen Kommissionierzonen [tH06]. Das bedeutet, dass sowohl das gleichzeitige Kommissionieren mehrerer Kundenaufträge in einer Kommissionierzone durch einen Kommissionierer (Sortieren beim Kommissionieren) als auch das gleichzeitige Kommissionieren von Teilaufträgen eines Kundenauftrags in unterschiedlichen Kommissionierzonen (zonenparallele Kommissionierung) der auftragsparallelen Kommissionierung zuzuordnen sind [tH03].

Der unmittelbare Bezug zwischen Kunden- und Kommissionierauftrag besteht bei artikelweiser Kommissionierung nicht. Dabei werden mehrere Kundenaufträge in der Form zusammengefasst, dass gleiche Artikel übergeordnet für alle Kundenaufträge durch einen Kommissionierauftrag entnommen werden. Diese müssen in einem zweiten Schritt den jeweiligen Kundenaufträgen zugeordnet bzw. konsolidiert werden. Daher wird diese Form auch als *zweistufige Kommissionierung* bezeichnet.

Die Betriebsorganisation steuert die zeitliche Reihenfolge, in der ein oder mehrere Kommissionieraufträge in das Kommissioniersystem eingesteuert werden. Aber auch die Verteilung des Personals auf unterschiedliche Kommissionierzonen, die Einschleusung von Eilaufträgen oder die Auslösung von Nachschubaufträgen sind Bestandteile der Betriebsorganisation [tH03].

2.1.3 Informationsfluss

Der Informationsfluss besitzt einen wesentlichen Einfluss auf die Funktionalität und Effizienz eines Kommissioniersystems, da ohne zeitgerechte, vollständige, fehlerfreie und bedarfsgerechte Informationsbereitstellung nicht die geforderte Kommissionierleistung erbracht werden kann [Jün99]. Um die Aktualität und Fehlerfreiheit der Informationen zu gewährleisten, sind zudem eine Erfassung des Systemzustandes und eine Bestandsfortschreibung erforderlich.

Es lassen sich vier Grundfunktionen definieren [VDI94a]:

- Erfassung der Kundenaufträge
- Aufbereiten der Kundenaufträge
- Weitergabe des Kommissionierauftrags
- Quittierung der Kommissionierung

Die Bereitstellung der Informationen eines Kundenauftrages muss in einer Form erfolgen, die der Kommissionierer schnell und zuverlässig verarbeiten kann. Bei den übermittelten Informationen handelt es sich um Informationen zur Artikelidentifikation, zur Bestell- bzw. Entnahmemenge und zum zugehörigen Entnahmeort. Diese Informationen bilden zusammen eine Auftragsposition. Mehrere Auftragspositionen bilden einen Kommissionierauftrag.

Je nach Kommissioniersystem werden die Kommissionieraufträge unterschiedlich aufbereitet. Entspricht ein Kundenauftrag einem Kommissionierauftrag, dann wird ggf. nur die Reihenfolge der Positionen auf dem Kommissionierauftrag an den Laufweg des Kommissionierers angepasst. Werden mehrere Kundenaufträge zu einem Kommissionierauftrag zusammengefasst, muss unterschieden werden, ob der Kommissionierer den Bezug zum Kundenauftrag erkennen kann (Sortieren beim Kommissionieren) oder ob die Zuordnung der Artikel zum Kundenauftrag erst in einer nachgeschalteten Sortierstufe durchgeführt wird.

Die Weitergabe der Information an den Kommissionierer kann in Form eines Papierbogens (mit Beleg) oder elektronisch (ohne Beleg) erfolgen.

Die beleglose, elektronische Weitergabe ist in der Praxis auf unterschiedliche Arten durchführbar. Gängige Systeme sind die Bereitstellung der Informationen auf mobilen Datenterminals mit und ohne Datenfunkverbindung, auf Anzeigen, die an den Regalen angebracht sind (Pick-to-Light) oder durch computerbasierte Sprachsteuerung des Kommissionierers (Pick-by-Voice).

Der Vorteil der beleglosen gegenüber der papierbasierten Informationsbereitstellung liegt in der Minimierung des Aufwandes für die Auftragsadministration. Tätigkeiten wie beispielsweise das Sortieren von Listen entfallen. Alle Formen der drahtlosen Informationsweitergabe haben zudem den Vorteil, dass der Kommissionierer nicht zwangsläufig einen bestimmten Punkt anlaufen muss, um neue Aufträge entgegenzunehmen.

2.2 Teilsysteme in Kommissioniersystemen

Jedes Kommissioniersystem besteht mindestens aus einem Lager, in dem die Lagereinheiten bevorratet werden. Wird die zu kommissionierende Ware direkt am Lagerplatz entnommen, bewegt sich also der Kommissionierer nach den Anweisungen der Pickliste von einem Lagerplatz zum anderen, dann spricht man von konventionellen Kommissioniersystemen bzw. von der Kommissionierung nach dem Prinzip MzWare [tH06]. Wird die zu kommissionierende Ware in einer Bereitstellereinheit zum Kommissionierer transportiert, spricht man von WzM-Systemen [tH06].

In zweistufigen Kommissioniersystemen werden die Prozesse der Entnahme und der Zusammenstellung der Kundenaufträge in zwei separaten Schritten durchgeführt. Die Zuordnung der Artikel zu den Kundenaufträgen in der zweiten Stufe wird in der Regel mit vollautomatischen Sortier- und Verteilanlagen realisiert. Die Wegstrecken zwischen den Funktionsbereichen werden in WzM-Systemen in den meisten Fällen von Stetigförderern realisiert, um die Leistungsfähigkeit der Kommissioniersysteme zu gewährleisten.

Betrachtet man eine Vielzahl von Kommissioniersystemen, dann lassen sich die drei Teilsysteme Lager, Stetigförderer und Sortier- und Verteilanlage identifizieren (Abb. 2.3). Dabei ist die Lagertechnik notwendiger Bestandteil jedes Kommissioniersystems. Die Stetigfördertechnik sowie die Sortier- und Verteiltechnik werden dagegen nur bei bestimmten Realisierungsformen eingesetzt. Neben den genannten Teilsystemen findet man weitere Gewerke in Kommissioniersystemen, die aber in der Regel sehr spezielle Lösungen darstellen und daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit eines Kommissioniersystems muss zunächst die Leistung der Teilsysteme ermittelt werden, bevor die wechselseitigen Einflüsse der Teilsysteme und deren Auswirkung auf die Gesamtleistung eines Kommissioniersystems untersucht werden können. Die Berechnungsalgorithmen werden dabei maßgeblich durch die Realisierungsform der Teilsysteme beeinflusst. Zur Charakterisierung der Teilsysteme werden nachfolgend ihre wesentlichen Aufgaben und Merkmale beschrieben und die für die Leistungsermittlung notwendigen Systematisierungen dargestellt.

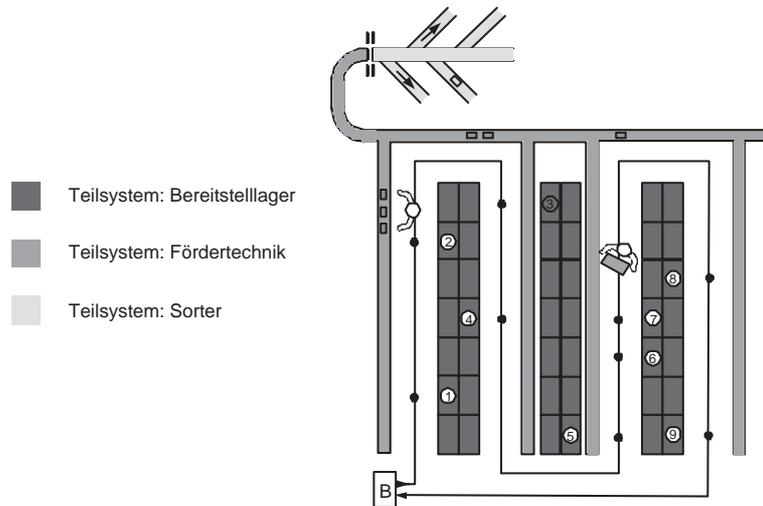


Abbildung 2.3: Teilsysteme in einem zweistufigen Pick-to-Belt Kommissioniersystem

2.2.1 Lagersystem

Das Lagersystem bildet den Kern eines jeden Kommissioniersystems. Die VDI-Richtlinie 2411 definiert Lagern als jedes geplante Liegen von Arbeitsgegenständen im Materialfluss. Ein Lager beschreibt einen Raum oder eine Fläche zum Aufbewahren von Stück- und/oder Schüttgut, das mengen- und/oder wertmäßig erfasst wird. Es erfüllt die Funktionen des Speicherns, Pufferns und Distribuierens im logistischen Gesamtsystem und dient entsprechend dem Wechsel der Zusammensetzungsstruktur oder der Überbrückung der Zeitdauer zwischen Zu- und Abgang der gelagerten Güter [VDI70].

Gründe für den Betrieb eines Lagers sind [Jün99]

- diskontinuierliche Zu- und Abgänge (z. B. zwischen Fertigung und Distribution),
- Mengenausgleich (z. B. bei der Fertigung wirtschaftlicher Losgrößen),
- Sicherstellung der Auslastung kostenintensiver Produktionsanlagen (bei Ausfällen, Lieferengpässen, außerbetrieblichen Transportproblemen),
- Nutzung kostenoptimierter Bestellmengen durch Gewährung von Rabatten,
- Schwankungen im Absatzverhalten (saisonbedingt),
- Lagerung zur Wertsteigerung oder zwecks spekulativer Absichten,
- Erfüllung von Zusatzaufgaben (z. B. Bereitstellung zur Kommissionierung),
- Schaffung eines hohen Lieferservice durch schnelle Befriedigung von Aufträgen.

Die spezifischen Anforderungen an ein Lagersystem in der Kommissionierung können durch verschiedene technische Lösungen erfüllt werden. Zur Systematisierung dieser technischen Systeme bestehen unterschiedliche Ansätze [Jün99, Pfo00, Mar04a]. Im Rahmen dieser Arbeit hat sich die Systematik nach Jünemann als sinnvoll erwiesen. Sie dient daher als Basis für die weiteren Ausführungen. Diese konzentrieren sich auf die Lagersysteme, die in Kommissioniersystemen Verwendung finden.

Lager lassen sich anhand der ihnen zugewiesenen Aufgabe in verschiedene Typen wie Vorrats-, Puffer-, Verteil-, Umschlag- und Sammlager unterscheiden [Jün99]. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art der Tätigkeit in einem Lager. Besteht das Lager nur aus Ladeeinheiten, deren Zusammensetzung sich zwischen der Ein- und Auslagerung nicht verändert, so wird das Lager als Einheitenlager bezeichnet. Es dient z.B. als Nachschublager für Kommissionierlager oder als Distributionslager. Ein Einheitenlager ist leicht zu automatisieren und wird zum Beispiel als Hoch-, Flach- oder Kompaktlager für Paletten und Behälter realisiert [Mar04b]. Werden die Ladeeinheiten ausgelagert, um Teilmengen nach vorgegebener Bedarfsinformation aus der bereitgestellten Gesamtmenge zu entnehmen und anschließend wieder ins Lager einzulagern, dann liegt ein Kommissionierlager vor [Jün99]. Eine typische Zuordnung der Lagersystemtechnik zu den erwähnten Lagertypen lässt sich nicht treffen. Die eingesetzte Technik ist entsprechend dem jeweiligen Anwendungsfall zu wählen [Jün99].

Neben der Unterscheidung nach Art der Aufgabe eines Lagers, kann eine Lagersystematisierung anhand vieler Unterscheidungskriterien festgesetzt werden [Jün99], zum Beispiel

- Lagergut (Form, Größe, Temperatur; z. B. Stückgutlager, Schüttgutlager, Langgutlager, Kühllager),
- Stellung im Produktionsprozess (Rohmaterial-, Fertigwarenlager),
- Gefahrenklassen (Gefahrgutlager),
- Art des Betriebes (Handelslager, Industrielager),
- Art der Distributionsstruktur (Zentrallager – dezentrales Lager),
- Art der lagerbezogenen Tätigkeiten (z. B. Kommissionierlager).

Diese Gliederungstypen reichen für eine vollständige Systematisierung nicht aus, da für alle eine Vielzahl von Realisierungsmöglichkeiten existiert.

In der Literatur werden als grundlegende Klassifizierungsmerkmale für Lager die Lagergutart, die Lagerbauweise, die Lagermittel und die Fördermittel im Lager angeführt [Jün99, Gud04, Blo97].

Das zu lagernde Artikelspektrum kann nach der Gutart in Stück- und Schüttgut unterschieden werden und hierdurch Einfluss auf die einzusetzende Lagertechnik ausüben. In Kommissionierlagern werden ausschließlich Stückgüter bevorratet. Daher werden im Weiteren ausschließlich Lagertypen für Stückgut betrachtet.

Stückgutlager werden zum einen nach der Lagerbauweise und zum anderen nach dem Lagermittel unterschieden. Die Lagerbauweise lässt sich in offene oder überdachte Freilager und in Lager in Gebäuden einteilen. Zur Leistungsermittlung eines Lagers ist ausschließlich die Unterscheidung nach den Lagermitteln von Bedeutung. Daher wird sie nachfolgend näher beschrieben.

Bei der Systematik der Lagermittel wird zunächst zwischen der Bodenlagerung und der Regallagerung unterschieden [tH03]. Bodenlagerung wird bis auf wenige Ausnahmen vor allem bei stapelfähigen Ladeeinheiten angewendet, um auf mehreren Ebenen übereinander lagern und die Hallenhöhe besser nutzen zu können. Die Bodenlagerung ist eine statische Lagerungsform, das heißt, dass die Lagereinheit während der gesamten Lagerdauer ihre Position innerhalb des Lagers nicht verändert. Das Bodenlager kann als Boden-Blocklager oder Boden-Zeilenlager ausgeführt werden.

Im Bereich der Kommissionierung muss die Entnahme von Teilmengen von jeder Lagereinheit gewährleistet sein. Daher können die Lagereinheiten nicht gestapelt werden. Auch eine Blocklagerung schließt den Zugriff auf jede Lagereinheit aus. In der Kommissionierung wird daher die Bodenlagerung nur als Zeilenlagerung in einer Ebene realisiert. Das bedeutet, dass der Ladungsträger auf dem Fußboden abgestellt wird und direkt vom Ladungsträger kommissioniert werden kann. Abbildung 2.4 zeigt ein typisches Boden-Zeilenlager in einem Kommissioniersystem, das nach dem Prinzip MzW arbeitet.

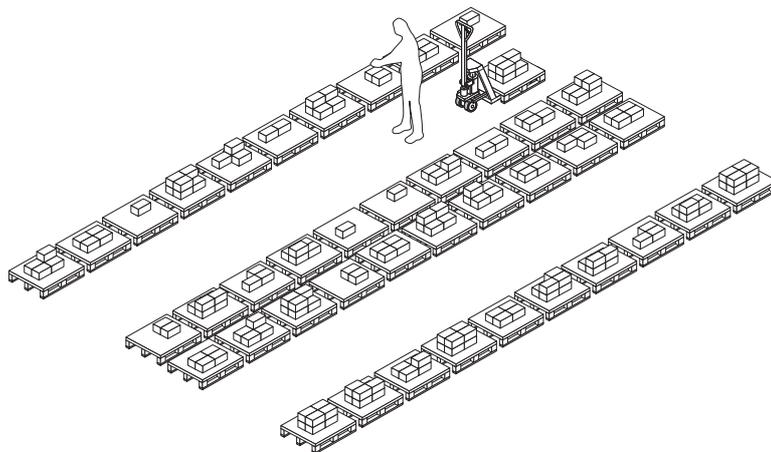


Abbildung 2.4: Boden-Zeilenlager in der Kommissionierung

Bei der Regallagerung wird in statische und dynamische Lagerung unterschieden.

Die statische Regallagerung wird dort eingesetzt, wo größere Höhen im Lager realisiert oder mehrere Ladeeinheiten übereinander mit direktem Zugriff gelagert werden sollen. Die Ausführung der Regale ist in entsprechenden Richtlinien beschrieben [ZH103]. Die statischen Regallager werden prinzipiell nach ihrer Anordnung in Block- und Zeilenlagerung unterschieden. Für die Regalblock- und Regalzeilenlagerung gilt im Grundsatz bezüglich der Lagereinheitenverfügbarkeit und der Volumen- und Flächennutzung das Gleiche wie für die Bodenblock- und Bodenzeilenlagerung.

Zu den Lagermitteln der Blockregallagerung gehören die Durchfahr- und Einfahrregale sowie die Kanalregale mit Satellit [Jün99]. Diese drei Lagertypen werden häufig auch als Kompaktlager bezeichnet [Fis97, tH06]. Im Gegensatz zu den Kanallagern sind Einfahrregale und Durchfahrregale staplerbediente Lagersysteme. Die Ladeeinheiten können zudem nicht beliebig in den jeweiligen Ebenen eines Kanals eingelagert werden. Es muss darauf geachtet werden, dass die übereinander liegenden Kanäle gleich belegt sind, damit eine Ein- und Auslagerung durch den Stapler möglich ist. Der Zugriff auf Teilmengen der Ladeeinheiten ist nur sehr bedingt möglich. Daher werden diese Lagertypen in Kommissioniersystemen hauptsächlich als Nachschublager eingesetzt und haben damit keinen unmittelbaren Einfluss auf den Kommissionierprozess.

Zeilenregallagerung ist die am häufigsten vorkommende Lagerform in der Industrie. Sie besteht aus Doppelregalen, die durch einen Bediengang getrennt sind [Jün99]. Für die Stückgutlagerung mit Ladehilfsmitteln werden Paletten- oder Behälterregale als Lagermittel eingesetzt (Abb. 2.5). Die Güte- und Prüfbestimmungen für Palettenregale bis



Abbildung 2.5: Behälterregal für die Kommissionierung [Quelle: Bito]

zu einer Höhe von zwölf Metern werden durch das Deutsche Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung in entsprechenden Richtlinien geregelt [RAL00].

In vollautomatischen Kleinteilelagern (AKL), die vielfach in WzM-Systemen eingesetzt

werden (Abb. 2.6), reichen die Gewichte pro Ladeinheit von wenigen Kilogramm bis zu ca. 300 kg. Normkunststoff- oder Stahlblechbehälter dienen als Ladungsträger. Mit Hilfe



Abbildung 2.6: Automatisches Kleinteilelager [Quelle: KTL]

eines Regalbediengerätes werden die Ladungseinheiten ein- bzw. ausgelagert. Die Lastbehandlung erfolgt entweder mit einem Teleskoptisch, Magnetgreifern oder mit Auszugs- und Vakuum-Technik.

Sind die Regale feststehend und können die Ladeinheiten im Regal bewegt werden, so spricht man von dynamischer Lagerung. Das Merkmal dieser Lagerkategorie ist der ausnahmslos blockförmige Aufbau. Die dynamischen Blocklager entsprechen in ihrer Form den Kanallagern [Jün99]. Die Dynamik wird durch Schwerkraft oder elektrische Energie erreicht. Bei einseitiger Bedienung nennt man sie Einschubregallager; ist die Bedienung beidseitig möglich, werden sie Durchlaufregallager genannt [Jün99].

In Durchlauf- und Einschubregalen mit angetriebenen Stetigförderern erfolgt die Lagerung der Ladeinheiten auf Rollen-, Ketten- oder Bandförderern, die in mehreren Ebenen übereinander horizontal angeordnet sind. Wird eine Ladeinheit entnommen, können die anderen Ladeinheiten über die Stetigförderer nachgeschoben werden. Im Gegensatz zum schwerkraftbetriebenen Durchlaufregal können auch schwere Güter stau-drucklos gelagert werden.

In schwerkraftbetriebenen Durchlauf- und Einschubregalen werden die Kanäle mit Rollenförderer oder Röllchenbahnen ausgestattet (Abb. 2.7). Hauptsächlich wird dieser Lagertyp in MzW-Systemen eingesetzt. Wird eine Entnahmeeinheit entnommen, rutschen die nächsten Entnahmeeinheiten direkt nach. Erfolgt die Lagerung in Behältern, muss die Entsorgung entstehender Leerbehälter gewährleistet sein.



Abbildung 2.7: Schwerkraftdurchlaufregallager [Quelle: SSI Schäfer]

2.2.2 Fördersystem

Der Transport zwischen den verschiedenen Funktionsbereichen in einem Kommissioniersystem kann manuell (MzW) oder mit Hilfe von Stetigförderern wie z. B. Rollen- oder Bandförderern (WzM) erfolgen.

Stetigförderer lassen sich nach der Anzahl der Quellen und Senken unterscheiden. Liegt eine einfache Quelle-Senke-Beziehung vor, ist eine weitere Unterteilung nach der Art der Transportaufgabe sinnvoll. Hier lassen sich Förderelemente, die die translatorische Bewegung des Fördergutes realisieren, und Förderelemente, mit denen ein Orientierungswechsel (Eckumsetzer), eine Richtungsänderung (Drehteller) oder eine Hubbewegung (Hubtisch) realisiert wird, differenzieren.

Förderelemente, die mehrere Quellen und/oder Senken aufweisen, werden als Transportknoten bezeichnet. Transportknoten sind Förderelemente, an denen mehrere Materialströme zu einem Strom zusammengeführt werden (Sammelelement) oder ein Materialstrom in mehrere Teilströme aufgeteilt wird (Verteilelement). Kreuzen sich mehrere Materialströme in einem Punkt, weist der Transportknoten mehrere Ein- und Ausgangsströme auf. Solche Förderelemente werden in DIN 15 201 Teil 2 als Zubehörgeräte von Stetigförderern bezeichnet [DIN81].

Ein Transportknoten hat allgemein E_m Eingangspunkte mit $m = 1, 2, 3, \dots$, und A_n Ausgangspunkte mit $n = 1, 2, 3, \dots$. Alle Ströme durchlaufen den gemeinsamen Konfliktbereich, wodurch theoretisch jeder Eingang mit jedem Ausgang verbunden sein kann. Somit gibt es $m \cdot n = k$ mögliche Materialströme. Für jeden der $1, 2, 3, \dots, k$ Materialströme kann die Materialstromstärke λ_i [1/h] mit $i = 1, 2, 3, \dots, k$ angegeben

werden. Fließen nur Objekte der Stromrichtung i durch den Knoten, befindet er sich in der Betriebsart i [Gro84].

Transportknoten sind durch den Typ und die Ordnung eindeutig gekennzeichnet. Der Typ eines Knotens gibt die Anzahl der eingehenden Ströme m und die Anzahl der ausgehenden Ströme n in der Form (m/n) an. Ist $m > 1$ und $n = 1$, liegt ein Sammelement vor, ist $m = 1$ und $n > 1$, handelt es sich um ein Verteilelement (Abb. 2.8). Für den

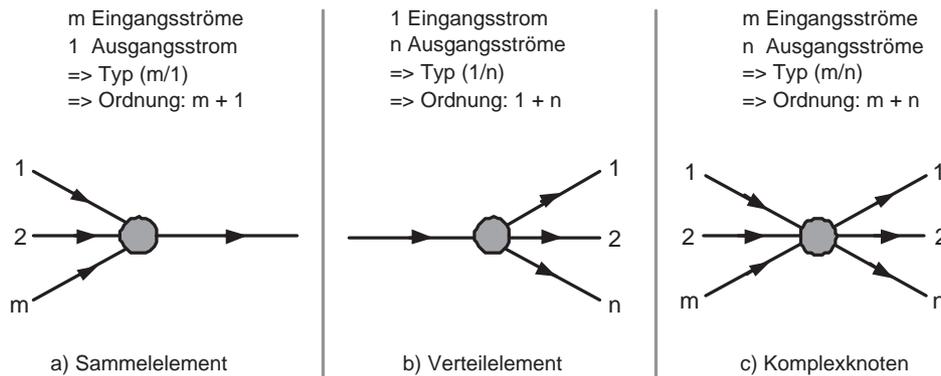


Abbildung 2.8: Sammel- und Verteilelemente

Komplexknoten gilt $m > 1$ und $n > 1$. Die Ordnung wird durch die Summe der ein- und ausgehenden Ströme, d. h. $m + n$ definiert [Gro84].

Allgemein kann ein Transportknoten als Konfliktbereich bezeichnet werden, um dessen Nutzung mehrere Objekte konkurrieren. Betrachtet man m Quellen und n Senken eines Materialflusssystem, die von einem einzigen Transportmittel bedient werden, so kann man auch dieses System als irreduziblen Transportknoten der Ordnung $m + n$ vom Typ (m/n) auffassen.

Abbildung 2.9 zeigt einen Verteilwagen, der $m = 2$ Eingangsströme auf drei Förderer verteilt. In diesem Fall stellt der Verteilwagen den Konfliktbereich dar.

Jedes Objekt beansprucht den Konfliktbereich für einen bestimmten Zeitraum. Entspricht die Zwischenankunftszeit der ankommenden Objekte genau der Beanspruchungszeit, so wird der Konfliktbereich zu 100 % ausgelastet und damit der theoretisch maximale Durchsatz erreicht. Ziel ist es daher, die mittlere Zwischenankunftszeit der Objekte zu ermitteln, bei der ein Konfliktbereich gerade zu 100 % ausgelastet ist.

Der maximale Durchsatz eines Transportknotens ist von einer Vielzahl Faktoren abhängig. Dazu zählen das Verhältnis der Materialstromstärken, das maßgebend für die Anzahl der Umschaltungen pro Zeiteinheit ist, die technische Ausführung des Knotens und die Strategie, nach der eine Zusammenführung durchgeführt wird. Hinsichtlich der technischen Ausführung von Transportknoten werden drei Arten unterschieden [Gud75]:

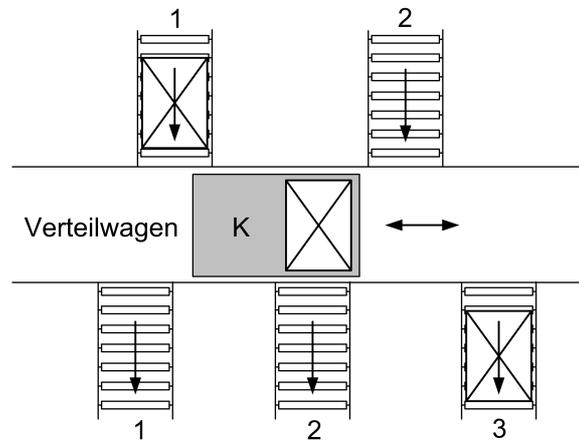


Abbildung 2.9: Transportknoten mit Verteilwagen vom Typ (2/3)

- stetig
- unstetig
- halbstetig

Bei der stetigen Abfertigung kann der Konfliktbereich in jeder Betriebsart i mit konstanter Geschwindigkeit durchfahren werden. Abhängig von der eingesetzten Fördertechnik muss ein Mindestabstand zwischen den Transporteinheiten eingehalten werden, um Kollisionen zwischen den beförderten Objekten bei der Kurvenfahrt oder beim Überwinden von Steigungen zu vermeiden. Der erforderliche Abstand kann mit Hilfe der geometrischen Abmessungen ermittelt werden. Er entspricht in der Regel dem gleichen Abstand wie bei einfachen Förderabschnitten. Typische Beispiele stetiger Weichen der Ordnung 3 sind Eisenbahnweichen oder Weichen von Einschienenhängebahnsystemen. Stetige Transportknoten der Ordnung 4 können mit einer Rollenschwenkweiche realisiert werden (Abb. 2.10).

Die unstetige Abfertigungsart zeichnet sich durch eine systembedingte Unterbrechung des stetigen Flusses aus. Das bedeutet, dass alle Objekte beim Durchlauf des Konfliktbereichs mindestens einmal ihre Geschwindigkeit in Bewegungsrichtung auf 0 [m/s] reduzieren müssen. Weiterhin wird die unstetige Abfertigung dadurch charakterisiert, dass der Transportstrom einer Richtung den Konfliktbereich nicht geschlossen passieren kann. Die Anzahl der Objekte, die einen unstetigen Transportknoten gleichzeitig nutzen können, ist von der technischen Ausführung abhängig und wird durch die Kapazität c beschrieben. Abbildung 2.11 zeigt ein unstetiges Verzweigungselement in Form eines Kettenausgleichers mit der Kapazität $c = 1$ und einen Drehtisch mit Rollenbahn mit der Kapazität $c = 2$. In der Praxis werden in der Regel Kapazitäten von maximal drei Objekten realisiert, weil sich bei größeren Kapazitäten keine Steigerung des Durchsatzes

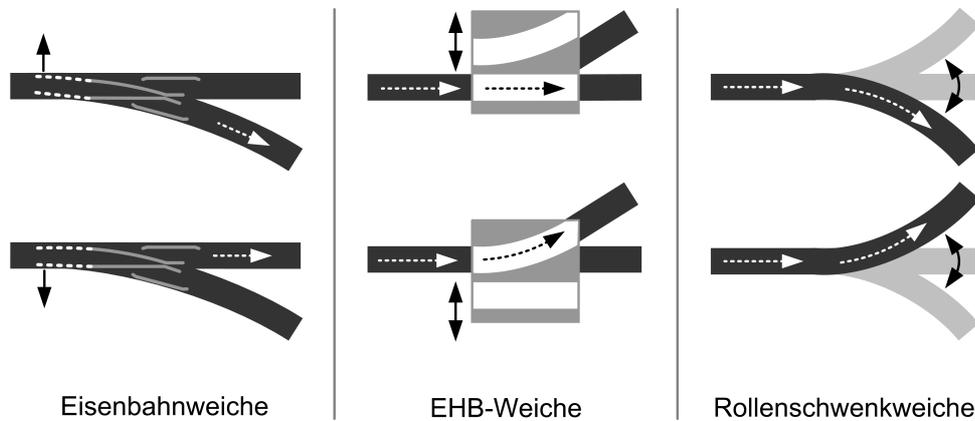


Abbildung 2.10: Stetige Transportknoten der Ordnung 3 und 4

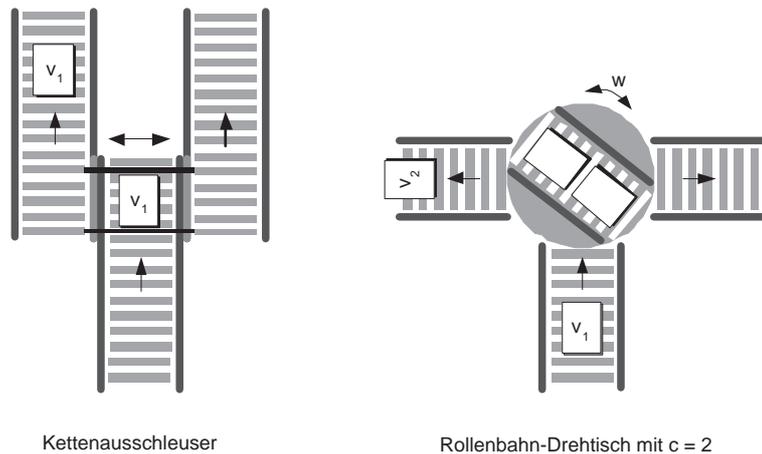


Abbildung 2.11: Beispiele für die unstetige Abfertigung

mehr erzielen lässt. Der Durchsatz kann sich sogar gegenüber $c = 1$ verringern, wenn die Kapazität des Konfliktbereichs nur sehr selten ausgenutzt wird.

Die halbstetigen Transportknoten bestehen aus stetigen und unständigen Transportrichtungen. Sie besitzen in der Regel eine stetige und mindestens eine unständige Abfertigungsrichtung. Die angegebene Kapazität bezieht sich bei der halbstetigen Abfertigung nur auf die unständigen Richtungen (Abb.2.12).

Bei allen drei technischen Ausführungen muss bei der Zusammenführung mehrerer Ströme die Reihenfolge, in der die Objekte unterschiedlicher Richtungen den Transportknoten durchfahren, festgelegt werden. Es werden drei Basisstrategien bei der Reihenfolgebildung unterschieden [Gro84]:

- stochastisch

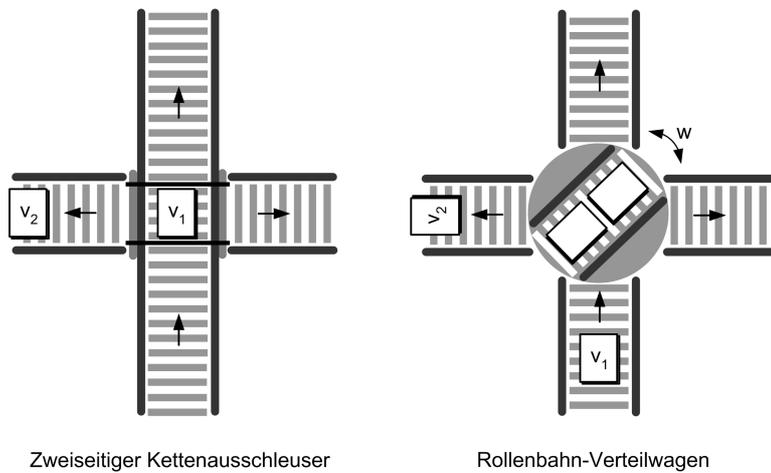


Abbildung 2.12: Beispiele für die halbstetige Abfertigung

- schubweise
- Vorfahrt

Die stochastische Abfertigung entspricht dem FIFO-Prinzip. Das Objekt, das als erstes Anspruch auf einen Konfliktbereich signalisiert, wird auch als erstes Objekt abgefertigt. Ist der Konfliktbereich beim Eintreffen des Objektes belegt, wird ein Zeitstempel vergeben, der bei der weiteren Reihenfolgebildung verwendet wird. Die stochastische Abfertigung hat besondere Bedeutung für Verteilelemente. Da der ankommende Strom in seiner Zusammensetzung der Objekte für Richtung i und j in der Regel nicht beeinflussbar ist und Reihenfolgeänderungen vor dem Konfliktbereich aus technischen Gründen nicht möglich sind, entspricht die Abfertigung dieses Stroms der stochastischen Abfertigung bei Zusammenführungen.

Bei der schubweise festen Abfertigung wird jedem ankommenden Strom ein festes Zeitintervall zur Nutzung des Konfliktbereichs zur Verfügung gestellt. Während der zugewiesenen Zeitspanne hat der entsprechende Strom das alleinige Zugriffsrecht auf den Konfliktbereich. Nach Ablauf der vorgesehenen Zeitspanne t_1 erhält der nächste Strom Zugriff auf den Konfliktbereich. Das vorgesehene Zeitintervall t_2 muss dabei nicht gleich t_1 sein. Für den Fall, dass kein Objekt des aktuell zugewiesenen Stroms vorliegt, wird kein Objekt abgefertigt. Erst, wenn das Zeitintervall abgelaufen ist, können Objekte der anderen Richtungen bearbeitet werden. Dieses Prinzip entspricht dem einer Ampelsteuerung. Um einen möglichst hohen Durchsatz zu erzielen, sollte das Verhältnis der Zuteilungszeiten dem Verhältnis der Stromstärken entsprechen. Dieses Ziel wird automatisch erreicht, wenn die schubweise variable Abfertigung angewendet wird.

Bei der schubweise variablen Abfertigung erfolgt, analog zur schubweise festen Abfertigung, die Zuteilung einer festen Zeitspanne für jede Stromrichtung. Liegt während

der zugeteilten Zeitspanne kein Objekt mehr vor, das den Konfliktbereich durchfahren möchte, wird dem aktuellen Strom das Zugriffsrecht entzogen, und der nächste Strom kann für das ihm zugeteilte Zeitintervall auf den Konfliktbereich zugreifen.

Das festgelegte Zeitintervall begrenzt somit ausschließlich die maximale Zugriffszeit auf den Konfliktbereich.

Liegen Ströme mit unterschiedlichen Prioritäten vor, wird häufig die Vorfahrtstrategie eingesetzt. Hierbei werden die Ströme in Haupt- und Nebenströme eingeteilt. Der Hauptstrom hat die Priorität eins und ist gegenüber dem Nebenstrom vorfahrtberechtigt. Die Abfertigung des Nebenstroms kann nur dann erfolgen, wenn kein Objekt des Hauptstroms den Konfliktbereich für sich beansprucht

Es wird in absolute und relative Vorfahrt unterschieden. Bei der absoluten Vorfahrt dürfen die Objekte des Hauptstroms keinen zeitlichen Verzug durch Objekte des Nebenstroms erfahren. Das bedeutet, dass ein Objekt des Nebenstroms nur dann in den Konfliktbereich einfahren kann, wenn sichergestellt ist, dass während der gesamten Durchfahrt des Objektes, inklusive der erforderlichen Umschaltzeit, kein Objekt des Hauptstroms den Konfliktbereich für sich beansprucht.

Bei relativer Vorfahrt können Objekte des Nebenstroms den Konfliktbereich passieren, wenn an den Eintrittspunkten der Hauptströme keine Objekte bereit stehen. Beim Eintreffen eines Objektes aus dem Nebenstrom werden die Eintrittspunkte der Hauptströme überprüft, und ggf. bekommt der Nebenstrom die Berechtigung, den Konfliktbereich zu durchqueren. Die Entscheidung, ob ein Objekt des Nebenstroms in den Konfliktbereich einfahren darf, ist von der verfügbaren Zeit zwischen zwei Objekten des Hauptstroms abhängig.

2.2.3 Sortier- und Verteilsysteme

Sortier- und Verteilanlagen, die auch als Stückgut-Sortiersysteme bezeichnet werden, sind immer häufiger Bestandteil moderner Logistiksysteme. Die VDI-Richtlinie 3619 definiert Stückgut-Sortiersysteme wie folgt [VDI83]:

Stückgut-Sortiersysteme sind Anlagen bzw. Einrichtungen zum Identifizieren von in ungeordneter Reihenfolge ankommendem Stückgut aufgrund vorgegebener Unterscheidungsmerkmale und zum Verteilen auf Ziele, die nach den jeweiligen Erfordernissen festgelegt werden.

Typische Einsatzgebiete sind Produktionssysteme, Distributionssysteme mit Lager und Kommissionierung, Cross-Docking im Handel und KEP-Dienste [VDI98b]. Zudem sind Gepäckumschlaganlagen in Flughäfen und die Briefsortierung als typische Einsatzfelder zu nennen [Jod06].

In Distributionssystemen mit Lager und Kommissionierung, die den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellen, sind Sortier- und Verteilanlagen notwendiger Bestandteil der zweistufigen Kommissionierung. In der ersten Stufe werden die Artikel für mehrere Aufträge zu einem Batch zusammengefasst und artikelbezogen entnommen. In der zweiten Stufe werden diese Artikel dann auftragsbezogen sortiert (vgl. Kapitel 2.1). Das bedeutet, dass jedem Kundenauftrag eine Endstelle der Sortieranlage zur Verfügung gestellt werden muss. Da die Anzahl der Kundenaufträge, die innerhalb eines Tages bearbeitet werden, die Anzahl der Endstellen in der Regel überschreitet, erfolgt in diesem Fall eine dynamische Zuordnung der Endstellen zu den Kundenaufträgen [Jod06].

Jede Sortier- und Verteilanlage lässt sich in fünf Funktionsbereiche unterteilen [Jod06]. Jeder Funktionsbereich fasst dabei mehrere Teilfunktionen zusammen. Abbildung 2.13 zeigt die fünf Hauptfunktionen und die zugehörigen Unterfunktionen.

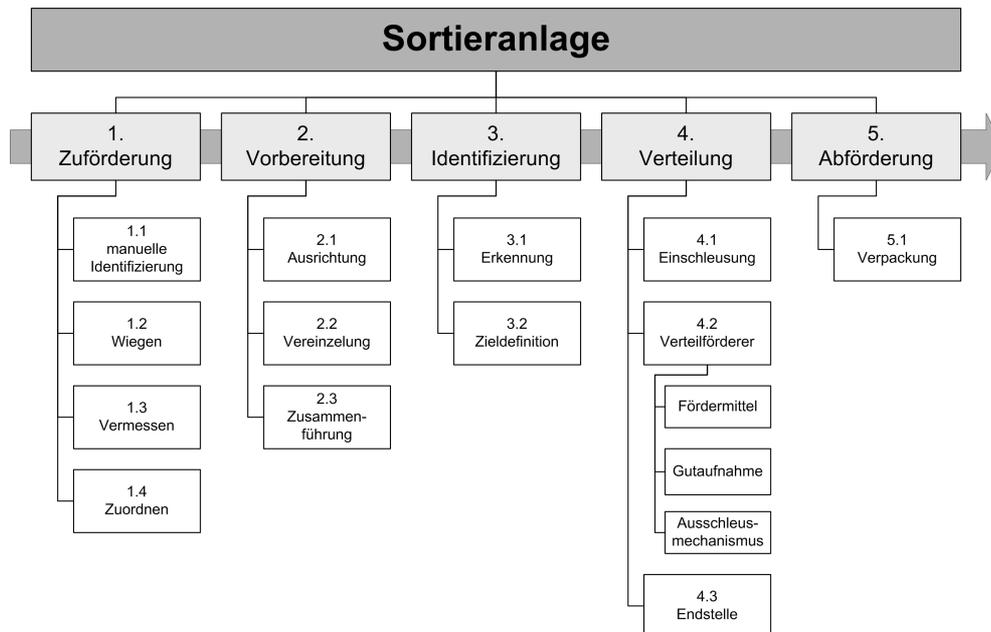


Abbildung 2.13: Aufbau einer Sortieranlage [Jod06]

Die Zuförderung stellt die Eingangsschnittstelle der Sortieranlage dar. Ist sie Bestandteil eines komplexen Materialflusssystem, dann ist es die Aufgabe der Zuförderung, die unterschiedlichen Arbeitscharakteristiken zwischen der vorgelagerten Materialflusstechnik und der Sortieranlage auszugleichen [tH03].

Im Rahmen der Zuförderung kann optional die Identifikation, das Wiegen und Vermessen des Sortiergutes erfolgen [Jod06].

Unter dem Funktionselement *Vorbereitung* werden die Zusammenführung, Ausrichtung und die Vereinzeln der zu sortierenden Güter zusammengefasst. Die Zusammenfüh-

nung dient dazu, einen definierten Materialstrom zu erhalten, sodass die folgenden Materialflussoperationen gezielt auf ein Packstück angewendet werden können.

Die Vereinzelung folgt der Zusammenführung des Gutstroms und ist in der Regel mit einer Abstandsvergrößerung verbunden. Diese wird im einfachsten Fall dadurch erreicht, dass das Gut von einem langsam laufenden Stetigförderer auf einen schnell laufenden Stetigförderer übergeben wird. Weitere Verfahren zur Abstandserzeugung werden in der Literatur beschrieben [Jod06].

Ist der geforderte Abstand zwischen den Gütern eingestellt, muss das Gut zur Einschleusung in die richtige Orientierung gebracht werden, damit es nach der Einschleusung entsprechend platzoptimal auf dem Sorter liegt. In Abhängigkeit vom eingesetzten Sorter kann das längs-, aber auch querorientiert sein.

Nachdem die Güter vereinzelt und ausgerichtet sind, erfolgt die Identifizierung. Die Identifizierung wird in die Gutererkennung und die Zielzuweisung unterteilt. Die Gutererkennung wird in 70 % der Fälle über Barcodes realisiert. Aber auch RFID-Chips werden immer häufiger eingesetzt [Jod06]. Die Zuordnung einer Endstelle erfolgt im Rechner, da sie zum Teil komplexe Zuordnungsalgorithmen beinhaltet.

Die Verteilung der Güter auf die Endstellen wird durch die Verteilanlage bzw. den Sorter realisiert. Zur Verteilanlage gehören die Einschleusung, der Verteilförderer und die Ausschleusung.

Die Einschleusung wird in manuell, teilautomatisiert und vollautomatisiert unterschieden. Die Leistung steigt dabei mit zunehmendem Automatisierungsgrad. Grundsätzlich werden zwei Verfahren zur Einschleusung eingesetzt, die *Stop-and-go-Einschleusung* und die *Durchlaufeinschleusung*. Bei der Stop-and-go-Einschleusung wartet das Gut vor dem Beschleunigungsband, bis eine freie Position auf dem Sorter vorhanden ist, und wird dann eingeschleust (vgl. Straßenverkehr Stoppschild). Bei der Durchlaufeinschleusung wird das Gut durch einzeln regelbare Förderer auf die Geschwindigkeit des Sorters gebracht und auf einen freien Platz des Sorters eingeschleust (vgl. Straßenverkehr Autobahnauffahrt) [Jod06].

Der Verteilförderer ist das Kernelement eines Sortiersystems. Die wesentlichen Merkmale und Eigenschaften sowie die Bezeichnung des Gesamtsystems werden durch die Gestaltung und Konstruktion des Verteilförderers geprägt.

Die Klassifizierung der Verteilförderer kann anhand verschiedener Merkmale erfolgen. Die *strukturorientierte Klassifizierung* differenziert in *Linien-, Ring* und *Kreisstruktur* (Abb. 2.14). Welche Struktur realisiert wird, hängt von der Auftragsstruktur, der eingesetzten Technik und von der zur Verfügung stehenden Fläche ab.

Ein weitere Möglichkeit der Differenzierung besteht in der Leistungsfähigkeit. Da die

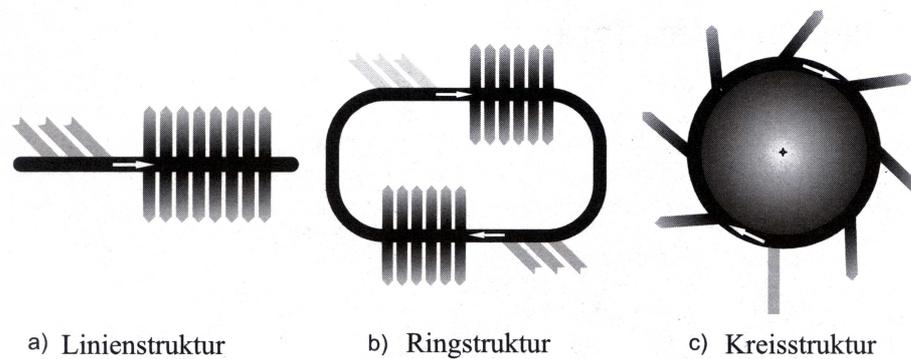


Abbildung 2.14: Strukturvarianten von Verteilförderern

Leistung eines Sorters von vielen Parametern abhängt, ist eine eindeutige Zuordnung eines Sortertyps zu einer Leistungsklasse nicht möglich. Trotzdem lassen sich Leistungsklassen identifizieren, denen sich bestimmte Sortertypen zuweisen lassen. In der Literatur unterscheidet man in [Jod06]

- Handsortierung,
- automatische Sortierung geringer Leistung 1.000–5.000 [Stück/h],
- automatische Sortierung mittlerer Leistung 5.000–10.000 [Stück/h],
- automatische Hochleistungssorter >10.000 [Stück/h].

Nach dieser Klassifizierung ergeben sich drei Leistungsbereiche für automatische Verteilförderer, die eine schnelle Zuordnung eines Sorters erlauben, da sich in diesen Klassen auch der technische Aufwand und die Investitionskosten widerspiegeln [Jod06]. Abbildung 2.15 zeigt verschiedene Sortertypen und gibt typische Leistungsbereiche an.

In der Literatur wird häufig eine technikorientierte Klassifizierung vorgenommen [VDI98b, Jün99]. Die Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Systeme sind in [Jün99, tH03, Jod06] ausführlich beschrieben und werden daher an dieser Stelle nicht weiter spezifiziert. Die Endstellen des Verteilers stellen einen der wichtigsten Planungsbereiche der Sortieranlage dar. Bis zu 50 % des Gesamtinvests der Mechanik und 60–70 % des Flächenverbrauchs sind den Endstellen zuzuordnen [Jod06]. Die Endstellen sind in der Regel individuelle, dem Gutspektrum und den Platzverhältnissen angepasste Lösungen. Größe und Anzahl der Endstellen hängen maßgeblich von der Sortieraufgabe ab. Die VDI-Richtlinie 3312 definiert vier wesentliche Aufgaben einer Endstelle [VDI98b]:

- die schonende und zuverlässige Abförderung des Sortiergutes vom Sorter

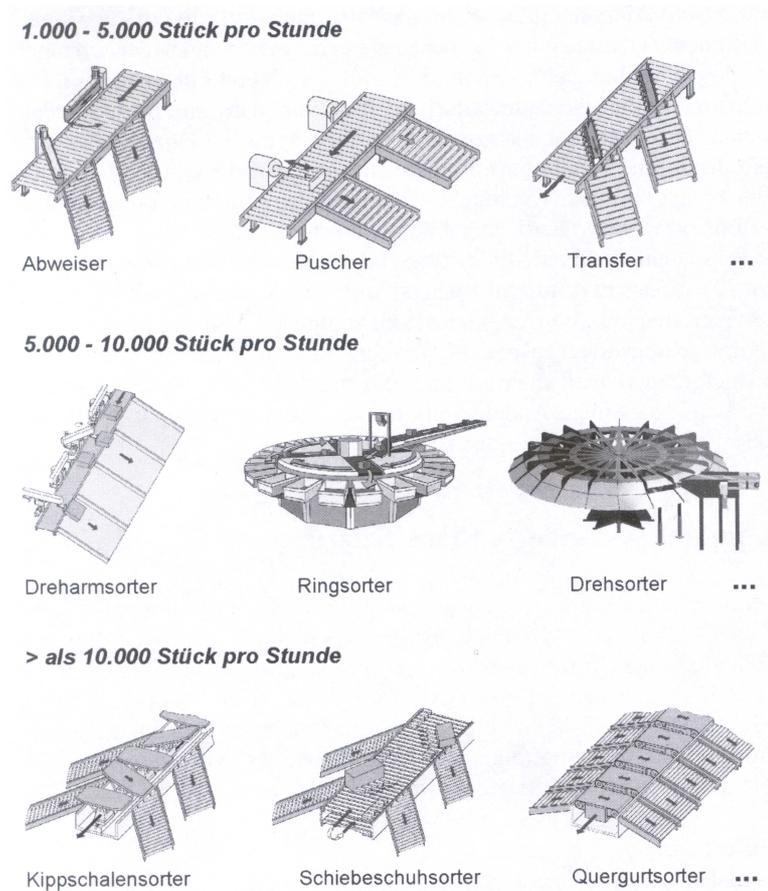


Abbildung 2.15: Leistungsorientierte Systematik [Jod06]

- die manuelle Entnahme der Sortiergüter aus dem Sortierprozess
- die automatische Übergabe an weiterführende Förder- und Verarbeitungsprozesse
- das Aufspeichern des Sortiergutes

Die Endstelle stellt das Bindeglied zwischen der sich schnell bewegenden Verteiltechnik und den zumeist manuellen Packplätzen dar. Die Endstelle wird in drei Funktionsbereiche unterteilt (Abb. 2.16). Der Übergangsbereich bildet die Schnittstelle zum Verteilförderer und ist entsprechend an die technischen Gegebenheiten anzupassen. Die wesentliche Aufgabe besteht darin, das Fördergut ohne Störungen vom Verteilförderer an die Förderstrecke der Endstelle, die den zweiten Funktionsbereich darstellt, zu übergeben.

Die Förderstrecke dient der Überwindung von Höhen- und Ortsunterschieden zwischen dem Verteilförderer und dem Sammelbereich.

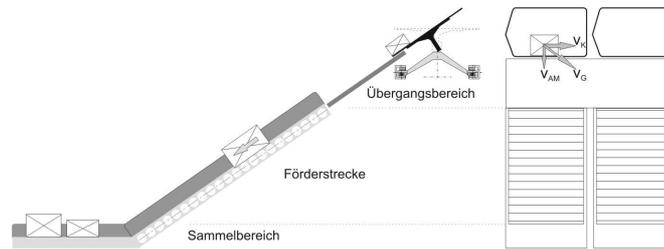


Abbildung 2.16: Prinzipieller Aufbau einer Endstelle [Jod06]

Der Sammelbereich bildet die Schnittstelle zum Packbereich und ist aufgrund der vielfach manuell ausgeführten Entnahme durch ergonomische Anforderungen geprägt.

Die Abförderung stellt den letzten Funktionsbereich der Sortieranlage dar. Die sortierten Güter können direkt in die folgenden Materialflussbereiche gefördert werden, oder die Endstellen werden durch manuelle oder automatische Packarbeitsplätze geleert. Dabei werden die Sortiergüter verpackt und ggf. mit entsprechenden Informationsmaterialien versehen. Die Abförderung der Packstücke ist dann nicht mehr Bestandteil des Sortiersystems [Jod06].

2.2.4 Grundtypen der Kommissionierung

Ein Kommissioniersystem entsteht durch die Verknüpfung der Teilsysteme. Da für jedes Teilsystem diverse Detaillösungen existieren, ist die Anzahl der theoretisch möglichen Kommissioniersysteme sehr groß. Analysiert man Kommissioniersysteme aus der Praxis, so erkennt man allerdings immer wieder gleiche Strukturen, nach denen Kommissioniersysteme aufgebaut sind. Dazu zählen

- Kommissioniernest,
- Mann-zu-Ware-System,
- Ware-zu-Mann-System,
- inverses Kommissioniersystem,
- Schachtkommissionierer,
- zweistufiges Pick-to-Belt-System.

Differenziert man diese Kommissioniersysteme nach der *Art der Bereitstellung der Artikel* und der *Art der Abgabe der Entnahmeeinheiten*, dann ergeben sich vier unterschiedliche Systemvarianten, in die sich diese Kommissioniersysteme einordnen lassen (Abb. 2.17). Der zu formulierende Berechnungsalgorithmus für Kommissioniersysteme ist so

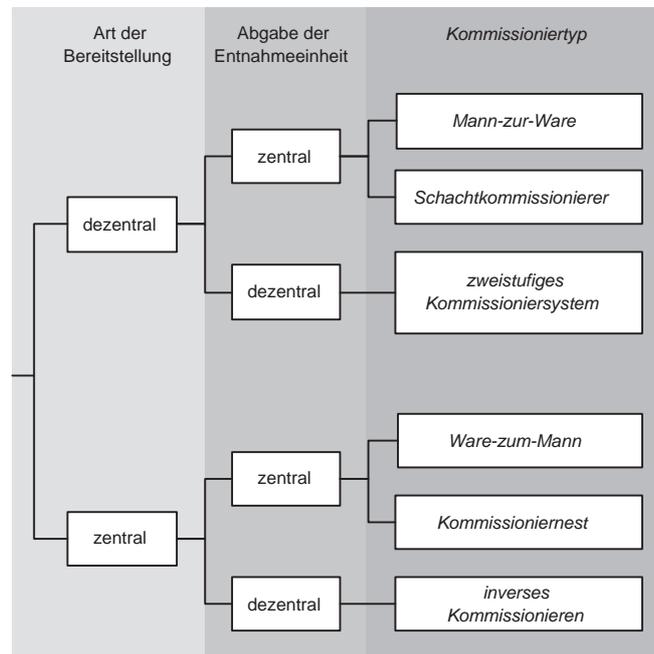


Abbildung 2.17: Differenzierung von Kommissioniersystemen nach der Art der Bereitstellung und der Abgabe der Entnahmeeinheit

zu gestalten, dass alle Systeme, die sich mit diesen vier Grundtypen beschreiben lassen mit Hilfe des Algorithmus berechenbar sind.

Das Verständnis der Funktionen und Abläufe dieser vier Grundtypen ist die Basis für die spätere Berechnung dieser Kommissioniersysteme, da bei der Ermittlung der Leistungsfähigkeit die wechselseitigen Einflüsse der Bausteine berücksichtigt werden müssen, um zu realistischen Ergebnissen zu gelangen.

Mann-zur-Ware

Bei der konventionellen Kommissionierung werden die Artikel in einem Fachbodenregal oder einem Behälterregal gelagert (Abb. 2.18). Der Kommissionierer erhält zunächst

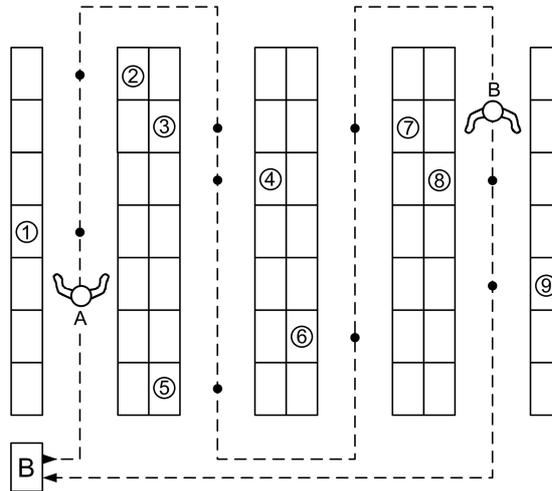


Abbildung 2.18: Konventionelles Kommissioniersystem

an der Basis die Pickliste und ein Ladehilfsmittel, in dem die zu kommissionierenden Artikel abgelegt werden. Anschließend bewegt sich der Kommissionierer gemäß der Pickliste von Lagerfach zu Lagerfach, entnimmt jeweils die angezeigten Entnahmeeinheiten und quittiert die jeweilige Menge. Nachdem alle Auftragspositionen bearbeitet sind, wird der Sammelbehälter an einer definierten Übergabestation übergeben und zum Verpacken und Versand weitergeleitet. Die Wegstrategie, nach der sich der Kommissionierer durch das Lager bewegt, kann vorgegeben sein oder wird durch den Kommissionierer frei entschieden. Je nach Größe des Kommissioniersystems können sich auch mehrere Kommissionierer gleichzeitig durch die Lagergassen bewegen. Liegen sehr schmale Gassen vor, ist ein Begegnungsverkehr innerhalb der Gassen nicht möglich. Konventionelle Kommissioniersysteme sind mit geringen Investitionskosten verbunden und sehr flexibel bezüglich der zu lagernden Güter und des eingesetzten Personals.

Schachtkommissionierer

Obwohl der Schachtkommissionierer in die gleiche Kategorie wie Kommissionierung nach dem Prinzip MzW einzuordnen ist, handelt es sich dabei um ein grundsätzlich anderes Verfahren der Kommissionierung. Die Artikel werden in speziell an ihre äußeren Abmessungen angepassten Automaten gelagert, die in der Lage sind, auf Anforderung eine vorgegebene Menge des Artikels abzugeben. Der Schachtkommissionierer stellt im Prinzip das Lagersystem für die zu kommissionierenden Artikel dar. Jedem Artikel wird dabei ein eigener Schacht (Lagerfach) zugeordnet (Abb. 2.19). Die Abgabe erfolgt in der Regel auf ein Förderband. Dieses transportiert die Artikel zu einem Sammelbehälter.

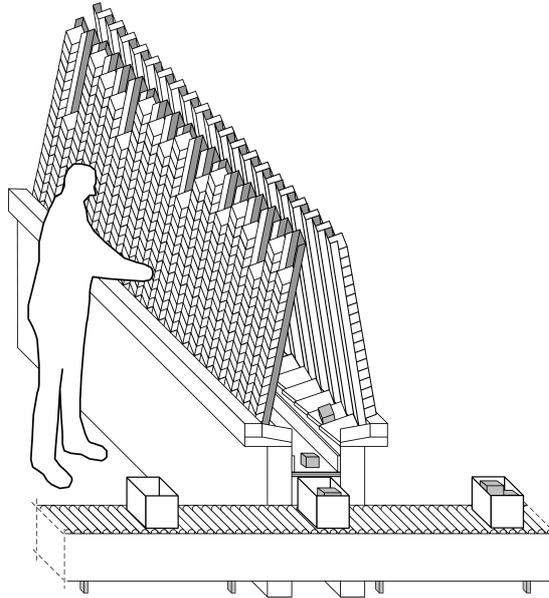


Abbildung 2.19: Schachtkommissionierer

Es ist auch möglich, dass der Artikel direkt in den Sammelbehälter fällt.

Bei direkter Abgabe in den Sammelbehälter muss dieser jeden Kommissionierschacht unterfahren können, damit jeder Artikel kommissioniert werden kann. Erfolgt die Abgabe auf ein Förderband, können mehrere Schächte gleichzeitig an ein Förderband abgeben, das die Artikel dann zum Sammelbehälter transportiert.

Da die Artikel spezielle Restriktionen bezüglich Abmessungen, Gewicht und Verpackung erfüllen müssen, sind diese Systeme sehr unflexibel und Personalintensiv bezüglich der Nachschubversorgung. Auch die Investitionskosten sind relativ hoch. Dem stehen sehr hohe Kommissionierleistungen und ein geringer Personalaufwand für die Kommissionierung gegenüber.

Kommissioniernest

Das Kommissioniernest wird dann eingesetzt, wenn die zu kommissionierenden Güter sehr klein sind und das gesamte Sortiment in Reichweite des Kommissionierers gelagert werden kann (Abb. 2.20). Der Kommissionierer legt die Entnahmeeinheiten eines Auf-

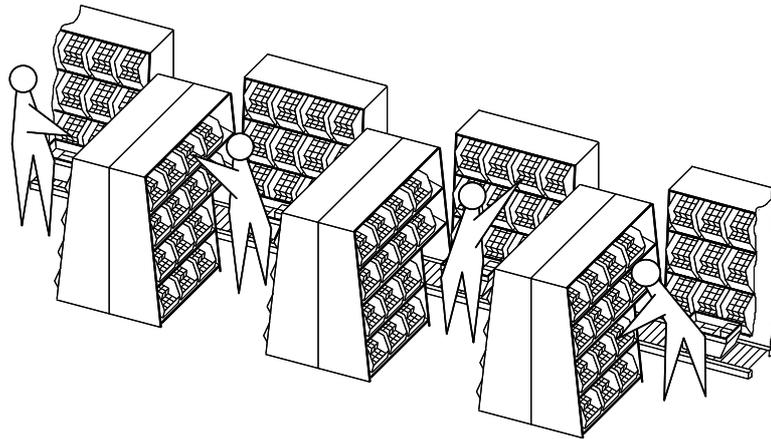


Abbildung 2.20: Kommissioniernest

trags in einem Sammelbehälter ab, der dann z. B. über eine entsprechende Fördertechnik abtransportiert wird. Da alle Artikel in Reichweite des Kommissionierers lagern, sind keine Fahrbewegungen zwischen den einzelnen Entnahmen notwendig. Dadurch können relativ hohe Kommissionierleistungen erzielt werden.

Zweistufige Kommissionierung (Pick-to-Belt)

Pick-to-Belt-Anlagen werden häufig in zweistufigen Kommissioniersystemen eingesetzt. Dabei durchläuft der Kommissionierer, wie im konventionellen System, ein Fachboden- oder Behälterregal und pickt an den vorgegebenen Lagerorten die angezeigte Menge. Die Entnahmeeinheiten werden nicht in einem Sammelbehälter zusammengeführt, sondern direkt auf ein vor den Lagerfächern installiertes Förderband abgegeben. Dieses transportiert die Artikel zu einer Sortieranlage, in der die Artikel dem entsprechenden Kundenauftrag zugeordnet werden (Abb. 2.21). In einstufigen Pick-to-Belt-Anlagen werden die Artikel in einem Sammelbehälter zusammengeführt. Ist der Auftrag abgeschlossen, wird der Sammelbehälter an das Förderband abgegeben und kann so automatisch zum Verpackungs- und Versandbereich weitertransportiert werden. Der Kommissionierer erhält seinen neuen Auftrag über Funk oder Infrarot. Der Sammelbehälter wird durch die fördertechnische Anlage bereitgestellt. Dadurch entfallen die Wegstrecken zur Basis am Beginn und Ende eines Kommissionierauftrags, was zu einer Leistungssteigerung führt.

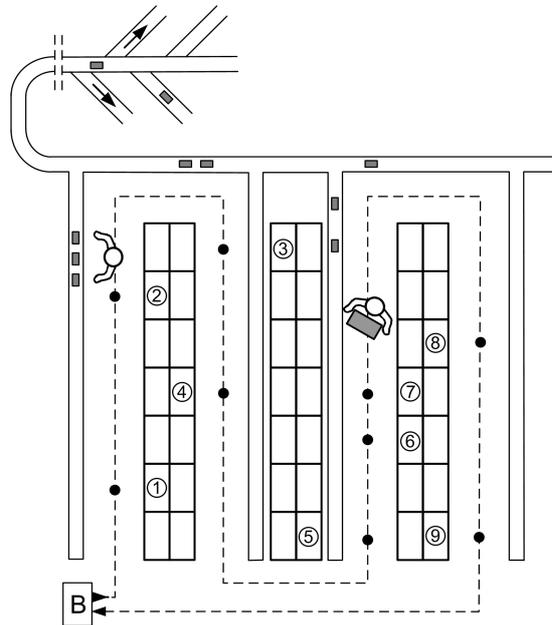


Abbildung 2.21: Pick-to-Belt-System

Ware-zum-Mann-System

Ware-zu-Mann-Systeme bestehen in der Regel aus einem vollautomatischen Lagersystem, das über eine automatische Fördertechnik mit manuellen Kommissionierplätzen verbunden ist (Abb. 2.22).

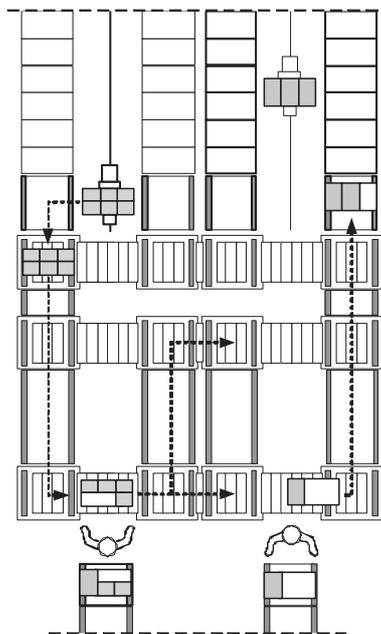


Abbildung 2.22: Beispiel eines Ware-zum-Mann-Systems

Die zu kommissionierenden Artikel werden inklusive Ladehilfsmittel ausgelagert und zum Kommissionierer transportiert. Dieser entnimmt die geforderten Entnahmeeinheiten und legt sie auf einer entsprechenden Sammeleinheit ab, bis alle Artikel eines Auftrags zusammengestellt sind. Ist nach dem Zugriff durch den Kommissionierer noch eine Restmenge auf dem Ladehilfsmittel vorhanden, wird diese wieder zum Lager transportiert und eingelagert. Sollte der Artikel zum gleichen Zeitpunkt an einem weiteren Kommissionierplatz benötigt werden, wird er direkt zu diesem befördert und erst anschließend eingelagert. Wird der Ladungsträger vollständig geleert, wird er dem System entnommen und es kann eine Nachschubanforderung ausgelöst werden.

Inverses Kommissionieren

Um eine inverse Kommissionierung durchführen zu können, ist eine spezielle Aufbereitung der Kundenaufträge notwendig. Es werden zunächst mehrere Kundenaufträge zu einem Auftragsbatch zusammengefasst und anschließend nach der Artikelnummer sortiert. Für jeden Kundenauftrag, der Bestandteil des Auftragsbatches ist, wird im Kommissionierbereich eine Sammeleinheit bereitgestellt. Nun wird der erste Artikel ausgelagert und zum zentralen Bereitstellpunkt transportiert (Abb. 2.23).

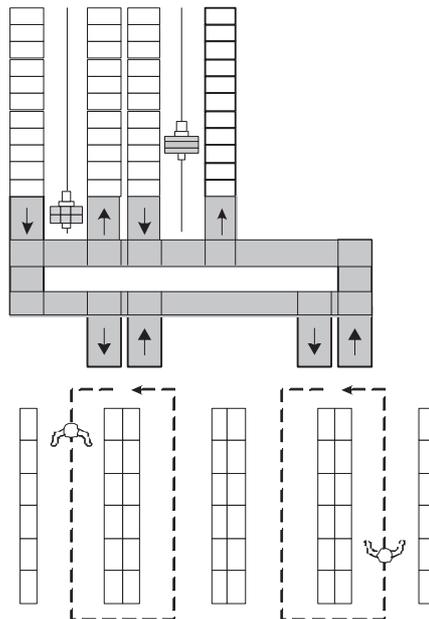


Abbildung 2.23: Inverses Kommissionieren

Hier übernimmt der Kommissionierer die Ladeeinheit, bewegt sich nun entlang bereitgestellter Sammeleinheiten und ordnet jedem Kundenauftrag die geforderte Menge des entsprechenden Artikels zu. Liegen keine weiteren Anforderungen für den ersten Artikel vor, wird dieser zurück ins Lager transportiert, und der nächste Artikel kann den Kundenaufträgen zugeordnet werden.

Nachdem alle Artikel zugeordnet sind, werden die Sammelbehälter zum Verpackungs- bzw. Versandbereich weitergeleitet und neue Sammeleinheiten für den nächsten Auftragsbatch bereitgestellt.

2.3 Strategien zur Leistungssteigerung

Die Leistung eines Kommissioniersystems ist von vielen Parametern abhängig (vgl. Kapitel 3). Sowohl die Artikel- als auch die Auftragsstruktur sind dabei als unveränderbare Größen eines Kommissioniersystems anzusehen. Geht man davon aus, dass das Layout eines Kommissioniersystems gegeben ist, verbleiben lediglich die Einlagerstrategie und die Wegstrategie als mögliche Verbesserungspotenziale für die Kommissionierleistung. Diese werden nachfolgend näher erläutert.

2.3.1 Einlagerstrategien

Die Lagerplatzvergabe bezeichnet die Festlegung, welcher Artikel einem bestimmten Lagerplatz zugeordnet wird. Die Vergabe der Lagerfächer kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen.

Bei der zufälligen Lagerplatzvergabe wird jedem Artikel nach dem Zufallsprinzip ein Lagerfach zugewiesen. Bei der Zuordnung werden allerdings die physikalischen Eigenschaften wie Abmessungen und Gewicht des Artikels berücksichtigt.

Vielfach wird zur Leistungssteigerung die Umschlagshäufigkeit bzw. Zugriffshäufigkeit auf die einzelnen Artikel bei der Lagerplatzvergabe als Kriterium herangezogen. Dabei wird versucht, Artikel mit hoher Umschlagshäufigkeit Lagerplätzen mit einer geringen Entfernung zum Ein- und Auslagerungspunkt (E/A-Punkt) bzw. vom Gassenanfang zuzuordnen. Die mittlere Fahrzeit pro Arbeitsspiel wird somit reduziert, was zu einer Leistungssteigerung führt. Sowohl die zufällige Lagerplatzvergabe als auch die Lagerplatzvergabe unter Berücksichtigung der Umschlagshäufigkeit können in unterschiedlicher Weise realisiert werden:

- Lagerplatzvergabe zufällig
 - zufällig
 - kürzeste Fahrzeit
- Lagerplatzvergabe nach Zugriffshäufigkeit
 - ABC-Zonung
 - kontinuierlich

Bei der zufälligen Lagerplatzvergabe wird in *zufällig* und *kürzeste Fahrzeit (KFZ)* unterschieden. Bei der zufälligen Vergabe wird aus dem Lagerverwaltungssystem (LVS) der erste freie Lagerplatz aus der Lagerplatztabelle ausgewählt. Bei der KFZ-Strategie wird die Lagerplatztabelle zunächst nach der benötigten Fahrzeit sortiert und anschließend der erste freie Lagerplatz gewählt. Durch diese Vergabestrategie werden Lagerplätze mit geringen Zugriffszeiten höher ausgelastet als Lagerplätze mit großen Zugriffszeiten. Das Einsparungspotenzial dieser Strategie hängt vom mittleren Auslastungsgrad des Lagers ab. Je geringer der Auslastungsgrad, desto größer ist das Einsparungspotenzial.

Bei der zufälligen Lagerplatzvergabe ergibt sich für jeden Lagerplatz die gleiche Auslastung und somit auch die gleiche Anfahrhäufigkeit. Die mittlere Spielzeit kann daher mit einer einfachen Mittelwertrechnung durchgeführt werden. Beide Verfahren werden als zufällig bezeichnet, da im Lager keine Ordnung der Artikel nach einem vorgegebenen Merkmal entsteht.

Wird bei der Lagerplatzvergabe die Zugriffshäufigkeit berücksichtigt, wird zwischen einer *ABC-Zonung* und einer *kontinuierlichen Zonung* unterschieden.

Bei der ABC-Zonung werden die Artikel gemäß ihrer Zugriffshäufigkeit in unterschiedliche Klassen aufgeteilt. Die Lagerplätze erhalten in Abhängigkeit von der jeweiligen Anfahrtszeit die gleiche Klassifizierung (Zonen). Steht ein Artikel zur Einlagerung bereit, wird seine Klasse geprüft und ein freier Lagerplatz mit der gleichen Klasse gesucht. Die Auswahl des Lagerplatzes innerhalb der Klasse kann zufällig erfolgen, oder es wird der Lagerplatz der Zone gesucht, der am schnellsten erreicht werden kann (kürzeste Fahrzeit).

Bei der kontinuierlichen Lagerplatzvergabe werden alle Artikel gemäß der erwarteten Zugriffshäufigkeit und die Lagerplatztabelle nach der Zugriffszeit sortiert. Anschließend erhalten sowohl die Artikel als auch die Lagerplätze Ordnungszahlen, über die die Zuordnung geregelt ist. Dadurch entsteht für jeden Artikel eine bevorzugte Einlagerzone. Das Verbesserungspotenzial ist bei dieser Einlagerstrategie am größten.

2.3.2 Wegstrategien

Die Wegstrategie beschreibt, wie ein Kommissionierer in einem MzW-System die Gassen des Lagers durchläuft und sich so von Lagerfach zu Lagerfach bewegt. Ziel der Wegstrategie ist es, die mittlere Wegstrecke, die ein Kommissionierer bei der Bearbeitung eines Kommissionierauftrags zurücklegt, zu minimieren. In Abhängigkeit von der Auftragsstruktur, der Einlagerstrategie und vom Layout können unterschiedliche Wegstrategien zu einem optimalen Ergebnis führen.

Die mittlere Wegstrecke, die pro Kommissionierauftrag zurückgelegt werden muss, setzt

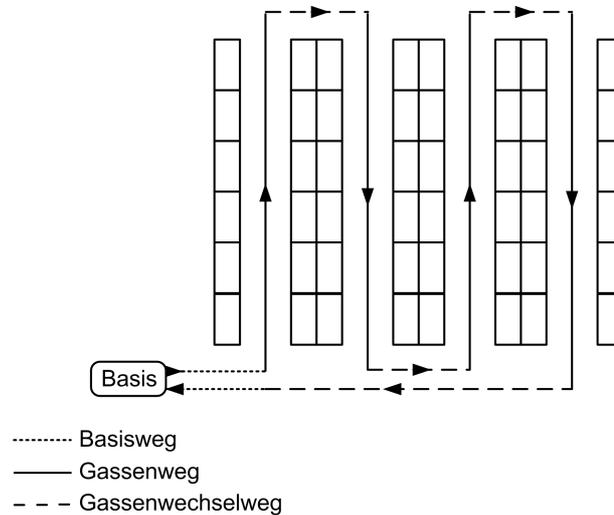


Abbildung 2.24: Weganteile in einem Kommissioniersystem nach dem Prinzip Mann-zur-Ware

sich aus Basisweg, Gassenweg und Gassenwechselweg zusammen (Abb. 2.24). Der Basisweg beschreibt dabei die Wegstrecke von der Auftragsübergabeposition bis vor die erste Gasse des Kommissioniersystems. Der mittlere Gassenweg ist der Weganteil, der bei einer Kommissionierumdrehung innerhalb der Gassen zurückgelegt wird. Der Gassenwechselweg entspricht dem Weganteil, der bei einem Kommissionierumdrehung benötigt wird, um zwischen den Gassen, in denen Entnahmen vorgenommen werden müssen, zu wechseln. In der Literatur werden insgesamt sechs Wegstrategien beschrieben:

- Schleifenstrategie ohne Überspringen
- Schleifenstrategie mit Überspringen
- Stichgangstrategie ohne Wiederholung
- Stichgangstrategie mit Wiederholung
- Mittelpunkt-Heuristik
- Largest-Gap-Heuristik

Die **Schleifenstrategie ohne Überspringen** (SchOÜ) wird auch als Durchgangsstrategie oder Mäander-Heuristik bezeichnet [tH06]. Dabei durchläuft der Kommissionierer mäanderförmig alle Gassen des Systems, unabhängig davon, ob in der Gasse eine Pickposition vorliegt oder nicht (Abb. 2.25).

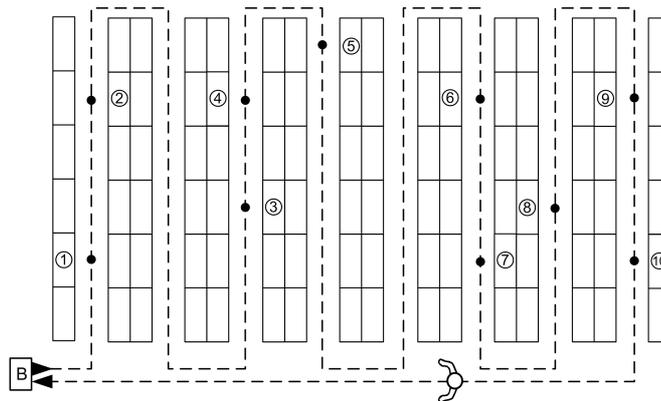


Abbildung 2.25: Schleifenstrategie ohne Überspringen

Diese Strategie ist dann sinnvoll, wenn die Anzahl der Positionen pro Auftrag so groß ist, dass fast immer alle Gassen angefahren werden müssen und die Gassen so schmal sind, dass ein Begegnungsverkehr innerhalb der Gassen nicht möglich ist. Zudem bietet die Schleifenstrategie einen besonders einfachen und geordneten Ablauf [Gud04].

Der Nachteil dieser Wegstrategie besteht darin, dass unnötige Wegstrecken zurückgelegt werden, wenn der Kommissionierer eine Gasse durchlaufen muss, ohne einen Artikel in der Gasse picken zu müssen. Sind die Gassen so schmal, dass sich die Kommissionierer nicht überholen können, entstehen zudem Wartezeiten, die die Leistung reduzieren.

Bei der **Schleifenstrategie mit Überspringen** (SchMÜ) durchläuft der Kommissionierer ebenfalls mäanderförmig die Gassen des Kommissionierlagers. Im Gegensatz zur Schleifenstrategie ohne Überspringen lässt der Kommissionierer bei dieser Strategie jedoch alle Gassen aus, in denen keine Pickpositionen vorliegen (Abb. 2.26).

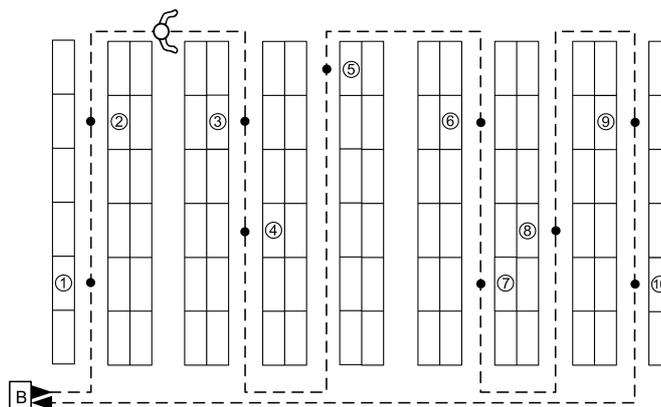


Abbildung 2.26: Schleifenstrategie mit Überspringen

Da einzelne Gassen ausgelassen werden können, ist die Bewegungsrichtung innerhalb einer Gasse nicht festgelegt. Werden mehrere Kommissionierer in einem System einge-

setzt, müssen die Gassen so breit ausgelegt sein, dass Begegnungsverkehr in den Gassen möglich ist. Im Gegensatz zur Schleifenstrategie ohne Überspringen werden bei dieser Strategie keine Gassen ohne Pickposition durchlaufen. Dies führt insbesondere bei geringer Anzahl Auftragspositionen zu geringeren mittleren Wegstrecken und somit zu höheren Leistungen der Kommissionierer.

Die **Stichgangstrategie ohne Wiederholung** (StOW) stellt eine völlig andere Vorgehensweise bei der Kommissionierung dar. Der Kommissionierer bewegt sich entlang der Regalstirnseite und geht ausschließlich in Gassen hinein, in denen Artikel zu entnehmen sind. Die jeweilige Gasse wird dabei nur einmal betreten, um alle dort befindlichen Auftragspositionen der Reihe nach zu kommissionieren. Anschließend bewegt er sich zurück zur Regalstirnseite, an der er den Gang betreten hat (Abb. 2.27).

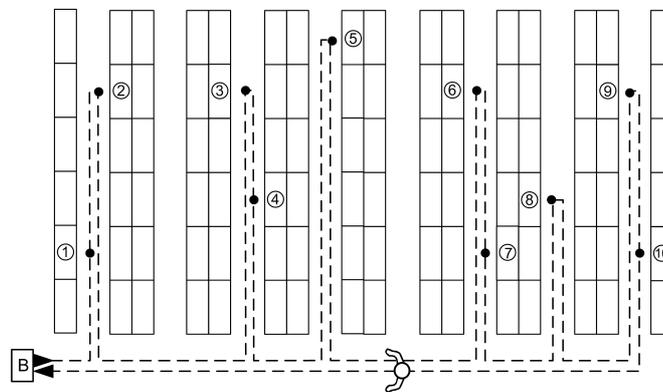


Abbildung 2.27: Stichgangstrategie ohne Gangwiederholung

Ein Vorteil dieser Strategie ist die Platzersparnis, da auf der Regalrückseite kein Gang für den Gassenwechsel vorgesehen werden muss. Zudem kann die zurückzulegende Wegstrecke reduziert werden, wenn nur wenige Artikel pro Gasse zu picken sind und zusätzlich eine Einlagerungsstrategie auf Basis der Zugriffshäufigkeit eingesetzt wird.

Die **Stichgangstrategie mit Wiederholung** (StMW) basiert auf dem gleichen Prinzip wie die Stichgangstrategie ohne Gangwiederholung. Der wesentliche Unterschied dabei besteht jedoch darin, dass sich der Kommissionierer für jede einzelne Auftragsposition in den Gang hinein begibt, diese entnimmt und mit ihr zur Regalstirnseite zurückkehrt, wo er sie auf einen mitgeführten Wagen oder einen Stetigförderer abgibt. Er betritt folglich Gänge, in denen mehrere Positionen zu bearbeiten sind, mehrfach. (Abb. 2.28). Diese Strategie wird eingesetzt, wenn die Kommissioniergänge aufgrund zu geringer Gangbreite nicht mit einem Wagen oder Kommissioniergerät befahren werden können [Gud04]. In diesem Fall steht dem Vorteil des höheren Volumennutzungsgrades aufgrund der schmalen Gänge der Nachteil des verlängerten Weges gegenüber.

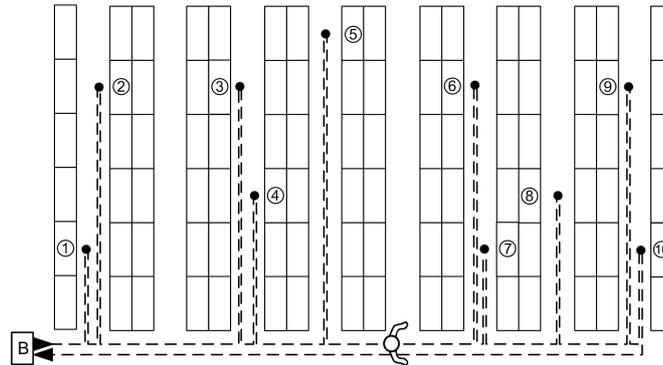


Abbildung 2.28: Stichgangstrategie mit Gangwiederholung

Die **Mittelpunkt-Heuristik** (MH) ist eine Sonderform der Stichgangstrategie. Die Gasse wird allerdings bei dieser Strategie funktional halbiert. Das bedeutet, dass der Kommissionierer zunächst nur Artikel in der Gasse pickt, die in der ersten Hälfte lagern. Nachdem er alle Gassen, in deren vorderer Hälfte Picks vorlagen, bearbeitet hat, bewegt er sich zur Stirnseite auf der Rückseite des Lagers, um nun nach dem gleichen Prinzip die Lagerfächer anzufahren, die in der zweiten Hälfte der Gasse gelagert sind (Abb. 2.29). Der Einsatz der Mittelpunkt-Heuristik ist nur dann sinnvoll, wenn die Zugriffshäufigkeit

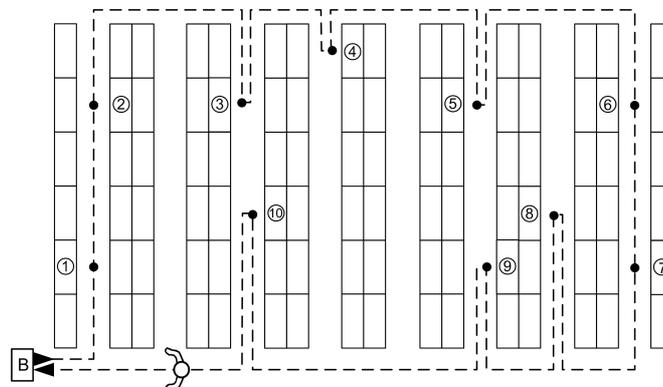


Abbildung 2.29: Mittelpunkt-Heuristik

der Artikel bei der Einlagerung berücksichtigt wird, da dann die eingesparte Wegstrecke innerhalb der Gassen größer ist als die zusätzliche Wegstrecke, die durch den Wechsel von der Vorderseite auf die Rückseite des Lagers entsteht.

Die **Largest-Gap-Heuristik** (LG) entspricht in ihrer Grundform der Mittelpunkt-Heuristik. Im Gegensatz dazu bewegt sich der Kommissionierer soweit in einen Gang hinein, bis er auf die größte Lücke trifft (largest gap). Als Lücke wird dabei der Abstand zwischen den Entnahmeorten innerhalb einer Gasse bezeichnet. Hat der Kommissionierer die größte Lücke erreicht, bewegt er sich zur Stirnseite der Gasse zurück. Die Entnahmeorte oberhalb der größten Lücke werden wie bei der Mittelpunkt-Heuristik von

der hinteren Regalstirnseite aus erreicht (Abb.2.30).

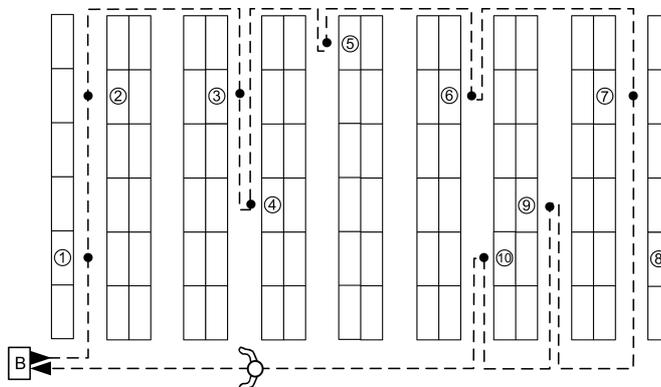


Abbildung 2.30: Largest-Gap-Heuristik

Dadurch, dass der Kommissionierer die größte Lücke innerhalb einer Gasse auslässt, wird der Gassenweg minimiert. Der Aufwand zur Erstellung der Pickliste bzw. zum Erzeugen der Pickreihenfolge ist für die Largest-Gap-Heuristik sehr hoch und muss daher ins Verhältnis zum Nutzen gesetzt werden.

Grundsätzlich lässt sich keine der vorgestellten Strategien als die effektivste Strategie zur Leistungssteigerung bezeichnen. Jede Strategie kann unter den richtigen Randbedingungen, die durch die Artikelstruktur, die Auftragsstruktur, das Layout und die eingesetzte Einlagerstrategie gegeben sind, die besten Ergebnisse erzielen.

2.4 Publierte Berechnungsverfahren

Gudehus und Kunder stellen 1973 bzw. 1975 zum ersten Mal ein Verfahren dar, mit dem eine Berechnung von konventionellen Kommissioniersystemen für unterschiedliche Strategien möglich ist [Gud73, Kun75]. Dabei setzen sie voraus, dass eine eindimensionale Bewegung des Kommissionierers in der Gasse vorliegt und die Zugriffshäufigkeit über alle Lagerplätze gleichverteilt ist.

Zur Berechnung wird zunächst die mittlere Anzahl Gassen χ bestimmt, die beim Kommissionieren von n Positionen im Mittel angesprochen werden. Im zweiten Schritt ist die mittlere Anzahl Positionen \bar{r} , die in einer Lagergasse kommissioniert werden, zu bestimmen. Im dritten Schritt wird die Wegstrecke $s_{\bar{r}}$ berechnet, die der Kommissionierer in einer Gasse zurücklegt, wenn er \bar{r} Positionen in der Gasse kommissioniert. Die gesamte Wegstrecke, die bei einem Kommissionierauftrag innerhalb der Gassen zurückgelegt wird, erhält man abschließend durch die Multiplikation von $s_{\bar{r}}$ mit der mittleren Anzahl Gassen χ . Die Berechnung des Gassenwechselweges, der die Wegstrecken zwischen den

Gassen berücksichtigt, erfolgt ebenfalls auf Basis der im Mittel angesprochenen Gassen χ .

Ratliff und Rosenthal, Goetschalkx und Ratliff und Rana haben Algorithmen entwickelt, mit denen die kürzeste Wegstrecke für einen konkreten Auftrag mit fester Anzahl Positionen ermittelt werden kann [Rat83, Goe88, Ran90].

Hall nahm die Ansätze von Gudehus und Kunder zur Berechnung der mittleren Wegstrecken auf und entwickelte auf deren Basis Berechnungsalgorithmen für die Mittelpunkt-Heuristik, sowie die Largest-Gap-Heuristik [Hal93]. Dabei setzt auch er die zufällige Verteilung der Artikel über das Lager voraus.

Caron stellt in seiner Veröffentlichung zum ersten Mal ein Berechnungsverfahren für die mittlere Wegstrecke für die Schleifen- und Stichgangstrategie vor, bei dem die Zugriffshäufigkeit auf die Gassen eine beliebige Verteilungsfunktion annehmen kann [Car98]. Im speziellen Fall wird die Verteilungsfunktion, die sich bei Einlagerung nach dem Cube-per-Order-Index (COI) ergibt, untersucht. Bei den Berechnungen wird ein Zentralganglayout mit einer äußeren, zentralen Basis vorausgesetzt. Hwang überträgt die Ansätze von Caron auf ein Kopfganglayout mit zentraler, innerer Basis und einer beliebigen Verteilungsfunktion innerhalb der Gassen. Zudem erweitert er das Modell um die Mittelpunkt-Heuristik [Hwa04].

Sowohl Caron als auch Hwang nutzen die Gesetze der Ordnungsstatistik zur Berechnung der mittleren Wegstrecke in einer Gasse $s_{\bar{r}}$ [Car98, Hwa04]. Analog der Vorgehensweise von Gudehus und Kunder multiplizieren sie die mittlere Wegstrecke in einer Gasse mit der mittleren Anzahl der anzufahrenden Gassen χ , um den Gassenweg s_{GW} zu ermitteln. Zur Berechnung von χ greifen Hall, Caron und Hwang auf den Ansatz von Gudehus zurück.

Schulte weist in seiner Dissertation nach, dass das von Gudehus und Kunder vorgestellte Verfahren zur Berechnung der mittleren Gassenzahl χ nur für den Fall, dass die Anzahl Positionen pro Kommissionierauftrag n größer ist als die Anzahl der vorhandenen Lagergassen N_G , allgemeingültig ist [Sch96, Gud04]. Er entwickelt auf Basis eines kombinatorischen Ansatzes eine Rekursionsformel, mit der die mittlere Anzahl angesprochener Gassen bei zufällig vergebenen Lagerplätzen berechnet werden kann.

Die vorgestellten Ansätze für die Berechnung des Kommissionierweges sind demnach nur für den Fall gültig, dass die Anzahl der Positionen n eines Auftrags größer ist als die Anzahl der Gassen N_G , aus denen kommissioniert wird.

Bei der Ermittlung des mittleren Gassenweges verwenden Caron und Hwang den ord-

nungsstatistischen Ansatz

$$E(X_{(r)}) = \int_0^1 x \cdot \frac{dF^{\bar{r}}(x)}{dx} dx \quad \text{mit } \bar{r} = \frac{n}{\chi} \quad (2.1)$$

Das bedeutet, dass $\bar{r} \in R$ ist. Der oben beschriebene Ansatz (2.1) von Caron/Hwang basiert auf der Annahme, dass Ränge gebildet werden, sodass sicher gestellt sein muss, dass $\bar{r} \in N$ und $\bar{r} > 0$ ist. Die Formel ist daher grundsätzlich nicht in allen Fällen formal verwendbar. Nur über Rundungen und damit zusammenhängende Ungenauigkeiten ist dieser Ansatz anwendbar.

Die Ansätze bieten daher keine allgemeine Lösung für den Fall, dass die Zugriffshäufigkeiten innerhalb der Kommissioniergasse einer beliebigen Verteilungsfunktion genügen und eine beliebige Anzahl Positionen in einem Kommissionierauftrag vorliegen. Es wird daher im Rahmen dieser Arbeit ein Berechnungsalgorithmus entwickelt, der die oben beschriebenen Einschränkungen auflöst.

Kapitel 3

Berechnungsgrundlagen

Bei der Berechnung der Leistungsfähigkeit eines Kommissioniersystems muss eine Vielzahl Parameter berücksichtigt werden, um realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen. Diese Parameter werden im Folgenden systematisiert und erläutert. Sie bilden gleichzeitig die Eingangsparameter des neuen Berechnungsverfahrens für die Kommissionierung nach dem Prinzip MzW. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird ein Überblick über die bestehenden Richtlinien zur Berechnung von Kommissioniersystemen und der in Kapitel 2 identifizierten Teilsysteme gegeben. Bestehende Lücken und Schwachpunkte der gegebenen Berechnungsverfahren werden aufgezeigt und erläutert. Abschließend werden die geeigneten, aus der Literatur bekannten Berechnungsverfahren für die in Kapitel 2 beschriebenen Teilsysteme beschrieben. Diese Berechnungsverfahren bilden die Basis des zu entwickelnden Berechnungsalgorithmus. Auf eine Darstellung der Berechnungsmethoden, die durch die Richtlinien vollständig beschrieben sind, wird verzichtet.

3.1 Einflussgrößen der Kommissionierleistung

Die leistungsbeeinflussenden Parameter von Kommissioniersystemen können unterschiedlichen Kategorien zugeordnet werden. Hierzu zählen

- Artikelstruktur,
- Auftragsstruktur,
- Layout/Infrastruktur,
- Betriebsstrategien,
- Arbeitsbedingungen.

Die Artikelstruktur gibt neben den Abmessungen und Gewichten im Wesentlichen die Anzahl der Artikel an, die gelagert bzw. kommissioniert werden müssen. Dabei wird bei den folgenden Betrachtungen vorausgesetzt, dass die Artikel innerhalb eines Lagerbereichs vergleichbare physikalische Eigenschaften wie Abmessungen und Gewicht aufweisen. Das bedeutet, dass jeder Artikel prinzipiell jedem Lagerfach zugeordnet werden kann. Ist diese Voraussetzung nicht gegeben, muss geprüft werden, ob es durch die speziellen Anforderungen bei der Zuordnung von Artikel und Lagerfach zu signifikanten Einflüssen auf die Leistungsfähigkeit kommt, die eine speziellere Betrachtung erfordern.

Eine weitere wichtige Größe ist die relative Zugriffshäufigkeit eines Artikels innerhalb eines Sortiments, die sich aus der Auftragsstruktur ergibt. Hierbei ist insbesondere von Bedeutung, wie stark sich die Zugriffshäufigkeiten der einzelnen Artikel unterscheiden. Sortiert man die Artikel nach ihrer Zugriffshäufigkeit und stellt anschließend die Zugriffshäufigkeit über den Rang der Artikel dar, ergibt sich das Zugriffshäufigkeitsdiagramm. Mit Hilfe theoretischer Dichtefunktionen lassen sich die Verläufe näherungsweise abbilden. Dabei ist die Güte der Anpassung von der verwendeten Dichtefunktion abhängig. Die Auftragsstruktur gibt zudem Aufschluss über die mittlere Anzahl der Artikel, die pro Kundenauftrag zu kommissionieren sind. In Verbindung mit der Organisationsform kann daraus ermittelt werden, wie viele Auftragspositionen ein Kommissionierauftrag aufweist. Wird jeder Kundenauftrag zu einem Kommissionierauftrag, dann sind diese beiden Größen identisch. Werden mehrere Kundenaufträge zu einem Kommissionierauftrag zusammengefasst (z. B. zweistufige Kommissionierung), dann reduziert sich in der Regel die Anzahl der Positionen pro Kommissionierauftrag, und die Anzahl Picks pro Position wird erhöht [Gud78].

Das Layout bzw. die Infrastrukturdaten eines Kommissioniersystems liefern Informationen über Abmessungen des Lagersystems wie Ganglänge, Gangbreite, Lagerfachbreite, Lagerfachhöhe und Lagerfachtiefe. Zudem enthalten sie Informationen über die Ganganzahl und die Anzahl der Artikel, die in einer Gasse gelagert werden. Beim Einsatz automatischer Lagersysteme (z. B. AKL) oder Kommissionierfahrzeuge sind die entsprechenden Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte sowie Schalt- und Totzeiten durch die Infrastrukturdaten gegeben.

Die eingesetzten Betriebsstrategien lassen sich gemäß Kapitel 2.3 in Einlagerstrategien und Wegstrategien unterscheiden. Sie stellen einen wesentlichen, durch den Planer beeinflussbaren Faktor der Kommissionierleistung dar und sind daher ausführlich in Kapitel 2.3 beschrieben.

Die Arbeitsbedingungen in Kommissioniersystemen mit manuellem Einsatz sind maßgeblich für die tatsächlich zu erbringende Leistung des einzelnen Kommissionierers. Die vielfältigen Einflussfaktoren werden durch die Multiplikation mit einem Faktor zwischen 0 und 1 berücksichtigt. Es wird zwischen der Verfügbarkeit η_{ver} und der Auslastbarkeit

η_{aus} des Kommissionierers differenziert [Gud04].

Mit der Verfügbarkeit η_{ver} wird berücksichtigt, dass der Kommissionierer nicht während der gesamten Anwesenheitszeit dem Kommissionierprozess zur Verfügung steht. Die Arbeitszeit des Kommissionierers kann dementsprechend in produktive und unproduktive Zeiten aufgeteilt werden. In der produktiven Zeit t_{prod} führt der Kommissionierer die für das Kommissionieren erforderlichen Arbeiten und Vorgänge aus. Zur unproduktiven Zeit t_{unprod} zählen technische Ausfallzeiten, persönliche Verteilzeiten und Zeiten für kommissionierfremde Nebentätigkeiten. Die Verfügbarkeit eines Kommissionierers ist definiert als:

$$\eta_{ver} = \frac{t_{prod}}{t_{unprod} + t_{prod}} \quad (3.1)$$

Für die Leistungsberechnung und Dimensionierung können für η_{ver} folgende Erfahrungswerte angenommen werden [Gud04]:

- sehr gute Arbeitsbedingungen und geringe Belastungen $\eta_{ver} \approx 90\%$
- gute Arbeitsbedingungen und mittlere Belastungen $\eta_{ver} \approx 85\%$
- weniger gute Arbeitsbedingungen und hohe Belastungen $\eta_{ver} \approx 80\%$

Weiterhin muss die Auslastbarkeit in die Berechnung der Kommissionierleistung einbezogen werden. Die verfügbare Zeit kann der Kommissionierer nur dann produktiv nutzen, wenn keine stochastisch bedingten Wartezeiten vorliegen. Diese entstehen zum einen infolge der Blockierung des Zugangs durch andere Kommissionierer und zum anderen durch das Warten auf Informationen oder Nachschub. Die Auslastbarkeit eines Kommissionierers stellt somit das Verhältnis der Kommissionierzeit t zur Summe der stochastisch bedingten mittleren Wartezeiten t_{wart} und der Kommissionierzeit t dar. Es gilt

$$\eta_{aus} = \frac{t}{t_{wart} + t} \quad (3.2)$$

Im Idealfall ist das Kommissioniersystem so ausgelegt, dass keine prozessbedingten Wartezeiten entstehen. In diesem Fall gilt $\eta_{aus} = 1$. Für die real zu erzielende Kommissionierleistung P_{real} gilt dann

$$P_{real} = \eta_{ver} \cdot \eta_{aus} \cdot P_{K,max} \quad (3.3)$$

3.2 Richtlinien und Normen

Es existieren verschiedene Richtlinien und Normen, die sich mit dem Themenbereich der Kommissionierung befassen.

Die VDI-Richtlinie 3590, die in Blatt 1–3 unterteilt ist, beschäftigt sich mit den allgemeinen theoretischen Grundlagen, Definitionen und dem Aufbau verschiedenster Kommissioniersysteme und gibt eine Vielzahl praktischer Beispiele an [VDI94a, VDI02a, VDI02b]. Die durch die Richtlinie verfolgten Ziele, eine einheitliche Begriffswelt zu schaffen, einen detaillierten Überblick über die verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten der Teilfunktionen des Kommissionierens zu geben und Hilfestellung bei der Planung zu leisten, werden erfüllt. Die Richtlinie liefert aber keinen Ansatz und keine Vorgehensweise, mit der die Leistung eines Kommissioniersystems ermittelt werden kann.

Ergänzungen zu dieser Richtlinie bieten die VDI-Richtlinien 3311, 3657 und 4415, die auf spezielle Themenbereiche der Kommissionierung eingehen [VDI98a, VDI93, VDI99]. Dazu zählen die beleglose Kommissionierung, die automatisierte Kommissionierung und die Gestaltung der Kommissionierarbeitsplätze. Auch diese Richtlinien geben gute Anregungen zur Systemplanung, zeigen aber ebenfalls keine Vorgehensweise zur Leistungsermittlung für die jeweiligen Kommissioniersysteme auf.

Es ist festzuhalten, dass derzeit kein Regelwerk existiert, das einen vollständigen Berechnungsalgorithmus zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Kommissioniersystemen liefert.

Da Kommissioniersysteme aus verschiedenen Teilsystemen bestehen können, werden nachfolgend die Richtlinien vorgestellt, die Verfahren und Methoden zur Leistungsermittlung der Teilsysteme liefern. Die Kenntnis der Teilsystemleistungen ist die Basis zur Entwicklung eines ganzheitlichen Berechnungsansatzes, der die Wechselwirkungen der Teilsysteme berücksichtigt. Dabei liegt der Fokus gemäß Kapitel 2.2 auf der Berechnung des Förder- und Lagersystems sowie des Verteil- und Sortiersystems.

Verfahren zur Leistungsermittlung von Lagersystemen mit Regalbediengeräten sind in der FEM 9851 bzw. in der VDI-Richtlinie 3561 beschrieben [FEM03, VDI73, VDI95, VDI96] beschrieben. Beide Richtlinien weisen im Kern die gleiche Vorgehensweise auf und fordern die gleichen Einschränkungen bezüglich des Lagersystems.

Im Gegensatz zur VDI 3561, die nur einen Lösungsansatz bei einer Eckpunktlage des Ein- und Auslagerpunktes aufzeigt, liefert die FEM 9.851 Lösungen für eine Vielzahl weiterer Positionen des Ein- und Auslagerorts. Das Blatt 2 der VDI 3561 zeigt ein Berechnungsverfahren für Regalbediengeräte, die in mehreren Lagergassen agieren [VDI95]. Im Blatt 4 wird die Leistungsermittlung von Kanallagersystemen beschrieben [VDI96].

Diese Lagersysteme werden in Kommissioniersystemen hauptsächlich als Nachschublager verwendet und werden daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Sowohl in der FEM als auch bei der VDI-Richtlinie wird vorausgesetzt, dass die Artikel zufällig über die Lagerfächer der Gasse verteilt sind. Zur Ermittlung der Einzel- bzw. der Doppelspielzeit werden zwei Referenzpunkte innerhalb des Lagers angegeben. Durch eine Ein- und/oder Auslagerung an diesen Punkten können die mittleren Spielzeiten ermittelt werden.

Exakt ist dieses Verfahren nur für den Fall, dass für den Regalwandparameter $\omega = 1$ gilt. Das bedeutet, dass das Verhältnis von Höhe H zur Länge L des Regals mit dem Verhältnis von Horizontalgeschwindigkeit v_x und Vertikalgeschwindigkeit v_y übereinstimmt. Es gilt

$$\frac{H}{L} \cdot \frac{v_x}{v_y} = \omega = 1 \quad (3.4)$$

Beide Richtlinien sind daher auf den Bereich $0,5 \leq \omega \leq 2$ beschränkt. Da diese Voraussetzung nicht auf alle Lagersysteme zutrifft, ist die Verwendung der Richtlinien eingeschränkt. Zudem steigt die Abweichung der berechneten Werte mit der Abweichung von ω vom Idealwert 1 an. Daher wird im Kapitel 3.3 ein aus der Literatur bekanntes Verfahren zur Spielzeitermittlung dargestellt, bei dem ω beliebige Werte annehmen kann. Prinzipiell ist das dort dargestellte Verfahren in Teilen auch auf die Ansätze der in der VDI-Richtlinie 3561 Blatt 2 und 4 dargestellten Berechnungsverfahren übertragbar.

Die Verfahren zur Durchsatzermittlung von Fördersystemen sind in den VDI-Richtlinien 3978 und 3646 beschrieben [VDI98c, VDI94b]. Dabei fokussiert die VDI 3978 Begriffe und Definitionen für die Durchsatz- und Spielzeitberechnung. In VDI 3646 wird die Durchsatzermittlung für Rollenbahnen, Staurollenbahnen und Tragkettenförderer sowie die Spielzeitermittlung für Verschiebe- und Verschiebehubwagen, Drehrollenbahnen, Drehschieberrollenbahnen, Absenkrollenbahnen, Vertikalförderer und Umlauf-S-Förderer dargelegt.

Ein Berechnungsverfahren zur Durchsatzberechnung der in Kapitel 2.2 dargestellten Transportknoten vom Typ (m/n) wird in den Richtlinien nicht dargelegt.

Die VDI-Richtlinien 2340, 3619 und 3312 beschäftigen sich mit unterschiedlichen Schwerpunktthemen von Sortier- und Verteilanlagen [VDI97, VDI83, VDI98b]. Die VDI 2340 behandelt ausschließlich die systematische Darstellung bekannter Ausschleusverfahren und gibt wichtige Kennzahlen an. VDI 3619 stellt die systemtechnische Betrachtung von Sortier- und Verteilanlagen in den Vordergrund (vgl. Kapitel 2.3). Dabei wird die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Anlagen beschrieben, die sich aus mehreren Verteilanlagen zusammensetzen. Im Rahmen dieser Berechnungen werden die

Faktoren f_p und f_w eingeführt, mit denen die personellen Einflüsse und die Einflüsse durch Warteprozesse pauschal berücksichtigt werden. Die beschriebenen Berechnungen setzen allerdings voraus, dass der mögliche Durchsatz einer einzelnen Verteilanlage bekannt ist. Von welchen Parametern dieser abhängt bzw. wie er zu berechnen ist, wird nicht angegeben.

Die VDI3312 stellt im Wesentlichen die Einbindung von Sortier- und Verteilanlagen in logistische Gesamtsysteme dar. Es werden typische Einsatzbereiche beschrieben und die Sortiersysteme werden in diese Prozesse eingegliedert. Des Weiteren wird auf die Themenfelder Steuerung und Identifikation näher eingegangen. Abschließend werden Überlegungen zu Verfügbarkeit und organisatorischen Rahmenbedingungen angestellt. Eine Leistungsermittlung findet nicht statt.

Alle beschriebenen Normen und Richtlinien bieten nur bedingt geeignete oder keine Berechnungsvorschriften für Teilsysteme von Kommissioniersystemen. Die Wechselwirkungen, die sich in einem Kommissioniersystem zwischen den eingesetzten Teilsystemen bei der Berechnung der Systemleistung ergeben, werden ebenfalls in keiner Richtlinie beschrieben.

In der Literatur werden dagegen Berechnungsverfahren für die Teilsysteme Lager, Fördertechnik und Sortier- und Verteiltechnik beschrieben. Diese zum Teil komplexen Verfahren werden in den folgenden Kapiteln dargelegt.

3.3 Leistungsermittlung von Lagersystemen

Die Leistung eines Lagersystems wird durch die Anzahl der Arbeitsspiele, die in einem vorgegebenen Zeitraum durchgeführt werden können, bestimmt. Jede Ein- bzw. Auslagerung wird als Arbeitsspiel bezeichnet. Die benötigte Zeit zur Durchführung eines Arbeitsspieles wird als Spielzeit definiert. Es werden zwei Arten von Arbeitsspielen unterschieden. Ein Einzelspiel liegt vor, wenn nur eine Ein- oder Auslagerung durchgeführt wird. Ein Doppelspiel, oft auch als kombiniertes Spiel bezeichnet, liegt vor, wenn einer Einlagerung unmittelbar eine Auslagerung folgt (Abb. 3.1).

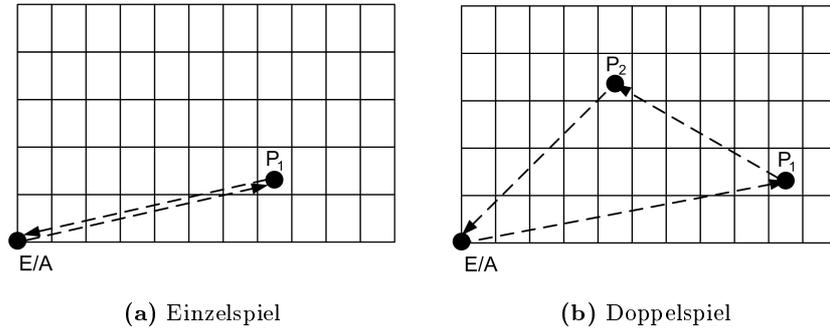


Abbildung 3.1: Fahrwege bei einem Einzel- und einem Doppelspiel in einem vollautomatischen Lager mit Regalbediengerät

Liegt ein Auftragsstrom von Ein- und Auslagerungen gemäß Abbildung 3.2 vor, lässt sich jeder Ein- und Auslagerauftrag einem Einzelspiel oder einem Doppelspiel zuordnen. Ist der prozentuale Anteil der Doppelspiele p_{ds} in einem Lager bekannt, gilt unter der

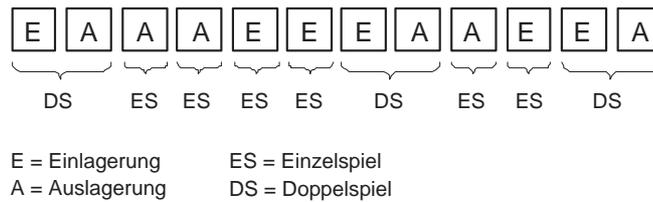


Abbildung 3.2: Zuordnung der Ein- und Auslageraufträge zu Einzel- bzw. Doppelspielen

Voraussetzung $p_{es} + p_{ds} = 1$ die Formel für die mittlere Arbeitsspielzeit:

$$t_{sp} = p_{es} \cdot t_{es} + p_{ds} \cdot \frac{t_{ds}}{2} \tag{3.5}$$

Der Vorteil des Doppelspiels liegt darin, dass bei der Durchführung einer Ein- und Auslagerung insgesamt nur drei Fahrwege zurückgelegt werden müssen, um zwei Lagerbewegungen zu realisieren (3.1). Würde man die beiden Lagerbewegungen im Einzelspiel durchführen, wären dafür vier Fahrwege notwendig. Die geringsten mittleren Spielzeiten pro Lagerbewegung werden daher erreicht, wenn der Doppelspielanteil 100 % beträgt. In diesem Fall gilt

$$t_{sp} = \frac{t_{ds}}{2} \quad , \quad \text{wenn } p_{ds} = 100\% \tag{3.6}$$

Die Spielzeit t_{sp} setzt sich aus mehreren Zeitanteilen zusammen. Sie werden in fixe und variable Anteile unterschieden.

Für die Einzelspielzeit t_{es} gilt

$$t_{es} = t_0 + 2 \cdot t_{gab} + t_{F,es} \quad (3.7)$$

- mit t_0 = Konstantanteil für Positionieren, Schalten, prüfen ob Fach belegt
 t_{gab} = Gabelspielzeit
 $t_{F,es}$ = mittlere Fahrzeit vom E/A-Punkt zum Ein- oder Auslagerplatz
 und zurück

Das Doppelspiel besteht aus den Zeitanteilen

$$t_{ds} = t_0 + 4 \cdot t_{gab} + t_{F,ds} \quad (3.8)$$

- mit $t_{F,ds}$ = mittlere Fahrzeit zur Durchführung eines Doppelspiels

Die Gabelspielzeit t_{gab} setzt sich aus der Gabelausfahrt, dem Heben bzw. Senken der Gabel und der Gabelrückfahrt zusammen. Abbildung 3.3 zeigt die Abläufe eines Einzel- und Doppelspiels. Die Gabelspielzeit und die Totzeit sind bei jedem Arbeitsspiel gleich

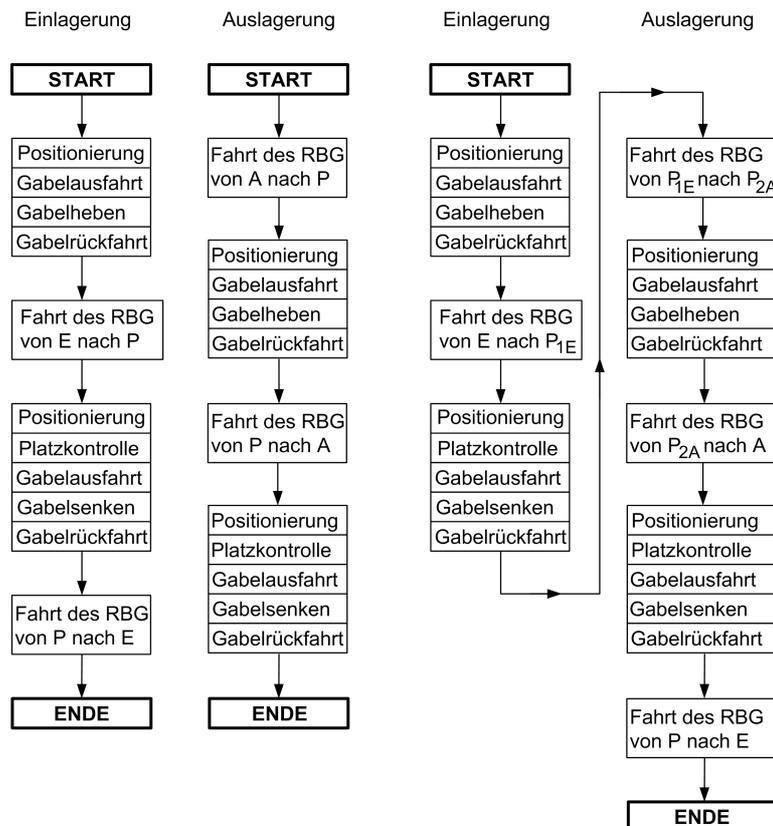


Abbildung 3.3: Einzel-/Doppelspiel [Quelle: FEM 9.851]

groß. Die Fahrzeit hängt dagegen von der Entfernung der Lagerplätze vom Ein- und

Auslagerpunkt (E/A-Punkt) ab. Um den durchschnittlichen Zeitbedarf eines Arbeitsspiels zu ermitteln, wird die mittlere Fahrzeit bestimmt. Diese hängt wiederum von der verwendeten Lagerstrategie ab.

Im Folgenden wird die Berechnung der Fahrzeit für ein Einzel- und ein Doppelspiel bei gleichverteilten Zugriffshäufigkeiten auf die Lagerfächer dargestellt. Die Berechnung der Spielzeiten bei Einsatz einer ABC-Zonung leitet sich daraus ab und ist ausführlich in [Arn05] und [Gud04] dargestellt.

Einzelspiel

Um die mittlere Fahrzeit $t_{F,es}$ zur Durchführung eines Einzelspiels zu ermitteln, muss die Summe der Fahrzeiten zu den Lagerfächern multipliziert mit der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit gebildet werden. Die Fahrzeit t_i beschreibt dabei den einfachen Weg zu einem Lagerort. Da das RBG die gleiche Zeit benötigt, um zurück zum E/A-Punkt zu gelangen, ergibt sich die mittlere Fahrzeit des Einzelspiels $t_{F,es}$ in der Form

$$t_{F,es} = 2 \cdot \sum_{i=1}^m t_i \cdot p_i \quad (3.9)$$

Da während der Fahrt des RBG die Bewegungen in x- und y-Richtung gleichzeitig durchgeführt werden, entsteht eine überlagerte Bewegung, die durch die Fahr diagonale ausgedrückt wird. Die Fahr diagonale teilt die Regalwand in eine obere und eine untere Hälfte. Ihre Steigung bestimmt sich durch das Verhältnis der Geschwindigkeiten v_x und v_y , weshalb sie auch Geschwindigkeitsgerade genannt wird (Abb. 3.4) [Gro84].

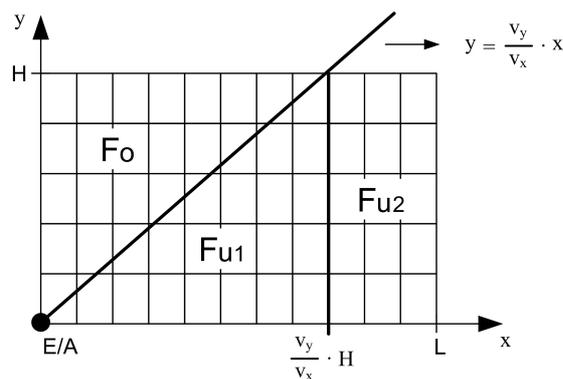


Abbildung 3.4: Regalwand mit Geschwindigkeitsgerade

Aufgrund der Überlagerung der Bewegungen ist für die Fahrzeit zu den Lagerfächern, die unterhalb der Geschwindigkeitsgeraden liegen, ausschließlich die Bewegung in x-Richtung ausschlaggebend, denn sie nimmt mehr Zeit in Anspruch als die Bewegung in y-Richtung. Für die Fahrzeit zu Lagerfächern, die oberhalb der Fahr diagonalen liegen, tritt genau der umgekehrte Fall ein, bei dem nur die Bewegung in y-Richtung die Fahrzeit

bestimmt. Da die Zugriffshäufigkeit auf jedes Lagerfach definitionsgemäß gleich sein soll, ergibt sich die Eintrittswahrscheinlichkeit p_i als Kehrwert der Lagerfachanzahl m :

$$p_i = \frac{1}{m} \quad (3.10)$$

Unterscheidet man in (3.9) nach Fahrzeiten zu Fächern, die unterhalb der Fahrdiagonalen liegen (t_i) und Fächern, die oberhalb der Fahrdiagonalen liegen (t_j), ergibt sich durch Einsetzen von (3.10) in (3.9) $t_{F,es}$ zu

$$t_{F,es} = 2 \cdot \frac{1}{m} \cdot \left(\sum_{i=1}^{m_u} t_i + \sum_{j=1}^{m_o} t_j \right) \quad (3.11)$$

Mit der Definition des Mittelwertes ergeben sich die mittleren Fahrzeiten für Lagerplätze unterhalb (t_u) und oberhalb (t_o) der Geschwindigkeitsgeraden.

$$t_u = \frac{\sum_{i=1}^{m_u} t_i}{m_u} \implies \sum_{i=1}^{m_u} t_i = t_u \cdot m_u \quad (3.12)$$

$$t_o = \frac{\sum_{j=1}^{m_o} t_j}{m_o} \implies \sum_{j=1}^{m_o} t_j = t_o \cdot m_o \quad (3.13)$$

Durch Einsetzen der Beziehungen (3.12) und (3.13) in (3.11) ergibt sich die Fahrzeit $t_{F,es}$ zu

$$\begin{aligned} t_{F,es} &= 2 \cdot \frac{1}{m} \cdot [t_u \cdot m_u + t_o \cdot m_o] \\ &= 2 \cdot \left[\frac{m_u}{m} \cdot t_u + \frac{m_o}{m} \cdot t_o \right] \end{aligned} \quad (3.14)$$

Die Quotienten $\frac{m_u}{m}$ und $\frac{m_o}{m}$ beschreiben gerade die Wahrscheinlichkeit p_u und p_o für das Eintreten der Fahrzeiten t_u bzw. t_o . Die mittlere Fahrzeit für ein Einzelspiel erhält man dann durch

$$t_{F,es} = 2 \cdot (p_u \cdot t_u + p_o \cdot t_o) \quad (3.15)$$

Befinden sich beispielsweise 30 Lagerfächer unterhalb und 10 oberhalb der Fahrdiagonalen, beträgt die Wahrscheinlichkeit für die Anfahrt eines der unteren Fächer $30/40 = 3/4$ und für eines der oberen $10/40 = 1/4$. Sind alle Lagerfächer gleich groß, können die

Wahrscheinlichkeiten p_u und p_o auch über die Flächenverhältnisse beschrieben werden. Es gilt dann

$$p_u = \frac{A_u}{A} \quad (3.16)$$

$$p_o = \frac{A_o}{A} \quad (3.17)$$

Für die Berechnung der mittleren Wegzeiten t_u und t_o wird angenommen, dass immer die Standardfahrrampe gefahren wird. Mit (4.15) gilt dann für die Fahrzeiten

$$t_u = \frac{v_x}{a_x} + \frac{x_u}{v_x} \quad (3.18)$$

$$t_o = \frac{v_y}{a_y} + \frac{y_o}{v_y} \quad (3.19)$$

Die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des RBG werden als bekannt vorausgesetzt.

Die mittleren Wegstrecken in x- und y-Richtung x_u und y_o ergeben sich für den Fall $\omega \leq 1$ und den Übergang von der diskreten in die infinitesimale Betrachtung durch den Zusammenhang [Gro84]

$$\begin{aligned} x_u &= \frac{1}{A_u} \cdot \left[\int_0^{\frac{v_x \cdot H}{v_y}} \int_0^{\frac{v_y \cdot x}{v_x}} x \cdot dy \cdot dx \right] + \frac{1}{A_u} \cdot \left[\int_{\frac{v_x \cdot H}{v_y}}^L \int_0^H x \cdot dy \cdot dx \right] \\ &= \frac{1}{A_u} \cdot \left[\int_0^{\frac{v_x \cdot H}{v_y}} [x \cdot y]_0^{\frac{v_y \cdot x}{v_x}} \cdot dx + \int_{\frac{v_x \cdot H}{v_y}}^L [x \cdot y]_0^H \cdot dx \right] \\ &= \frac{1}{A_u} \cdot \left[\int_0^{\frac{v_x \cdot H}{v_y}} x^2 \cdot \frac{v_y}{v_x} \cdot dx + \int_{\frac{v_x \cdot H}{v_y}}^L x \cdot H \cdot dx \right] \\ &= \frac{1}{A_u} \cdot \left[\left[\frac{1}{3} \cdot x^3 \cdot \frac{v_y}{v_x} \right]_0^{\frac{v_x \cdot H}{v_y}} + \frac{1}{2} \cdot [x^2 \cdot H]_{\frac{v_x \cdot H}{v_y}}^L \right] \\ &= \frac{1}{A_u} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{v_x^3}{v_y^3} \cdot H^3 \cdot \frac{v_y}{v_x} + \frac{1}{2} \cdot L^2 \cdot H - \frac{1}{2} \left(\frac{v_x}{v_y} \cdot H \right)^2 \cdot H \right] \\ &= \frac{1}{A_u} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{v_x^2}{v_y^2} \cdot H^3 - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_x^2}{v_y^2} \cdot H^3 + \frac{1}{2} \cdot L^2 \cdot H \right] \\ &= \frac{1}{A_u} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot L^2 \cdot H - \frac{1}{6} \cdot \frac{v_x^2}{v_y^2} \cdot H^3 \right] \end{aligned} \quad (3.20)$$

Die mittlere Weglänge oberhalb der Geschwindigkeitsgeraden kann in analoger Weise hergeleitet werden. Es gilt

$$\begin{aligned}
 y_o &= \frac{1}{A_o} \cdot \left[\int_0^H \int_0^{\frac{v_x}{v_y} \cdot y} y \cdot dx \cdot dy \right] \\
 &= \frac{1}{A_o} \cdot \int_0^H [y \cdot x]_0^{\frac{v_x}{v_y} \cdot y} \cdot dy \\
 &= \frac{1}{A_o} \cdot \int_0^H \left(y \cdot \frac{v_x}{v_y} \cdot y \right) \cdot dy \\
 &= \frac{1}{A_o} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot y^3 \cdot \frac{v_x}{v_y} \right]_0^H \\
 &= \frac{1}{A_o} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{v_x}{v_y} \cdot H^3
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

Einsetzen von (3.16), (3.17), (3.18) und (3.19) in (3.15) liefert die mittlere Wegzeit bei der Durchführung eines Einzelspieles unter der Voraussetzung $\omega \leq 1$.

$$\begin{aligned}
 t_{F,es}^{\omega \leq 1} &= 2 \cdot \frac{\left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{x_u}{v_x} \right) \cdot A_u + \left(\frac{v_y}{a_y} + \frac{y_o}{v_y} \right) \cdot A_o}{A} \\
 &= 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{A_u}{A} \cdot \frac{x_u}{v_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{y_o}{v_y} \right]
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Durch Einsetzen von (3.20) und (3.21) in (3.22) ergibt sich

$$\begin{aligned}
t_{F,es}^{\omega \leq 1} &= 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} \right. \\
&\quad \left. + \frac{A_u}{A} \cdot \left[\frac{1}{A_u} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{v_x^2}{v_y^2} \cdot H^3 - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_x^2}{v_y^2} \cdot H^3 + \frac{1}{2} \cdot L^2 \cdot H \right) \right] \cdot \frac{1}{v_x} \right. \\
&\quad \left. + \frac{A_o}{A} \cdot \left[\frac{1}{A_o} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{v_x}{v_y} \cdot H^3 \right) \right] \cdot \frac{1}{v_y} \right] \\
&= 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{A} \cdot \left[\frac{v_x \cdot H^3}{3 \cdot v_y^2} - \frac{v_x \cdot H^3}{2 \cdot v_y^2} + \frac{L^2 \cdot H}{2 \cdot v_x} \right] \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{A} \cdot \left[\frac{v_x \cdot H^3}{3 \cdot v_y^2} \right] \right] \\
&= 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{1}{A} \cdot \left[\frac{v_x \cdot H^3}{3 \cdot v_y^2} + \frac{v_x \cdot H^3}{3 \cdot v_y^2} - \frac{v_x \cdot H^3}{2 \cdot v_y^2} + \frac{L^2 \cdot H}{2 \cdot v_x} \right] \right] \\
&= 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{1}{A} \cdot \left[\frac{v_x \cdot H^3}{6 \cdot v_y^2} + \frac{L^2 \cdot H}{2 \cdot v_x} \right] \right] \\
&= 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{1}{A} \cdot \frac{L^2 \cdot H}{v_x} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \frac{v_x^2 \cdot H^2}{v_y^2 \cdot L^2} \right] \right] \\
&= 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{1}{A} \cdot \frac{L^2 \cdot H}{v_x} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{v_x}{v_y} \cdot \frac{H}{L} \right)^2 \right] \right]
\end{aligned}$$

Setzt man $A = H \cdot L$ in die Formel ein, ergibt sich die mittlere Fahrzeit zu

$$t_{F,es}^{\omega \leq 1} = 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{L}{v_x} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{v_x}{v_y} \cdot \frac{H}{L} \right)^2 \right] \right] \quad (3.23)$$

Für den Fall $\omega = 1$ vereinfacht sich die Formel zu

$$t_{F,es}^{\omega=1} = \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} + \frac{4}{3} \cdot \frac{L}{v_x} \quad (3.24)$$

Die Einzelspielzeit t_{es} ergibt sich durch Einsetzen von (3.23) in (3.7):

$$t_{es}^{\omega \leq 1} = t_o + 2 t_{gab} + 2 \left[\frac{A_u}{A} \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \frac{v_y}{a_y} + \frac{L}{v_x} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(\frac{v_x}{v_y} \frac{H}{L} \right)^2 \right] \right] \quad (3.25)$$

Für den Fall $\omega = 1$ vereinfacht sich der Term zu

$$t_{es}^{\omega=1} = t_o + 2 t_{gab} + \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} + \frac{4}{3} \frac{L}{v_x} \quad (3.26)$$

Bei einem **Doppelspiel** werden, im Gegensatz zum Einzelspiel, eine Einlagerung und eine Auslagerung in einem Arbeitsspiel ausgeführt. Die Wegstrecke, die dabei zurückgelegt wird, setzt sich aus drei Zeitanteilen zusammen (Abb. 3.1). Zunächst fährt das Regalbediengerät (RBG) vom E/A-Punkt zum Einlagerplatz P_1 und lagert dort die Ladeeinheit ein. Anschließend bewegt sich das RBG zum Auslagerort P_2 , um die auszulagernde Ladeeinheit aufzunehmen. Abschließend fährt das RBG zum E/A-Punkt, um die Ladeeinheit an die Fördertechnik der Lagervorzone zu übergeben. Die Wegzeit kann allgemein durch die Beziehung

$$t_{ds} = t_{E,P_1} + t_{P_1,P_2} + t_{P_2,A} \quad (3.27)$$

beschrieben werden. Die mittleren Wegzeiten t_{E,P_1} und $t_{P_2,A}$ entsprechen, bei gleichverteilten Zugriffshäufigkeiten auf alle Lagerplätze, der mittleren Wegzeit t_{es} , die durch (3.23) gegeben ist.

Die mittlere Wegzeit $t_{P_1P_2}$ ergibt sich durch die Summe aller Wegzeiten t_{ij} , multipliziert mit der entsprechenden Eintrittswahrscheinlichkeit p_{ij} . Es gilt

$$t_{P_1P_2} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m t_{ij} \cdot p_{ij} \quad (3.28)$$

Da die Wahrscheinlichkeit für die Zugriffshäufigkeit auf die Lagerfächer gleichverteilt ist, ergibt sich für jede Kombination eines Lagerfaches mit einem anderen Lagerfach ($i \neq j$) die Wahrscheinlichkeit

$$p_{ij} = \frac{1}{m \cdot (m - 1)} \quad (3.29)$$

Aufgrund der überlagerten Bewegung in x- und y-Richtung gilt für die Wegzeit t_{ij}

$$t_{ij} = \max[t_{x_i,x_j}; t_{y_i,y_j}] \quad (3.30)$$

Einsetzen von (3.29) und (3.30) in (3.28) liefert

$$t_{P_1P_2} = \frac{1}{m \cdot (m - 1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \max[t_{x_i,x_j}; t_{y_i,y_j}] \quad (3.31)$$

Mit Annahme der Standardfahrrampe zwischen den Lagerplätzen P_i und P_j ergeben sich die Fahrzeiten mit den Gleichungen (3.18) und (3.19) zu

$$t_{x_i,x_j} = \frac{|x_i - x_j|}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \quad (3.32)$$

bzw.

$$t_{y_i, y_j} = \frac{|y_i - y_j|}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} \quad (3.33)$$

Beim Übergang zur Infinitesimalbetrachtung ergibt sich das Vierfachintegral

$$t_{ij} = \frac{1}{(LH)^2} \int_0^H \int_0^H \int_0^L \int_0^L \max \left[\left(\frac{|x_i - x_j|}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right); \left(\frac{|y_i - y_j|}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} \right) \right] dx_i dx_j dy_i dy_j$$

Die Lösung dieses Integrals liefert [Lip03]

$$t_{ij} = \begin{cases} \frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{L}{v_x} \cdot \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6} \cdot \omega^2 - \frac{1}{30} \cdot \omega^3 \right) & \omega \leq 1 \\ \frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{H}{v_y} \cdot \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{\omega^2} - \frac{1}{30} \cdot \frac{1}{\omega^3} \right) & \omega > 1 \end{cases} \quad (3.34)$$

Für den Fall, dass der Regalwandparameter $\omega = 1$ ist, ergibt sich t_{ij} zu

$$t_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \frac{14}{30} \frac{L}{v_x} \quad (3.35)$$

Die Fahrzeit eines Doppelspiels ergibt sich für den Fall, dass der Regalwandparameter $\omega = 1$ ist, durch Addition von (3.24) und (3.35) zu

$$\begin{aligned} t_{F, ds}^{\omega=1} &= \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} + \frac{4}{3} \cdot \frac{L}{v_x} + \frac{1}{2} \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \frac{14}{30} \frac{L}{v_x} \\ &= \frac{3}{2} \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \frac{54}{30} \frac{L}{v_x} \end{aligned} \quad (3.36)$$

Die Doppelspielzeit t_{ds} , ergibt sich durch Einsetzen von (3.36) in (3.8) zu

$$t_{ds} = t_o + 4 \cdot t_{gab} + \frac{3}{2} \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{v_z}{a_z} \right) + \frac{54}{30} \frac{L}{v_x} \quad (3.37)$$

3.4 Leistungsermittlung von Förderelementen

Die Leistungsangabe eines Förderelementes wird durch den erzielbaren Durchsatz definiert. Diese Angabe ist bei Förderelementen vom Typ (1/1) einfach zu ermitteln. Bei Transportknoten des Typs (m/1), (1/n) oder auch (m/n) ist die Berechnung von der Abfertigungsstrategie und der Bauform des Transportknotens abhängig.

3.4.1 Fördererelemente vom Typ (1/1)

Bei geraden Strecken, die eine Fördereinheit aktiv fortbewegen, ist die Kenntnis ihres Geschwindigkeit-Zeit-Verhaltens von Bedeutung. Für stetige Fördermittel kann die Geschwindigkeit v angegeben werden, die als mittlere Fahrgeschwindigkeit die Anfahr- und Bremsvorgänge sowie eine reduzierte Geschwindigkeit in Kurven berücksichtigt. Eine weitere entscheidende Größe ist der maximale Abstand s zwischen zwei Fördereinheiten auf der betrachteten Förderstrecke. Somit berechnet sich der Durchsatz einer Förderstrecke im einfachsten Fall aus der Geschwindigkeit v sowie dem Abstand s der Fördereinheiten [Arn05]:

$$\lambda = \frac{v}{s} \left[\frac{1}{ZE} \right] \quad (3.38)$$

Der maximale Durchsatz wird erreicht, wenn die Fördereinheiten auf der Fördertechnik lückenlos hintereinander herfahren, wobei s der Länge der Fördereinheiten entspricht. Da dieser Fall relativ selten realisiert werden kann, muss der maximale Abstand, der zwischen den Fördereinheiten aufgrund der Begebenheiten der Förderstrecke entsteht, ermittelt werden. Auf ebener Strecke entsteht ein Abstand, wenn die Fördereinheiten beispielsweise in einer Kurve auseinandergeschoben werden.

In der Lagervorzone eines Lagersystems mit mehreren Gassen werden oftmals Eckumsetzer zum Zusammenführen der Förderstrecken eingesetzt. In diesem Fall muss die Zeit bestimmt werden, die ein Eckumsetzer für die Bearbeitung einer Fördereinheit benötigt. Durch die Verzögerung ergibt sich hinter dem Eckumsetzer ein Abstand zwischen den Fördereinheiten. Der maximale Abstand auf der betrachteten Förderstrecke ist maßgeblich für die Durchsatzberechnung.

3.4.2 Fördererelemente vom Typ (m/n)

Der maximale Durchsatz eines Transportknotens des Typs (m/n) ergibt sich aus der Summe der Teilströme λ_i mit $i = 1, 2, 3, \dots, m$. Dabei ist das Verhältnis der Stromstärken zueinander maßgeblich für den erzielbaren Durchsatz. In der Literatur wird daher geprüft, ob ein Transportknoten unter Vorgabe der jeweiligen Stromstärken λ_i eine Auslastung von 100 % unterschreitet. Bei einer Auslastung von genau 100 % ist der maximale Durchsatz erreicht.

Zur Berechnung der Auslastung eines Transportknotens geht man zunächst davon aus, dass sich der Transportknoten über den gesamten Betrachtungszeitraum in der Betriebsart i befindet.

Unter dieser Voraussetzung kann eine theoretische maximale Anzahl von Objekten des Stroms i den Knoten durchlaufen. Dieser maximale Durchsatz wird als partielle Grenzleistung μ_i definiert. Die partielle Grenzleistung ergibt sich direkt aus der minimalen mittleren Zwischenankunftszeit τ_i der Objekte des Stroms i :

$$\mu_i = \frac{1}{\tau_i} \quad (3.39)$$

Der Quotient aus der tatsächlichen Stromstärke λ_i und der partiellen Grenzleistung μ_i quantifiziert den prozentualen Anteil des Stroms i an der insgesamt zur Verfügung stehenden Zeit. Er wird auch als Verkehrswert bezeichnet. Es gilt

$$\frac{\lambda_i}{\mu_i} = \rho_i \quad (3.40)$$

Da einem Transportknoten insgesamt 100 % der verfügbaren Zeit zur Abwicklung aller Ströme zur Verfügung stehen, gilt

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \dots + \frac{\lambda_k}{\mu_k} \leq 1 \quad (3.41)$$

Bei einem Wechsel von der Betriebsart i auf die Betriebsart j entstehen durch den Umschaltvorgang Verlustzeiten. Der Verlustzeitanteil hängt von der Umschaltfrequenz ν , die durch die Abfertigungsstrategie bestimmt wird, von der technisch bedingten Umschaltzeit t_{ij}^{ums} von Strom i auf Strom j und von den jeweiligen Materialstromstärken ab. Der Verlustzeitanteil wird durch die Funktion f beschrieben. Der entstehende Verlustzeitanteil muss von der zur Verfügung stehenden Kapazität eines Knotens abgezogen werden. Damit ergibt sich (3.41) zu

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \dots + \frac{\lambda_i}{\mu_i} + f \leq 1 \quad (3.42)$$

Dieser Zusammenhang wird auch als das allgemeine Materialflussgesetz bezeichnet. Für den Fall, dass zwei Ströme zusammengeführt werden, lässt sich der Zusammenhang aus (3.41) auch in die Form

$$\lambda_1 \leq \left(1 - \frac{\lambda_2}{\mu_2}\right) \cdot \mu_1 \quad (3.43)$$

überführen. Sind μ_1 und μ_2 bekannt, lässt sich die Abhängigkeit der Materialstromstärken durch ein Grenzleistungsdiagramm gemäß Abbildung 3.5 darstellen. Werden die Verlustzeitanteile berücksichtigt, ergibt sich das Grenzleistungsdiagramm für einen Transportknoten der Ordnung 3 gemäß Abbildung 3.6.

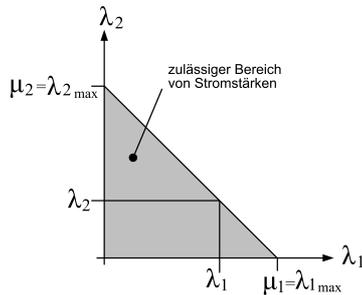


Abbildung 3.5: Grenzleistungsdiagramm ohne Verlustzeiten

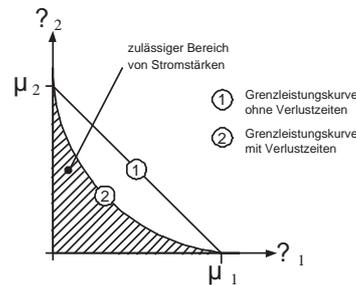


Abbildung 3.6: Grenzleistungsdiagramm mit Verlustzeiten

Zur Bestimmung der partiellen Grenzleistung eines Materialstroms muss die minimale mittlere Zwischenankunftszeit der Objekte ermittelt werden. Diese ergibt sich für stetige Transportknoten aus der Division des geometrischen Mindestabstands s_o und der Geschwindigkeit des Förderers v . Es gilt

$$\tau_i = \frac{s_o}{v} \quad (3.44)$$

Bei der unstetigen Abfertigungsart entspricht τ_i der Zykluszeit zur Bearbeitung von c Objekten. Dies soll am Beispiel eines Verschiebewagens (Abb. 3.7) erläutert werden.

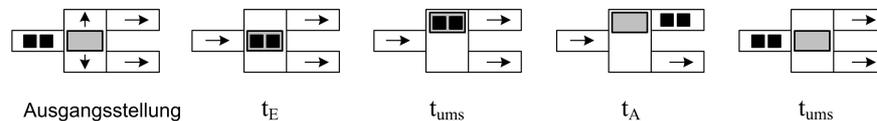


Abbildung 3.7: Zyklus eines Verschiebewagens der Kapazität $c = 2$

Zunächst fahren c Objekte der Stromrichtung eins in der Zeit t_E in den Verschiebewagen ein. Anschließend fährt der Verschiebewagen in der Zeit t_{ums} zur Ausgangsrichtung. Die c Objekte fahren in der Zeit t_A aus dem Konfliktbereich heraus. Abschließend bewegt sich der Verschiebewagen zurück in die Ausgangsstellung. Damit ergibt sich τ_i zu

$$\tau_i = t_E(c) + t_{ums} + t_A(c) + t_{ums} \quad (3.45)$$

Die partielle Grenzleistung eines Stroms ist bei unstetiger Abfertigung von der Kapazität c des Konfliktbereiches abhängig. Kann aufgrund der Betriebsstrategie nicht immer die maximale Anzahl Objekte abgefertigt werden, muss der Strom in Teilströme $\lambda_i(x)$ zerlegt werden. Somit beschreibt $\lambda_i(x)$ die Stromrichtung i , bei der jeweils x Objekte abgefertigt werden. Bei dieser Betrachtungsweise ist der Strom $\lambda_i = \sum_{x=1}^{c_i} \lambda_i(x)$ in c_i Teilströme $\lambda_i(x)$, $x = 1, \dots, c_i$ zerlegt, die einzeln mit der jeweiligen Grenzleistung $\mu_i(x)$ abgefertigt werden (Abb. 3.8).

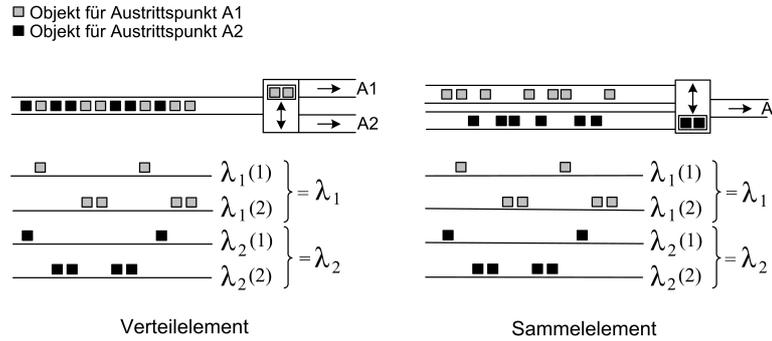


Abbildung 3.8: Prinzip der Flusszerlegung am Beispiel eines Verteilwagens mit der Kapazität $c = 2$ [Gro84]

Für das allgemeine Materialflussgesetz ergibt sich somit

$$\sum_{i=1}^k \sum_{x=1}^{c_i} \frac{\lambda_i(x)}{\mu_i(x)} + f \leq 1 \quad (3.46)$$

Um den Durchsatz eines Transportknotens bestimmen zu können, muss abschließend der funktionale Zusammenhang für f bestimmt werden. Der Verlustzeitanteil ergibt sich aus der Umschaltfrequenz ν_{ij} multipliziert mit der Zeit, die beim Wechsel der Betriebsart tatsächlich „verloren“ geht. Die Verlustzeit t_{ij}^{ver} wird als charakteristische Zwischenzeit bezeichnet [Gro84]. Sie beschreibt das Zeitintervall, das zwischen dem letzten Objekt der Richtung i und dem ersten Objekt der Richtung j liegt, abzüglich des minimalen zeitlichen Abstands von zwei Objekten der Richtung j . Es gilt

$$t_{ij}^{ver} = \begin{cases} 0 & \text{für } \tau_j \geq t_{ij}^{ums} + t_j^{bel} \\ t_{ij}^{ums} + t_j^{bel} - \tau_j & \text{für } \tau_j < t_{ij}^{ums} + t_j^{bel} \end{cases} \quad (3.47)$$

t_{ij}^{ver} = Verlustzeit, die bei einer Umschaltung von der Betriebsart i zur Betriebsart j entsteht.

t_{ij}^{ums} = Umschaltzeit von Betriebsart i zur Betriebsart j

t_j^{bel} = Fahrzeit durch den Konfliktbereich eines Objekts der Richtung j

τ_j = minimaler Zeitabstand von zwei Objekten der Richtung j

Abbildung 3.9 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Bei unstetigen Transportknoten ist die Summe aus Belegungs- und Umschaltzeit technisch bedingt i. d. R. kleiner als der minimale Zeitabstand von zwei Objekten einer Richtung. Somit ergeben sich Umschaltverluste im Regelfall nur bei stetigen Transportknoten. Das allgemeine Materialflussgesetz kann damit durch die Formel

$$\sum_{x=1}^k \sum_{x=1}^{c_i} \frac{\lambda_i(x)}{\mu_i(x)} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \nu_{ij} \cdot t_{ij}^{ver} \leq 1 \quad (3.48)$$

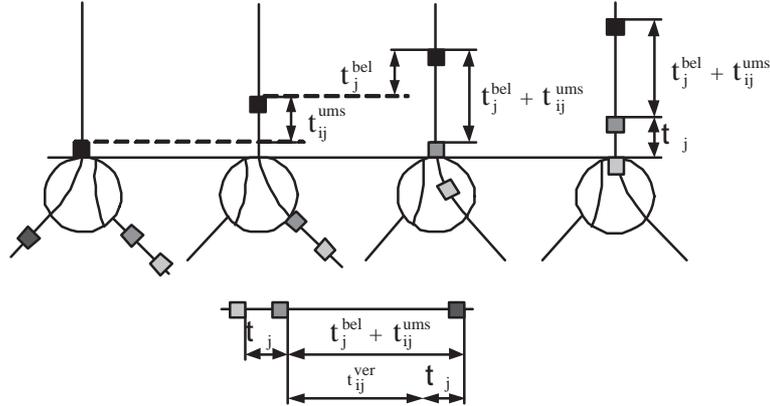


Abbildung 3.9: Ermittlung der Verlustzeit t_{ij}^{ver}

beschrieben werden. Das allgemeine Materialflussgesetz gilt für alle technischen Ausführungsformen von Transportknoten.

3.4.2.1 Stochastische Abfertigung

Bei stochastischer Abfertigung an einem **unstetigen** Transportknoten gilt für die Partialströme $\lambda_i(x)$

$$\lambda_i(x) = p_i(x) \cdot \lambda \quad (3.49)$$

Darin ist $p_i(x)$ der Wert, der die Wahrscheinlichkeit für die Abfertigung eines Pulks von x Objekten der i -ten Stromrichtung am Gesamtstrom angibt.

Für die Berechnung der einzelnen Wahrscheinlichkeiten $p_i(x)$ müssen zwei Fälle unterschieden werden. Im ersten Fall ist die Anzahl der Objekte des Pulks kleiner als die Kapazität c_i . Im zweiten Fall ist die Anzahl der Objekte eines Pulks größer oder gleich der Kapazität des Knotens c_i .

$$p_i(x) = \begin{cases} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^x \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_i}{\lambda}\right) & \text{für } x < c_i \\ \left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^{c_i} & \text{für } x \geq c_i \end{cases} \quad (3.50)$$

Der Faktor $\left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^x$ gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass x Objekte des Stroms i hintereinander erscheinen. Der Faktor $\left(\frac{\lambda - \lambda_i}{\lambda}\right)$ drückt die Wahrscheinlichkeit aus, dass das nächste Objekt nicht zu dem Strom i gehört. Der Faktor $\left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^{c_i}$ ist die bedingte

Wahrscheinlichkeit dafür, dass c Objekte von der Strecke i kommen, da mehr in einem Schub nicht verarbeitet werden können. Einsetzen von (3.50) in (3.49) liefert

$$\lambda_i(x) = \begin{cases} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^x \cdot (\lambda - \lambda_i) & \text{für } x < c_i \\ \left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^{c_i} \cdot \lambda & \text{für } x \geq c_i \end{cases} \quad (3.51)$$

Die Anzahl der Umschaltungen ν_{ij} von Betriebsart i zur Betriebsart j berechnet sich aus der Wahrscheinlichkeit für die Umschaltung von i nach j gemessen an dem Gesamtstrom λ .

$$\nu_{ij} = p_{ij} \cdot \lambda \quad (3.52)$$

p_{ij} gibt gerade die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür an, dass nach einem Objekt des Stroms λ_i als nächstes ein Objekt des Stroms λ_j abgefertigt werden muss.

$$p_{ij} = \frac{\lambda_i}{\lambda} \cdot \frac{\lambda_j}{\lambda} \quad (3.53)$$

ν_{ij} ergibt durch Einsetzen von (3.53) in (3.52) zu

$$\nu_{ij} = \frac{\lambda_i \cdot \lambda_j}{\lambda} \quad (3.54)$$

Einsetzen von (3.51) und (3.54) in (3.48) liefert das allgemeine Materialflussgesetz für die stochastische, unstetige Abfertigung:

$$\sum_{i=1}^k \left\{ \left[\sum_{x=1}^{c_i-1} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^x \cdot \frac{\lambda - \lambda_i}{\mu_i(x)} \right] + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^{c_i} \cdot \frac{\lambda}{\mu_i(c_i)} \right\} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_i \cdot \lambda_j}{\lambda} \cdot t_{ij}^{ver} \leq 1 \quad (3.55)$$

Bei **stetiger** Abfertigung entfällt eine Betrachtung der Kapazität c , wodurch sich (3.48) zu

$$\sum_{i=1}^k \frac{\lambda_i}{\mu_i} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_i \cdot \lambda_j}{\lambda} \cdot t_{ij}^{ver} \leq 1 \quad (3.56)$$

vereinfacht.

3.4.2.2 Schubweise Abfertigung

Im Fall von schubweiser Abfertigung mit fester Abfertigungszeit wird jeder Stromrichtung i unabhängig von der Stromstärke ein konstanter Zeitanteil T_i zugeteilt. Nach dem Durchlauf aller Stromrichtungen beginnt der Zyklus wieder von vorne. Die Zykluszeit T_z ergibt sich aus

$$T_z = \sum_{i=1}^k T_i + \underbrace{\sum_{j=1}^{k-1} t_{j,j+1}^{ums} + t_{k,1}^{ums}}_{\text{Umschaltzeit pro Zyklus}} \quad (3.57)$$

$$\begin{aligned} T_i &= \text{konstanter Zeitanteil, der der Richtung } i \text{ zur Verfügung steht} \\ t_{j,j+1}^{ums} &= \text{Umschaltzeit zwischen der Abfertigung des Stroms } j \text{ und des} \\ &\quad \text{Stroms } j + 1 \\ t_{k,1}^{ums} &= \text{Umschaltzeit des letzten Stroms } k \text{ auf den ersten Strom} \end{aligned}$$

Der Kehrwert der Zykluszeit T_Z entspricht der Anzahl der Zyklen pro Zeiteinheit. Es gilt [Gro84]

$$\nu = \frac{1}{T_z} \quad (3.58)$$

Der Belegungsanteil eines Stroms i , der durch das Verhältnis von λ_i und μ_i gegeben ist, entspricht maximal dem zeitlichen Anteil T_i an der Zykluszeit T_Z . Es gilt

$$\frac{\lambda_i}{\mu_i(c_i)} \leq \frac{T_i}{T_Z} \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, k \quad (3.59)$$

Mit (3.58) ergibt sich

$$\frac{\lambda_i}{\mu_i(c_i)} \leq \nu \cdot T_i \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, k \quad (3.60)$$

c_i beschreibt die maximale Abfertigungskapazität für Objekte der Stromrichtung i für unstetige Knoten oder Sammelemente. Liegt eine stetige Abfertigung vor, wird c_i nicht berücksichtigt. Ist die Bedingung (3.60) für jeden Strom i erfüllt, dann gilt auch der Zusammenhang

$$\sum_{i=1}^k \frac{\lambda_i}{\mu_i(c_i)} \leq \sum_{i=1}^k \nu \cdot T_i$$

Auf beiden Seiten der Gleichung sind bisher die Umschaltzeiten gemäß (3.57) nicht berücksichtigt. Der Umschaltzeitanteil ergibt sich aus der Division von Umschaltzeit

und Zykluszeit T_Z . Er muss auf beiden Seiten der Gleichung addiert werden, da er die zur Verfügung stehende Zeit einschränkt. Mit (3.58) ergibt sich

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k \frac{\lambda_i}{\mu_i(c_i)} + \nu \left(\sum_{j=1}^{k-1} t_{j,j+1}^{ums} + t_{k,1}^{ums} \right) &\leq \sum_{i=1}^k \nu \cdot T_i + \nu \left(\sum_{j=1}^{k-1} t_{j,j+1}^{ums} + t_{k,1}^{ums} \right) \\ \implies \sum_{i=1}^k \frac{\lambda_i}{\mu_i(c_i)} + \nu \left(\sum_{j=1}^{k-1} t_{j,j+1}^{ums} + t_{k,1}^{ums} \right) &\leq \underbrace{\nu \cdot \left(\sum_{i=1}^k T_i + \sum_{j=1}^{k-1} t_{j,j+1}^{ums} + t_{k,1}^{ums} \right)}_{T_Z} \end{aligned}$$

Mit $T_Z \cdot \nu = 1$ vereinfacht sich der Term zu [Gro84]

$$\sum_{i=1}^k \frac{\lambda_i}{\mu_i(c_i)} + \nu \cdot \left(\sum_{j=1}^{k-1} t_{j,j+1}^{ums} + t_{k,1}^{ums} \right) \leq 1 \quad (3.61)$$

3.4.2.3 Vorfahrt

Wird an einem Zusammenführungselement ein Materialstrom λ_H gegenüber einem Materialstrom λ_N bevorzugt behandelt, liegt also eine Vorfahrtregel vor, muss zur Abfertigung eines Nebenstromobjektes die sogenannte Bruttozeitlücke τ_B zwischen zwei Objekten des Hauptstroms eine ausreichende Größe aufweisen.

Bei **absoluter Vorfahrt** ergibt sich die erforderliche Bruttozeitlücke τ_B durch Addition der Durchlaufzeit τ_H eines Objektes des Hauptstroms durch den Konfliktbereich, der Umschaltzeit t_{HN}^{ums} von der Hauptstromrichtung zur Nebenstromrichtung und zurück, sowie der Durchlaufzeit des Objektes des Nebenstroms τ_N . Bei relativer Vorfahrt entspricht die Bruttozeitlücke gerade der Durchlaufzeit τ_H eines Objektes des Hauptstroms durch den Konfliktbereich [Gro84]. Es gilt

$$\tau_B = \begin{cases} t_{HN}^{ums} + \tau_H + \tau_N & \text{absolute Vorfahrt} \\ \tau_H & \text{relative Vorfahrt} \end{cases} \quad (3.62)$$

- τ_B = Bruttozeitlücke
- t_{HN}^{ums} = Umschaltzeit von der Hauptstromrichtung zur Nebenstromrichtung und zurück
- τ_H = minimale Durchlaufzeit für das nächste Objekt der Stromrichtung H
- τ_N = Durchlaufzeit für das Objekt des Nebenstroms
- $\tau_B - \tau_H$ = Nettozeitlücke

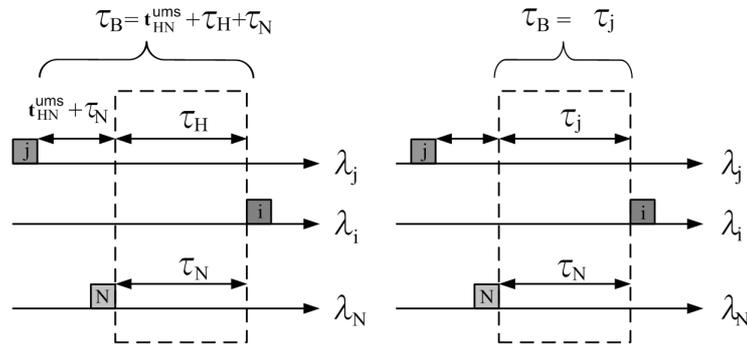


Abbildung 3.10: Zeitlücken im Hauptstrom bei Vorfahrt

Abbildung 3.10 zeigt den Zusammenhang zwischen der Bruttozeitlücke und den entsprechenden Zeitanteilen für die absolute und die relative Vorfahrt.

Für den Durchlauf von k Objekten der Nebenstromrichtung ergibt sich die erforderliche Bruttozeitlücke zu:

$$\tau_B = \begin{cases} t_{HN}^{ums} + \tau_H + k \cdot \tau_N & \text{absolute Vorfahrt} \\ \tau_H + (k - 1) \cdot \tau_N & \text{relative Vorfahrt} \end{cases} \quad (3.63)$$

Definiert man \bar{k} als die mittlere Anzahl Nebenstromobjekte, die zwischen zwei Objekten des Hauptstroms einen Konfliktbereich durchlaufen können, dann gilt für den Nebenstrom λ_N [Gud76, Gro84, Arn05]:

$$\lambda_N \leq \lambda_H \cdot \bar{k} \quad (3.64)$$

Dieser Zusammenhang wird auch als das „allgemeine Materialflussgesetz bei Vorfahrt“ bezeichnet. Liegt beispielsweise ein Hauptstrom $\lambda_H = 100$ [Stk/h] vor und ist bekannt, dass $\bar{k} = 0,25$ Nebenstromobjekte zwischen zwei Hauptstromobjekten abgefertigt werden können, dann ergibt sich für den Nebenstrom eine maximale Stromstärke von $\lambda_N = 25$ [Stk/h].

Definiert man k als die absolute Anzahl der Nebenstromobjekte, die zwischen zwei Hauptstromobjekten den Konfliktbereich passieren können, und p_k als die zugehörige Eintrittswahrscheinlichkeit, dann ergibt sich die mittlere Anzahl der Nebenstromobjekte \bar{k} zu

$$\bar{k} = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot p_k \quad (3.65)$$

Sind die Wahrscheinlichkeitsdichte-Funktion $f(x)$ und die Verteilungsfunktion $F(x)$ der Zwischenankunftszeiten des Hauptstroms bekannt, dann kann p_k durch

$$p_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} f(t) dt \quad (3.66)$$

beschrieben werden [Arn05]. Das Zeitintervall von t_k bis t_{k+1} beschreibt dabei die Zeitspanne, in der genau k Nebenstromobjekte den Konfliktbereich durchlaufen können (Abb. 3.11).

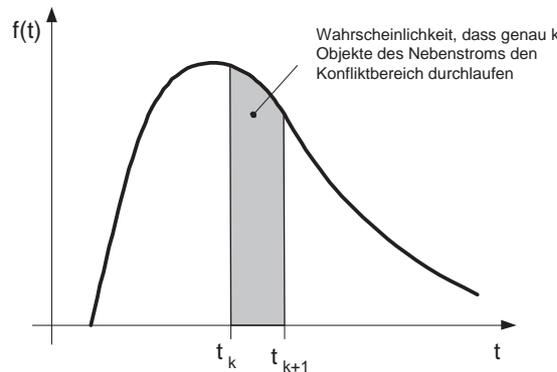


Abbildung 3.11: Dichtefunktion der Zwischenankunftszeit des Hauptstroms

Einsetzen von (3.66) in (3.65) ergibt

$$\bar{k} = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot \int_{t_k}^{t_{k+1}} f(t) dt \quad (3.67)$$

Durch Einsetzen von (3.67) in (3.64) ergibt sich die maximale Stromstärke des Nebenstroms zu

$$\lambda_N \leq \lambda_H \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(k \cdot \int_{t_k}^{t_{k+1}} f(t) \right) dt \quad (3.68)$$

Um die Berechnung der Grenzleistung bei Vorfahrt im konkreten Fall durchführen zu können, müssen zur Bestimmung von t_k die Umschaltzeiten, die Wahrscheinlichkeitsdichte der Zwischenankunftszeiten für den vorfahrtberechtigten Strom sowie die minimalen Durchlaufzeiten der Objekte durch den Konfliktbereich bekannt sein. Das in (3.66) angegebene Integral kann nur für wenige Verteilungsfunktionen geschlossen gelöst werden. Bereits bei der Normalverteilung ist es nur noch möglich, Näherungslösungen anzugeben. Für exponentialverteilte Zwischenankunftszeiten wurden die Integrale bereits gelöst [Gud76, Arn05].

3.5 Leistung von Sortier- und Verteilanlagen

Sortier- und Verteilanlagen werden gemäß Kapitel 2.2.3 in fünf Funktionsbereiche unterteilt. Prinzipiell muss jeder der fünf Funktionsbereiche die geforderte Leistung, d. h. die Durchsatzanforderungen erfüllen. Die Berechnungen beschränken sich in der Literatur allerdings auf die Durchsatzermittlung des Verteilförderers, da dieser den Kern der Verteilanlage darstellt. Die Leistung der anderen Funktionsbereiche lässt sich in der Regel leicht an die Leistung des Verteilförderers anpassen.

Die Durchsatzermittlung von Sortier- und Verteilanlagen wird in der VDI-Richtlinie 3619 mit der Maschinenleistung gleichgesetzt. Wie diese im einzelnen zu ermitteln ist, wird im Rahmen der Richtlinie nicht spezifiziert. Bei der Berechnung des Verteilförderers wird zwischen dem Nenndurchsatz und dem effektiven Durchsatz unterschieden. Der Nenndurchsatz entspricht dabei der fördertechnischen Leistung des Verteilförderers. Der maximale Durchsatz $\lambda_{sort,max}$ ist von der Fördergeschwindigkeit v_K und dem minimalen Abstand der Sortiergüter $s_{sort,min}$ abhängig. Es gilt

$$\lambda_{sort,max} = \frac{v_K}{s_{sort,min}} \quad (3.69)$$

Der Abstand der Sortiergüter ist dabei von mehreren Faktoren abhängig. Der Gutabstand wird in der *Vorbereitung* an die Anforderungen des Sorters angepasst. Dabei lassen sich ein sorterunabhängiger und ein sorterabhängiger Gutabstand unterscheiden. Sind die Abstände unabhängig vom Sorter, wird zwischen einem konstanten Gutabstand und einem konstanten Gutzwischenraum unterschieden (Abb. 3.12).

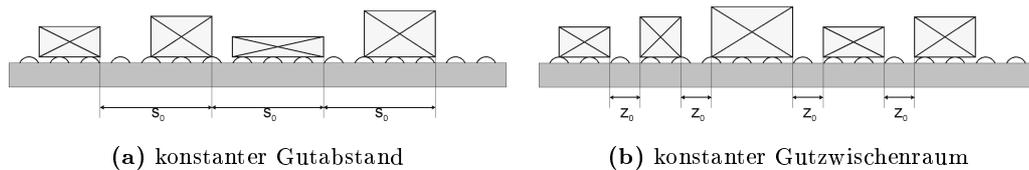


Abbildung 3.12: Abstand von Sortiergütern

Bei konstantem Gutabstand entspricht der Abstand von der Vorderkante des Paketes i bis zur Vorderkante des Paketes $i + 1$ immer der Länge s_o . Es gilt

$$s_{sort,min} = s_o \quad (3.70)$$

Wird ein konstanter Gutzwischenraum gefordert, dann ist der Abstand von der Hinterkante des Gutes i bis zur Vorderkante des Gutes $i + 1$ konstant $= z_o$. Der minimale Abstand des Sortiergutes ergibt sich dann aus dem konstanten Gutabstand und der

mittleren Gutlänge $l_{Gut,m}$.

$$s_{sort,min} = z_o + l_{Gut,m} \quad (3.71)$$

Wird der Abstand der Sortiergüter von der Technologie des Verteilförderers bestimmt, spricht man von sorterabhängigen Gutabständen (Abb. 3.13).

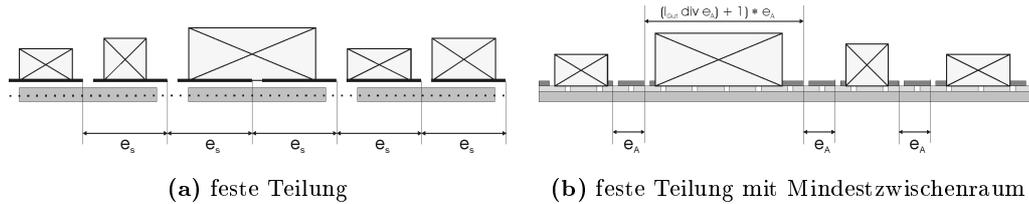


Abbildung 3.13: Abstand von Sortiergütern

Es werden zwei Techniken unterschieden. Bei der *festen Teilung des Fördermittels* mit einem Abstand e_s der Elemente belegt jedes Sortiergut eines dieser Elemente. Das Gut ist dabei in der Regel kürzer als die Teilung des Förderers. Ist das Gut länger als ein Element, wird ihm ein zweites Element zugeordnet. Bei einfacher Belegung ergibt sich der minimale Abstand der Sortiergüter zu

$$s_{sort,min} = e_s \quad (3.72)$$

Werden teilweise mehrere Elemente für ein Gut beansprucht, ergibt sich der mittlere Abstand durch [Jod06]

$$s_{sort,min} = \frac{n_1 \cdot e_s + n_2 \cdot e_s + \frac{n_2}{2} \cdot e_s}{n_1 + n_2} \quad (3.73)$$

Darin ist n_1 die Anzahl der Güter, die ein Element belegen und n_2 die Anzahl der Elemente, die zwei Elemente belegen. Der Term $\frac{n_2}{2} \cdot e_s$ berücksichtigt, dass die Belegung von zwei Elementen nur dann möglich ist, wenn sich diese auf einem Fahrwagen befinden. Besteht ein Fahrwagen aus jeweils zwei Einzelementen, dann kann nicht jedes Element belegt werden. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das nächste Element das zweite Element eines Fahrwagens ist, beträgt 50 %. Daher entsteht bei jedem zweiten Sortiergut, das zwei Elemente beansprucht, ein leeres Element. Werden mehrere Einschleusstationen eingerichtet, können die leeren Elemente ebenfalls befüllt werden und der Faktor kann entsprechend vernachlässigt werden.

Sind die Elemente des Verteilförderers kleiner als das Sortiergut, werden also immer mehrere Elemente der Länge e_A einem Gut zugeordnet (z. B. Schiebeschuhsorter). Man

spricht dann von *fester Teilung des Fördermittels bei technisch bedingtem Mindestabstand*.

Bei dieser Technik müssen, je nach Ausführungsvariante, n_T Elemente zwischen den einzelnen Gütern unbelegt bleiben, um zum Beispiel die Funktion von Lichtschranken oder die Ausschleusung zu gewährleisten. Der mittlere Abstand ergibt sich dann mit der mittleren Gutlänge $l_{Gut,m}$ zu [Jod06]

$$s_{sort,min} = \left[\text{Int} \left(\frac{l_{Gut,m}}{e_A} \right) + 1 \right] \cdot e_A + n_T \cdot e_A \quad (3.74)$$

Der erste Term gibt dabei die Anzahl der im Mittel belegten Elemente aufgrund der mittleren Fördergutlänge an; der zweite Teil der Gleichung berücksichtigt die nicht nutzbaren Elemente n_T zwischen zwei Gütern.

Mit den angegebenen Formeln kann der maximale Durchsatz des Verteilförderers bestimmt werden. Diese maximale Leistung kann oft nur zeitweise erreicht werden. In zweistufigen Kommissioniersystemen wird ein Auftragsbatch gebildet, um eine dynamische Zuordnung der Endstellen zu realisieren. Beim Übergang von einem Batch zum Nächsten entstehen Synchronisationsverluste. Das bedeutet, dass das Sortiersystem beim Übergang von Batch i zu Batch $i + 1$ nicht voll ausgelastet ist. Mit dem Synchronisationsverlustfaktor f_S werden diese Verluste quantifiziert [Rad00]. Definiert man T_{sync} als die Synchronisationszeit und T_{BT} als den Batchtakt (Zeit zwischen dem Start zweier aufeinander folgender Batches), dann kann der Synchronisationsverlustfaktor in der Form

$$f_S = \frac{T_{BT}}{T_{BT} + T_{sync}} \quad (3.75)$$

angegeben werden [Rad00]. Das Problem besteht darin, dass weder die T_{BT} noch T_{sync} bekannt sind. Daher müssen diese Werte geschätzt oder in Simulationsstudien ermittelt werden.

Eine weitere Reduzierung des Durchsatzes wird durch rezirkulierende Güter verursacht, da sie Elemente der Verteilanlage belegen, die nicht für die Einschleusung neuer Sortiergüter genutzt werden können. Rezirkulierende Teile entstehen zum einen durch überfüllte Endstellen, durch No-Reads oder dadurch, dass durch überlappende Batches für einen bestimmten Auftrag noch keine Endstelle freigegeben werden konnte. Das Verhältnis der freien Elemente zur Gesamtanzahl der Elemente des Verteilförderers n_S ergibt den Rezirkulationsverlustfaktor. Wird n_R als Anzahl der im Mittel rezirkulierenden Güter definiert, ergibt sich der Rezirkulationsverlustfaktor zu [Rad00]

$$f_R = \frac{n_S - n_R}{n_S} \quad (3.76)$$

Der effektive Durchsatz eines Verteilförderers ergibt sich dann zu

$$\lambda_{sort,eff} = \lambda_{sort,max} \cdot f_R \cdot f_S \quad (3.77)$$

Damit ist die Darstellung der Berechnungsverfahren der wesentlichen Teilsysteme eines Kommissioniersystems abgeschlossen. Die erzielten Ergebnisse sind in der gegebenen Form aber nicht direkt in einen allgemeinen Berechnungsalgorithmus überführbar, da unterschiedliche Arten der Leistungsangabe vorliegen. So wird bei Lagersystemen die Ein- und/oder Auslagerleistung angegeben, bei Transportknoten der Auslastungsgrad. Um die Wechselwirkungen der Teilsysteme mathematisch zu formulieren, muss eine einheitliche Bezugsgröße ermittelt werden. Die Festlegung einer sinnvollen, einheitlichen Bezugsgröße ist Gegenstand der Entwicklung eines allgemeinen Berechnungsalgorithmus und erfolgt daher in Kapitel 4.

Kapitel 4

Berechnungsverfahren für die Kommissionierung

Gemäß den Ausführungen in Kapitel 3.1 sind bei der Bestimmung der Leistungsfähigkeit eines Kommissioniersystems diverse Parameter zu berücksichtigen, die Einfluss auf dessen Leistungsfähigkeit haben. Mit Hilfe dieser Parameter kann die Leistung der Teilsysteme eines Kommissioniersystems berechnet werden. Die Kommissionierung nach dem Prinzip MzW wird in diesem Zusammenhang auch als ein Teilsystem betrachtet.

Zur Bestimmung der Gesamtleistung eines Kommissioniersystems müssen zudem die Wechselwirkungen der Teilsysteme berücksichtigt werden. Daher wird in Kapitel 4.1 zunächst ein Berechnungsalgorithmus formuliert, der diese Wechselwirkungen formal berücksichtigt. Grundlage sind dabei die Grundtypen der Kommissionierung gemäß Kapitel 2.2.4. Eingangsgrößen des Algorithmus sind die ermittelten Teilsystemleistungen.

Aufgrund der eingeschränkten Gültigkeit der bestehenden Lösungsmethoden für eindimensionale MzW-Systeme wird in Kapitel 4.2 ein neues Berechnungsverfahren für dieses Teilsystem entwickelt, das auf beliebige Auftragsgrößen anwendbar ist und gleichzeitig Weg- und Einlagerstrategien berücksichtigt. In Kapitel 4.3 werden die Leistungsangaben der Teilsysteme aus Kapitel 3.3 bis 3.5 so angepasst, dass sie direkt in den Berechnungsalgorithmus übernommen werden können, sodass eine geschlossene Berechnungssystematik für beliebige Kommissioniersysteme entsteht.

4.1 Berechnungsansatz

In jedem Kommissioniersystem können zwei wesentliche Prozesse identifiziert werden. Zunächst erfolgt die *Zusammenführung* von Kommissionierer (Mensch oder Maschine)

und einem Artikel in der gewählten Bereitstellungsform. Dabei kann sich der Kommissionierer von einem Entnahmeort zum nächsten bewegen (MzW), oder die Ladeeinheit des zu kommissionierenden Artikels wird zum Kommissionierer transportiert. Die benötigte Zeit pro Auftragsposition ist im *Zusammenführungsprozess* durch die Zusammenführungszeit t_Z gegeben.

Der zweite Prozess beinhaltet alle Tätigkeiten, die an einem festen Ort durchgeführt werden. Hierzu zählen die Auftragsübernahme, das Vorbereiten des Sammelbehälters, das Entnehmen (Picken) von Teilmengen eines Artikels von der Ladeeinheit bzw. das Aufteilen (Sortieren) von Teilmengen eines Artikels auf Kundenaufträge sowie die Abgabe des Sammelbehälters. Dieser Prozess wird nachfolgend allgemein als *Bearbeitungsprozess* bezeichnet. Die benötigte Zeit pro Auftragsposition ist durch die Bearbeitungszeit t_B charakterisiert.

Die Leistung eines Kommissioniersystems ist nur von der Zusammenführungszeit t_Z und der Bearbeitungszeit t_B abhängig. Je nach Realisierung des Kommissioniersystems werden der Zusammenführungsprozess und der Bearbeitungsprozess hintereinander, also seriell ausgeführt (MzW), oder die Prozesse laufen gleichzeitig, also parallel ab (WzM).

Bei serieller Bearbeitung setzt sich die Kommissionierzeit t_K einer Auftragsposition aus der Zusammenführungszeit t_Z und der Bearbeitungszeit t_B zusammen. Können die Prozesse gleichzeitig ablaufen, wird die Kommissionierzeit durch das Maximum aus t_Z und t_B bestimmt. Es gilt

$$t_K = \begin{cases} t_Z + t_B & \text{für MzW} \\ \max(t_Z; t_B) & \text{für WzM} \end{cases} \quad (4.1)$$

Die Kommissionierleistung P_K ergibt sich aus dem Kehrwert der Kommissionierzeit für eine Position. Üblicherweise wird die Leistung in Positionen pro Stunde angegeben. Es gilt

$$P_K = \frac{1}{t_K} \left[\frac{Pos}{h} \right] \quad (4.2)$$

Im MzW-System entspricht die Zusammenführungszeit t_Z der Wegzeit t_s , die der Kommissionierer durchschnittlich für die Bearbeitung einer Auftragsposition benötigt. In WzM-Systemen ergibt sich t_Z aus dem Maximum der Zwischenankunftszeit t_{ZAZ-B} des Bereitstellsystems, das in der Regel durch ein Lager repräsentiert wird, und der Zwischenankunftszeit t_{ZAZ-FT} , die durch die verbindende Fördertechnik determiniert ist, da die Auslagerung aus dem Lager und der Transport zeitgleich durchgeführt werden. Für die Zusammenführungszeit t_Z gilt entsprechend

$$t_Z = \begin{cases} t_s & \text{für MzW} \\ \max(t_{ZAZ-B}; t_{ZAZ-FT}) & \text{für WzM} \end{cases} \quad (4.3)$$

Mit Einsetzen von (4.3) in (4.1) ergibt sich die Kommissionierzeit zu

$$t_K = \begin{cases} t_s + t_B & \text{für MzW} \\ \max(t_{ZAZ-B}; t_{ZAZ-FT}; t_B) & \text{für WzM} \end{cases} \quad (4.4)$$

Die berechnete Kommissionierzeit t_K und somit auch die Kommissionierleistung beruht auf einer Mittelwertbetrachtung. Das bedeutet, dass sowohl die Leistung einzelner Gewerke, als auch die Gesamtleistung des Systems temporär höher liegen können als der berechnete Wert. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn in einem konventionellen Kommissioniersystem mehrere Aufträge hintereinander bearbeitet werden, die die mittlere Anzahl Positionen pro Auftrag übersteigen. Nachgelagerte Bereiche werden in diesem Zeitraum höher belastet, als durch die mittlere Leistung vorgegeben wird. Ist das nachgelagerte System nicht für diese Leistungsspitzen ausgelegt, bildet sich eine Warteschlange vor der entsprechenden Funktionseinheit. Diese Warteschlange wird in den Zeiträumen abgebaut, in denen die Leistung der vorgeschalteten Funktionseinheiten unter die mittlere Leistung absinkt. Maßgebend für die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems sind ausreichende Puffer zwischen den Einzelgewerken. Wie groß diese im Einzelnen sein müssen, hängt von der Auftragsstruktur ab. Die Bestimmung der Puffergrößen kann in einfachen Systemen mit den Gesetzen der Warteschlangentheorie ermittelt werden. In komplexeren Systemen empfiehlt sich eine Überprüfung der geplanten Pufferdimensionen mit Hilfe der Simulation. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine statische Leistungsbetrachtung, bei der kein Einfluss von Puffern auf die Leistung vorliegt. Die Puffer werden daher im weiteren nicht betrachtet.

Mit Hilfe des oben beschriebenen Berechnungsansatzes lassen sich auch mehrstufige Kommissioniersysteme berechnen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Berechnung immer mit der Stufe $k = 1$ beginnt, da die Kommissionierzeit der Stufe $k-1$ in die Berechnung der Stufe k einfließt. Das bedeutet, dass die Leistung eines k -stufigen Systems durch die Leistung der k -ten Stufe festgelegt ist. Es gilt

$$t_{K, System} = t_{K, k} \quad (4.5)$$

Abbildung 4.1 zeigt die Funktionsweise des Berechnungsalgorithmus für zweistufige Kommissioniersysteme. In Abbildung 4.1-a wird ein MzW-System in der ersten Kommissionierstufe mit einem WzM-System in der zweiten Stufe kombiniert (z. B. Pick-to-Belt mit Sortieranlage). In 4.1-b ist die erste Kommissionierstufe durch ein WzM-System und die zweite Stufe durch ein MzW-System (z. B. inverses Kommissionieren) realisiert.

Beispiel

Dieser Zusammenhang soll anhand eines zweistufigen Pick-to-Belt-Systems (PtB) gemäß

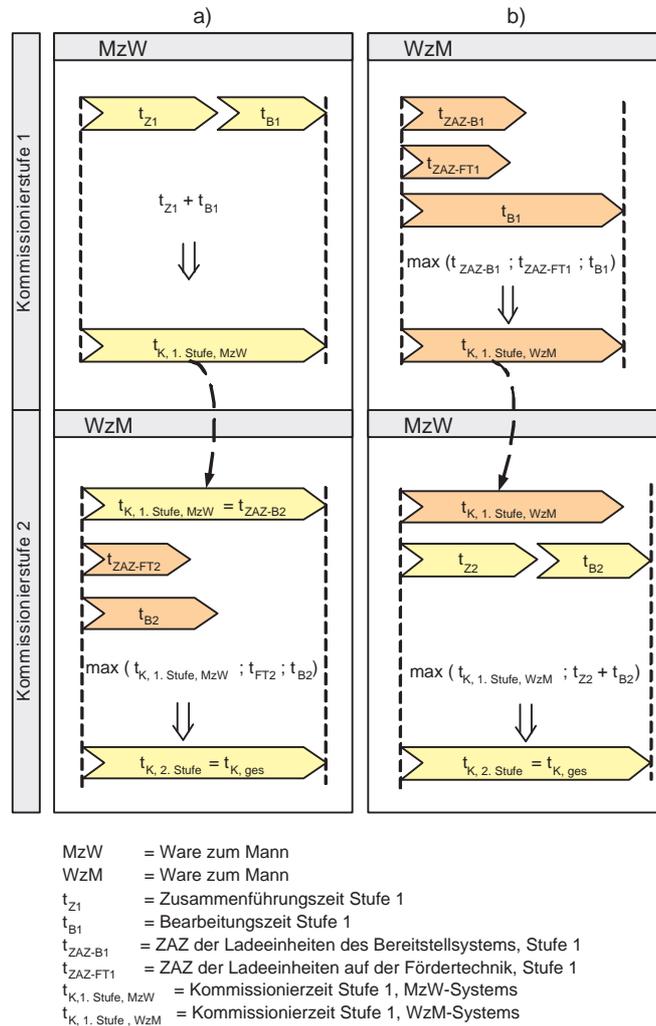


Abbildung 4.1: Anwendung des Berechnungsalgorithmus auf zweistufige Kommissioniersysteme

Abbildung 4.2 näher erläutert werden. Die erste Stufe wird durch den Kommissionierer repräsentiert, der sich von Entnahmeort zu Entnahmeort bewegt, die entsprechenden Entnahmeeinheiten aus dem Lagerfach entnimmt und sie auf dem Förderband ablegt (MzW). Die zweite Stufe beginnt mit dem Transport der Sammelbehälter zum Sortiersystem und endet mit der Zuordnung der Behälter auf die Endstellen des Sorters. Wird die Sortierung als ein Prozess betrachtet, der an einem festen Ort ausgeführt wird, dann entspricht der Sortiervorgang einem Bearbeitungsprozess. Die zweite Kommissionierstufe kann daher durch ein WzM-System charakterisiert werden.

Die Kommissionierzeit der ersten Stufe ergibt sich gemäß (4.4) für ein MzW-System zu

$$t_{K,1} = t_{s,1} + t_{B,1} \quad (4.6)$$

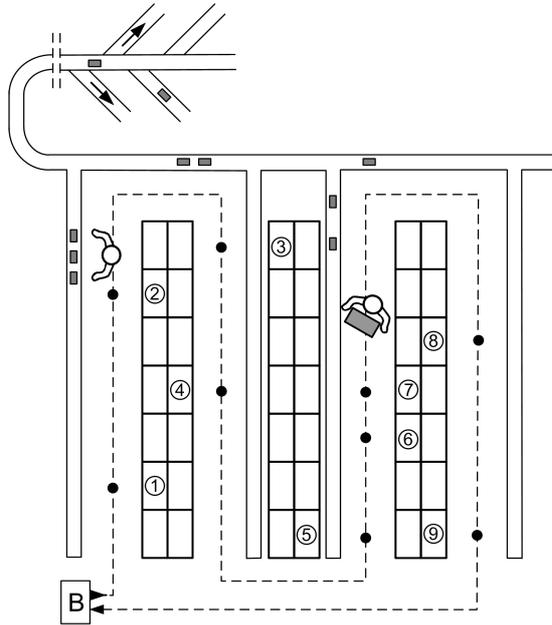


Abbildung 4.2: Beispiel eines zweistufigen Kommissioniersystems mit Pick-to-Belt und anschließender Sortierung

Für die zweite Stufe (WzM) ergibt sich entsprechend

$$t_{K,2} = \max(t_{ZAZ-B,2}; t_{ZAZ-FT,2}; t_{B,2}) \quad (4.7)$$

Gemäß (4.5) ist die Kommissionierzeit des Gesamtsystems $t_{K,system}$ gleich der k -ten, in diesem Fall der zweiten Stufe.

$$t_{K,system} = t_{K,k} = t_{K,2}$$

Die Kommissionierzeit der ersten Stufe $t_{K,1}$ entspricht gerade dem Zeitintervall, in dem die Sammelbehälter auf das Förderband aufgesetzt werden. Bezüglich der zweiten Stufe entspricht das der Zwischenankunftszeit des Bereitstellsystems $t_{ZAZ-B,2}$. Es gilt

$$t_{K,1} = t_{ZAZ-B,2} \quad (4.8)$$

Die Zeit $t_{K,1}$ ist mit (4.6) gegeben. Einsetzen von (4.6) in (4.7) ergibt

$$t_{K,2} = \max(t_{s,1} + t_{B,1}; t_{ZAZ-FT,2}; t_{B,2}) \quad (4.9)$$

Die Bearbeitungszeit $t_{B,2}$ ist durch die Sortierzeit t_{sort} , die für eine Position benötigt wird, gegeben. Damit ergibt sich die Kommissionierleistung des Gesamtsystems zu

$$t_{K,2} = t_{K,system} = \max(t_{s,1} + t_{B,1}; t_{ZAZ-FT,2}; t_{sort,2})$$

Die Kommissionierleistung des zweistufigen Pick-to-Belt-Systems $P_{K,system}$ ergibt sich mit (4.2) zu

$$P_{K,system} = \frac{1}{\max(t_{s,1} + t_{B,1}; t_{ZAZ-FT,2}; t_{sort,2})} \quad (4.10)$$

Das wesentliche Problem der Leistungsermittlung ist nun darauf beschränkt, die Bearbeitungszeiten t_B und die Zusammenführungszeiten t_Z im konkreten Fall zu berechnen.

In den folgenden Kapiteln wird zunächst erläutert, wie die Bearbeitungszeiten ermittelt werden können. Anschließend werden die verschiedenen Fälle zur Berechnung der Zusammenführungszeit dargelegt. Dabei werden die MzW- und die WzM-Systeme getrennt voneinander betrachtet.

Mehrstufige Kommissioniersysteme setzen sich in der Regel aus MzW- und WzM-Systemen zusammen. Zur Berechnung ist es daher nur notwendig, die Schnittstelle der beiden Systeme zu lokalisieren (vgl. Beispiel oben) und in den Berechnungen zu berücksichtigen.

4.2 Ermittlung von Bearbeitungszeiten

Die Bearbeitungszeit beinhaltet alle Prozesse, die der Kommissionierer oder eine Maschine im Stillstand durchführen. Je nach Anwendungssystem sind unterschiedliche Zeitanteile zu berücksichtigen. In manuellen Kommissioniersystemen werden die Kommissionier-Basiszeit, die Kommissionier-Greifzeit und die Kommissionier-Totzeit unterschieden [Für74, Sch96, Gud04]. Es gilt der Zusammenhang

$$t_B = t_{basis} + t_{greif} + t_{tot} \quad (4.11)$$

Die **Kommissionier-Basiszeit** und Übergabezeit ist ein Zeitanteil beim manuellen Kommissionieren. Die anteilige (mittlere) Basiszeit wird ermittelt, indem die an der Basis verbrachte Gesamtzeit durch die Anzahl der n Auftragspositionen dividiert wird. Die Basiszeit umfasst Vorgänge wie z. B.

- Übernahme des Auftrags,
- Sortieren von Belegen,
- Aufnahme von Kommissionierbehältern,
- Abgabe von Ware und Kommissionierbehältern,
- Weitergabe bzw. abschließende Belegbearbeitung.

Es gilt

$$t_{basis} = \frac{t_{basis}(n)}{n} \quad (4.12)$$

Die **Kommissionier-Greifzeit** ist die Zeit von der Entnahme bis zum Ablegen der entsprechenden Artikelmenen an den Bereitstellplätzen beim Kommissionieren je Auftragsposition. Die Greifzeit beinhaltet die Vorgänge Hinlangen, Aufnehmen, Befördern und Ablegen. Im Wesentlichen hängt die Greifzeit ab von

- der Anzahl der Entnahmeeinheiten pro Position,
- der Greifhöhe und Greiftiefe,
- der Ablagehöhe,
- dem Gewicht und Volumen pro Entnahme.

Folgende Tätigkeiten werden für die Ermittlung der Greifzeit nicht einbezogen:

- Öffnen von Verpackungen
- Beschriften
- Etikettieren
- Zurücklegen überzähliger Ware

Die **Kommissionier-Totzeit** ist unproduktive, aber nicht zu vermeidende Zeit beim manuellen Kommissionieren. Die Totzeiten entstehen an den Entnahmeorten durch

- Lesen,
- Suchen und Identifizieren,
- Kontrollieren,
- Reagieren,
- Aufreißen von Verpackungen.

Wesentliche Einflussfaktoren sind

- Personal (Ausbildung, Bildungsstand, Sprache usw.),
- Information (Aufbereitung und Darstellung),

- Ergonomie am Arbeitsplatz.

Werden Sortieranlagen in Kommissioniersystemen eingesetzt, dann kann der Prozess des Sortierens auch als ein stationärer Prozess betrachtet werden. In diesem Fall ergibt sich die Bearbeitungszeit t_B^{sort} direkt aus dem Kehrwert der Sortierleistung. Die Sortierleistung kann dabei entweder berechnet werden (vgl. Kapitel 3.5), oder es werden die vom Hersteller angegebene Leistungsdaten verwendet. Es gilt

$$t_B^{sort} = \frac{1}{P_{sort}} \quad (4.13)$$

Die Bestimmung der mittleren Zeitbedarfe in manuellen Systemen kann auf zwei Wegen erfolgen. Die Vor- und Nachteile sowie das Vorgehen werden im folgenden beschrieben.

4.2.1 Methoden der Zeitermittlung

Für die Zeitermittlung manueller Prozesse wie der Kommissionier-Basiszeit oder der Kommissionier-Greifzeit können zum einen Zeitaufnahmen im Unternehmen durchgeführt werden, oder es werden Systeme vorbestimmter Zeiten (SvZ) zur Zeitermittlung angewendet. Sollen ausschließlich die prozentualen Anteile, aus denen sich ein Gesamtprozess zusammensetzt, ermittelt werden, kann eine Multimomentaufnahme durchgeführt werden. Für die Ermittlung absoluter Werte, wie sie für die Berechnungen der Kommissionierleistung notwendig sind, ist dieses Verfahren allerdings nicht geeignet. Zeitaufnahmen können in bereits existierenden Kommissioniersystemen durchgeführt werden. Diese Methode liefert auf der einen Seite sehr genaue Ergebnisse bezüglich des vorliegenden Systems. Auf der anderen Seite ist dieses Verfahren sehr personalaufwendig und damit kostenintensiv. Ein Einsatz bei einer Neuplanung ist ebenfalls nicht möglich. Es wird daher häufig auf die Systeme vorbestimmter Zeiten zurückgegriffen, um die Zeitanteile für die jeweiligen Prozesse zu ermitteln.

Nach REFA handelt es sich bei den SvZ um Verfahren, mit denen Soll-Zeiten für das Ausführen solcher Vorgangselemente bestimmt werden können, die vom Menschen voll beeinflussbar sind. Es können somit Zeiten für einen vorgegebenen Bewegungsablauf ermittelt werden, die Aussagen über das untersuchte Arbeitssystem liefern [REF97].

Bei der Durchführung der Verfahren werden die Arbeitsabläufe in Bewegungselemente gegliedert. Diesen Bewegungselementen sind Soll-Zeiten zugeordnet, die in ihrer Höhe durch die erfassten Einflussgrößen vorbestimmt sind. Von den verschiedenen Verfahren der SvZ haben sich weltweit zwei Verfahren durchgesetzt [Hei98]: das WF-Verfahren (Work-Factor) und das MTM-Verfahren (Methods-Time Measurement). Diese Verfahren unterscheiden sich weniger in der Bewegungsablaufanalyse, sondern mehr in der Art

der Berücksichtigung der Einflussgrößen. Das heißt, dass bei WF vorwiegend quantitative Einflussgrößen wie Abmaße des Arbeitsplatzes, der Arbeitsgegenstände und der Vorrichtung vorkommen. Bei MTM werden zusätzlich qualitative Einflussgrößen wie Fallunterscheidungen der einzelnen Bewegungselemente berücksichtigt [REF97].

Die Vorteile dieser Systeme liegen bspw. in der Möglichkeit, Zeitdaten schon im Planungsstadium zu bestimmen, wobei bereits komplexe Bewegungsabläufe und deren zeitbestimmende Einflussgrößen analysiert werden können. Maßnahmen zur Umgestaltung des Arbeitsbereichs können quantitativ begründet sowie die Auswirkungen auf Zeit, Kosten usw. nachgewiesen werden. Weiterhin liefern diese Systeme für die Planer eine standardisierte Sprache für die Entwicklung und Gestaltung der Arbeitsplätze, Betriebsmittel, Erzeugnisse und Arbeitsabläufe [Hei98].

Bei MTM handelt es sich um das im deutschsprachigen Raum mit Abstand gebräuchlichere Verfahren, und die Entwicklung von Standarddaten ist bei diesem Verfahren weit vorangeschritten [Hei98]. Das bedeutet, dass aus kleinsten Zeitbausteinen größere Bausteine derart zusammengesetzt sind, dass Zeiten für unterschiedliche Anwendungsfälle auf wirtschaftliche Weise gebildet werden können [REF97]. Aus diesen Gründen beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen auf das MTM-Verfahren.

Von MTM finden zur Zeit vier Verfahren Verwendung:

- MTM-Grundverfahren
- MTM-Standarddaten-Verfahren
- MTM-2-Verfahren
- MTM-3-Verfahren

Diese Verfahren unterscheiden sich in dem Detaillierungsgrad der verwendeten Bewegungselemente und der dazugehörigen Zeitbausteine. Sie sind zum Beispiel nach den vorhandenen Informationen zum Arbeitsablauf in der vorliegenden Planungsstufe auszuwählen.

Es gibt zwei unterschiedliche Methoden, eine SvZ-Analyse durchzuführen. Sie kann aufgrund einer Beobachtung eines Arbeitsablaufs vorgenommen werden, wobei das beobachtete Arbeitssystem analysiert wird (Beobachtungsanalyse). Oder es erfolgt die Beschreibung eines Systems aufgrund der Vorstellung eines Arbeitsablaufs (Planungsanalyse). Das Vorgehen bei der Bestimmung von Soll-Zeiten für manuelle Abläufe mit Hilfe der SvZ vollzieht sich in drei Schritten: Vorbereitung der Analyse, Ablaufanalyse und Zeitanalyse [Hei98].

Bei der Vorbereitung einer Beobachtungsanalyse ist die Auswahl der Arbeitspersonen entscheidend, da sie eine repräsentative Leistung erbringen sollen. Das bedeutet, dass

die Arbeitsperson beispielsweise in die zu analysierende Tätigkeit eingearbeitet sein muss [Hei98].

Die Ablaufanalyse besteht in der Gliederung des Arbeitsablaufs in Bewegungselemente. Dabei muss die Gliederung die Bedingung erfüllen, dass die einzelnen Bewegungselemente eine in sich geschlossene Ausführung darstellen und die verwendeten Begriffe eine sinnvolle Einheit bilden [Hei98]. Bei der Ablaufanalyse wird ein Modell menschlicher Bewegungen verwendet, die beeinflussbar und für die Arbeit relevant sind. Es können Bewegungselemente wie Demontieren, Drücken, Prüfen, Reagieren sowie verschiedene Körperbewegungen unterschieden werden. Die wichtigsten und für das Kommissionieren entscheidenden sind dabei Hinlangen, Bringen, Greifen, Vorrichten, Fügen und Loslassen [REF97].

Die genannten sechs wesentlichen Bewegungselemente lassen sich wie folgt definieren:

- Hinlangen ist die Grundbewegung, um die Finger oder die Hand zu einem bestimmten oder unbestimmten Ort zu bewegen.
- Bringen ist die Grundbewegung, die ausgeführt wird, um einen Gegenstand oder mehrere Gegenstände mit den Fingern oder den Händen zu einem Bestimmungsort zu transportieren.
- Greifen ist die Grundbewegung, die ausgeführt wird, um mit den Fingern oder der Hand eine ausreichende Kontrolle über einen Gegenstand oder mehrere Gegenstände zu erhalten, sodass die nächste Grundbewegung ausgeführt werden kann.
- Vorrichten ist das Drehen eines Arbeitsgegenstandes, um ihn in eine einbaugerechte Lage zu bringen.
- Fügen ist die Grundbewegung, die von den Fingern oder der Hand ausgeführt wird, um einen Gegenstand in einen anderen einzustecken oder an einen anderen anzulegen.
- Loslassen ist die Grundbewegung, die ausgeführt wird, um die mit den Fingern oder der Hand ausgeübte Kontrolle über einen Gegenstand aufzuheben.

Bei allen diesen Bewegungselementen können noch weitere Fälle unterschieden werden. So gibt es z. B. beim Greifen ein einfaches Greifen, ein Greifen gemischt liegender Teile aus einem Haufen und eine Anzahl weiterer Möglichkeiten.

Bei der Zeitanalyse erfolgt eine Zuordnung der entsprechenden Zeitwerte zu den einzelnen Bewegungselementen. Die benötigten Zeiten können aus Bewegungszeitabellen

abgelesen werden, in denen die Zeiten der Vorgangselemente in Abhängigkeit von Einflussgrößen angegeben sind [REF97]. Bei diesen Einflussgrößen handelt es sich beispielsweise um die zurückzulegende Wegstrecke, den aufzuwendenden Kraftaufwand, das Gewicht des zu bewegenden Gegenstandes oder den benötigten Kontrollaufwand bei der Bewegung.

Falls bei der Zeitanalyse Zeitabschnitte vorkommen, die sich nicht analysieren lassen, z. B. unbeeinflussbare Zeiten, müssen die erforderlichen Zeiten mit anderen Verfahren wie Zeitaufnahme oder Berechnung der Prozesszeit ermittelt werden. Die konkrete Ermittlung der Zeiten wird beim MTM-Verfahren in der Zeiteinheit TMU (Time Measurement Unit) vorgenommen. Dabei entspricht 1 TMU 0,036 s [REF97]. Im Folgenden wird ein Beispiel zur Berechnung der Greifzeit beim Kommissionieren mit dem MTM-Verfahren vorgestellt. In diesem Fall muss i. d. R. die Reihe der Bewegungselemente „Hinlangen – Greifen – Bringen – Loslassen“ durchgeführt werden. Für die Bewegung des Hinlangens wird aus den verschiedenen Auswahlmöglichkeiten beispielhaft der Fall *Hinlangen zu einem alleinstehenden Gegenstand, der sich an einem von Arbeitsgang zu Arbeitsgang veränderten Ort befindet* ausgewählt. Für die Bewegungslänge werden 50 cm veranschlagt. Aus der MTM-Normzeittabelle können für diesen Fall als Normzeitwert 18,4 TMU abgelesen werden. Beim Greifen wird die Möglichkeit, *Greifen eines ungefähr zylindrischen Gegenstandes, dessen Durchmesser größer als 12 mm ist, wobei dies durch Hindernisse von einer Seite oder von unten erschwert wird*, ausgewählt. Hierfür liefert die Normzeittabelle den Wert 7,3 TMU. Das Bringen des kommissionierten Gegenstandes beschreibt in diesem Beispiel der Fall *einen Gegenstand zur anderen Hand oder gegen einen Anschlag bringen*. Aufgrund der Annahme, dass der zu kommissionierende Gegenstand nicht mehr als ein Kilogramm wiegt, beträgt das Gewicht nicht mehr als 10 N, und somit muss kein zusätzlicher Faktor für das Gewicht berücksichtigt werden. Für eine Weglänge von 50 cm ergeben sich für diesen Fall 19,0 TMU. Das Loslassen erfolgt durch das Öffnen der Finger, wobei laut Normzeittabelle 2,0 TMU veranschlagt werden müssen. Insgesamt ergeben sich für die Greifzeit beim Kommissionieren

$$(18,4 + 7,3 + 19,0 + 2,0) \text{ TMU} = 46,7 \text{ TMU} = 1,68 \text{ s} \quad (4.14)$$

Für die Bestimmung der Greifzeit beim Kommissionieren besteht nicht unbedingt die Notwendigkeit eine MTM-Analyse durchzuführen. Es ist ebenfalls möglich Messungen der Greifzeit pro Entnahme in Abhängigkeit von Einflussfaktoren vorzunehmen. Nach Gudehus [Gud73] handelt es sich dabei um die Greifhöhe, Greiftiefe, Ablagehöhe, Ablagetiefe, Gewicht pro Entnahme, Volumen pro Entnahme und Entnahmen pro Position. Liegen die Bearbeitungszeiten des Kommissionierers vor, muss noch die Zusammenführungszeit ermittelt werden, die den Weg des Kommissionierers zu den Artikeln (MzW) bzw. den Weg der Artikel zum Kommissionierer (WzM) beschreibt.

4.3 Ermittlung der Zusammenführungszeit

Die Berechnungen der Zusammenführungszeit in MzW- und WzM-Systemen sind zwei grundsätzlich verschiedene Probleme. Daher werden sie nachfolgend getrennt voneinander betrachtet.

4.3.1 Mann-zur-Ware

Die Zusammenführungszeit in MzW-Systemen stellt den Zeitanteil dar, den ein Kommissionierer im Mittel benötigt, um sich von einem Entnahmeort zum nächsten zu bewegen. Die dafür benötigte Zeit ist von der Länge der Wegstrecke s_n , der Geschwindigkeit v und der Beschleunigung a des Kommissionierers abhängig. Bei der Berechnung des Zeitbedarfs werden zwei Geschwindigkeit-Zeit-Profile unterschieden (Abb. 4.3). Bei der *Standardfahrrampe* beschleunigt der Kommissionierer bis auf die maximale Geschwindigkeit v_{max} und behält diese so lange bei, bis der Bremsvorgang eingeleitet wird. Bei der *spitzen Rampe* wird die maximale Geschwindigkeit nicht erreicht. Der Bremsvorgang muss vorher eingeleitet werden, um am Zielort in den Stillstand zu gelangen. Es

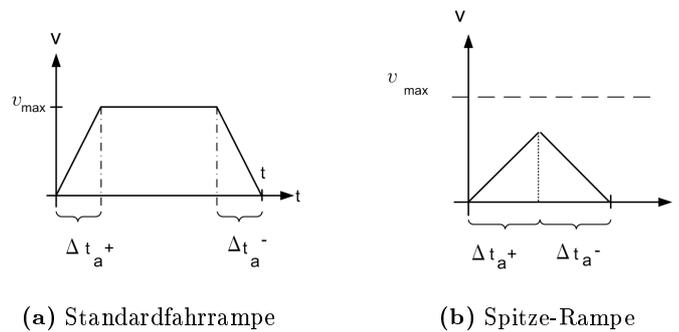


Abbildung 4.3: Fahrrampen

werden der Beschleunigungszeitanteil t_a und der Zeitanteil, in dem sich der Kommissionierer mit konstanter Geschwindigkeit t_c bewegt, unterschieden. Die Berechnung der Wegzeiten für die beiden Fahrrampen ergibt sich gemäß (4.15) zu

$$t = \begin{cases} \underbrace{\frac{s}{v}}_{t_c} + \underbrace{\frac{v}{a}}_{t_a} & \text{für } s \geq \frac{v^2}{a} \\ \underbrace{2 \cdot \sqrt{\frac{s}{a}}}_{t_a} & \text{für } s < \frac{v^2}{a} \end{cases} \quad (4.15)$$

Muss innerhalb einer vorgegebenen Strecke s_n insgesamt n_a Mal beschleunigt und gebremst werden, um n Positionen zu picken, setzt sich die Gesamtfahrzeit t_n aus der

Zeit, die man zum Durchfahren der Wegstrecke mit maximaler Geschwindigkeit benötigt, und dem n_a -fachen des Beschleunigungszeitanteils t_a zusammen. Sind die Abstände zwischen den einzelnen Entnahmeorten so klein, dass die maximale Geschwindigkeit nicht erreicht wird, berücksichtigt man nur den Beschleunigungszeitanteil. Die Fahrzeit ergibt sich dann zu

$$t_n = \begin{cases} \underbrace{\frac{s_n}{v}}_{t_c} + \underbrace{n_a \cdot \frac{v}{a}}_{t_a} & \text{für } \frac{s_n}{n} \geq \frac{v^2}{a} \\ \underbrace{n_a \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{s_n}{n \cdot a}}}_{t_a} & \text{für } \frac{s_n}{n} < \frac{v^2}{a} \end{cases} \quad (4.16)$$

Die Fahrzeit, die für eine Position zu veranschlagen ist, ergibt sich aus dem Quotienten der Gesamtzeit und der Anzahl der dabei bearbeiteten Positionen n . Es gilt

$$t_s = \frac{t_n}{n} \quad (4.17)$$

Werden Fahrzeuge oder andere technische Hilfsmittel eingesetzt, die Einfluss auf die Bewegungsgrößen des Kommissionierers haben, müssen diese entsprechend berücksichtigt werden.

Die Wegstrecke s ist von einer Vielzahl an Parametern abhängig. Um eine analytische Lösung mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Kombinatorik zu formulieren, werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Das Kommissionierlager ist ein konventionelles Fachbodenregal mit einer oder mehreren gleich langen Gassen.
- Alle Lagerplätze sind gleich groß (z. B. Palettenplatz).
- Alle Lagerplätze sind artikelrein.
- Die Anzahl der Lagerplätze pro Artikel ist gleich.
- Die Anfahrhäufigkeiten der Gassen sind gleich groß.
- Die Verteilungsfunktion der Zugriffshäufigkeiten der Artikel ist bekannt.
- Die Verteilungsfunktion der Zugriffshäufigkeiten ist in allen Gassen gleich.
- Die Art der Lagerplatzvergabe innerhalb einer Gasse ist bekannt.

Die Wegstrecke s_{pos} beschreibt die Länge des Weges, der pro Position eines durchschnittlichen Kommissionierauftrags zurückzulegen ist. Um ihn zu ermitteln, wird zunächst die

Wegstrecke s_n bestimmt, die bei der Bearbeitung eines Kommissionierauftrags durchschnittlich zurückgelegt werden muss. Die Division von s_n und der Anzahl Positionen pro Kommissionierauftrag n ergibt die Wegstrecke pro Position. Es gilt

$$s_{pos} = \frac{s_n}{n} \quad (4.18)$$

Die Berechnung der Wegstrecke hängt maßgeblich von der Organisation eines Kommissioniersystems ab. Besteht ein System aus mehreren Gassen, kann entweder in jeder Gasse ein Kommissionierer tätig sein (gassengebunden) oder es gibt mehrere Kommissionierer, die das System entsprechend ihren Kommissionieraufträgen durchlaufen (gassenungebunden).

Gassengebunden

Zur Berechnung des Gassenweges wird zunächst unterschieden, ob eine ein- oder zweidimensionale Bewegung des Kommissionierers innerhalb der Gasse vorliegt. Bei der eindimensionalen Bewegung bewegt sich der Kommissionierer nur in einer Ebene. Das heißt, er führt keine vertikalen Bewegungen zur Erreichung einzelner Lagerplätze aus (Abb. 4.4).

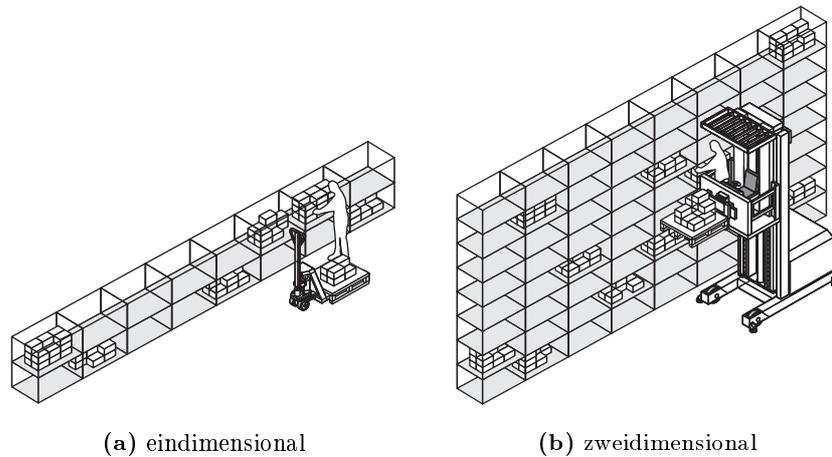
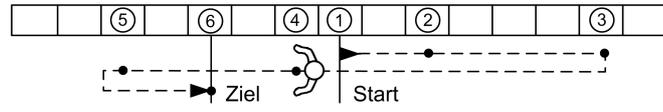


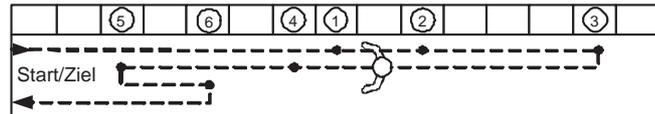
Abbildung 4.4: Ein- und zweidimensionale Bewegung eines Kommissionierers innerhalb einer Gasse

Eindimensional, gassengebunden, ungeordnet

Bei eindimensionaler Bewegung hängt der Gassenweg im Wesentlichen davon ab, in welcher Reihenfolge die Kommissionieraufträge auf der Kommissionierliste vorliegen. Sind die Auftragspositionen nicht nach den Entnahmeorten sortiert, muss der Kommissionierer innerhalb der Gasse zufällig von einem Lagerplatz zu einem anderen laufen. Abbildung 4.5 zeigt sechs Entnahmeorte, die der Kommissionierer in der Reihenfolge von 1 bis 6 bearbeiten muss. Startet der Kommissionierer an einem beliebigen Punkt der Gasse, ist die mittlere Wegstrecke, die er zwischen zwei Entnahmen zurücklegt,



(a) Start und Ziel verschieden



(b) Start und Ziel identisch

Abbildung 4.5: Sortierte Reihenfolge der Auftragspositionen bei der Kommissionierung in einer Gasse

gleich dem Erwartungswert für den Abstand zweier beliebiger Entnahmeorte $|x_i - x_j|$. Definiert man die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Weges s_{ij} mit p_{ij} , gilt für die mittlere Wegstrecke s_n

$$s_n = E(s_{ij}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m s_{ij} \cdot p_{ij} \quad (4.19)$$

$$= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m |x_i - x_j| \cdot p_{ij} \quad (4.20)$$

Ist die Zugriffshäufigkeit auf alle Lagerplätze der Gasse ungefähr gleich groß (Abb. 4.7), so ist die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen des Ereignisses „Fahrt von Lagerplatz i zu Lagerplatz j “ immer gleich. Wird k als die Summe aller möglichen Kombinationen von zwei Lagerplätzen einer Gasse definiert, gilt für p_{ij}

$$p_{ij} = \frac{1}{k} \quad (4.21)$$

Die Anzahl der kombinatorischen Möglichkeiten k für $z = 2$ Lagerfächer aus einer Menge von m Lagerfächern entspricht dem zweimaligen Ziehen aus einer Urne mit m unterschiedlichen Elementen ohne Zurücklegen mit Berücksichtigung der Reihenfolge. Allgemein lässt sich k durch die Formel

$$k = \frac{m!}{(m-z)!} \quad (4.22)$$

ermitteln [Ble00]. Die Anzahl der kombinatorischen Möglichkeiten für $z = 2$ Lagerfächer in einer Gasse mit m Lagerfächern ergibt sich damit zu

$$k = \frac{m!}{(m-2)!} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (m-2) \cdot (m-1) \cdot m}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (m-2)} = (m-1) \cdot m \quad (4.23)$$

Durch Einsetzen von (4.23) in (4.21) ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für eine beliebige Strecke zu

$$p_{ij} = \frac{1}{m \cdot (m-1)} \quad (4.24)$$

Der Erwartungswert $E(s_{ij})$ ergibt sich mit (4.24) und (4.20) allgemein zu

$$E(s_{ij}) = \frac{1}{m \cdot (m-1)} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m |x_i - x_j| \quad (4.25)$$

Mit $m \rightarrow \infty$ lässt sich die Doppelsumme durch ein Doppelintegral ersetzen und $m \cdot (m-1)$ wird zu L^2 . Es gilt [Arn05]:

$$E(s_{ij}) = \frac{1}{L^2} \cdot \int_0^L \int_0^L |x_i - x_j| dx dx' = \frac{1}{3} \cdot L \quad (4.26)$$

Das heißt, der Kommissionierer muss für jede der n zu kommissionierenden Positionen eine Wegstrecke von $\frac{1}{3}L$ zurücklegen. Für die Wegstrecke s_n gilt entsprechend

$$s_n = n \cdot \frac{1}{3} \cdot L \quad (4.27)$$

Wird die Standardfahrrampe vorausgesetzt, ergibt sich die Wegzeit t_n mit (4.16) zu

$$t_n = \frac{1}{3} \cdot \frac{n \cdot L}{v} + n_a \cdot \frac{v}{a} \quad (4.28)$$

Startet und endet die Kommissionierung nicht an einer Basis, entspricht n_a gerade der Anzahl der zu kommissionierenden Positionen n . Ist die Anfahrt der Basis zu Beginn bzw. am Ende eines Auftrags erforderlich, erhöht sich die Anzahl der Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge um 1. Es gelten die Zusammenhänge

$$n_a = n \quad \longrightarrow \quad \text{Kommissionieren ohne Basis} \quad (4.29)$$

$$n_a = n + 1 \quad \longrightarrow \quad \text{Kommissionieren mit Basis} \quad (4.30)$$

Für den Fall, dass eine Basis vorliegt (Abb. 4.5), setzt sich die Wegstrecke aus der Fahrt von der Basis zum ersten Lagerort, den Fahrten zwischen den Lagerorten und der Rückfahrt zur Basis zusammen. Die Wegstrecke von $\frac{1}{3}L$ wird dann nur noch $n-1$ Mal zurückgelegt. Für die Wegstrecken von der Basis bis zum ersten Entnahmeort und vom letzten Entnahmeort bis zur Basis ist bei einer gleichverteilten Zugriffshäufigkeit auf die Lagerfächer jeweils eine Länge von $\frac{1}{2}L$ zu veranschlagen. (Das Anfahren eines beliebigen Punktes in der Gasse entspricht dem Fall, dass genau eine Position in einer Gasse gepickt wird. Der dabei zurückzulegende Weg kann bei gleichverteilten Zugriffshäufigkeiten auf

die Lagerfächer durch Einsetzen von $n = 1$ in (4.49) ermittelt werden.) Die Wegstrecke s_n , die bei n Positionen pro Auftrag zurückgelegt wird, ergibt sich dann zu

$$\begin{aligned} s_n &= \frac{1}{2} \cdot L + (n-1) \cdot \frac{1}{3} \cdot L + \frac{1}{2} \cdot L \\ &= L + (n-1) \cdot \frac{1}{3} \cdot L \end{aligned} \quad (4.31)$$

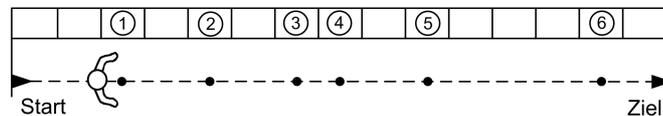
Für den Fall der Standardfahrrampe ergibt sich durch Einsetzen von (4.31) in (4.16) und mit (4.30) die Gesamtfahrzeit zu

$$t_n = \frac{L}{v} + (n-1) \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{L}{v} + (n+1) \cdot \frac{v}{a} \quad (4.32)$$

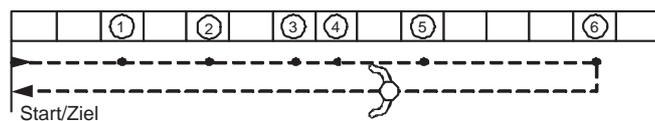
Die Zusammenführungszeit $t_Z = t_s$ (vgl. 4.3) ergibt sich durch Division von t_n mit n gemäß (4.17).

Eindimensional, gassengebunden, geordnet

Sind die Auftragspositionen nach ihrer Entfernung vom Gassenanfang sortiert, kann der Kommissionierer durch einmaliges Ablaufen der Gasse alle Positionen des Auftrags kommissionieren. Je nach Realisierungsfall ist das Ziel des Kommissionierers das Ende der Gasse (Abb. 4.6-a) oder es ist gleich dem Startpunkt (Abb. 4.6-b). Liegt der Zielort



(a) Start und Ziel verschieden



(b) Start und Ziel identisch

Abbildung 4.6: Sortierte Reihenfolge der Auftragspositionen bei der Kommissionierung in einer Gasse

am Ende der Gasse, dann ergibt sich die Wegstrecke s_n , die beim Kommissionieren der n Positionen zurückgelegt wird, durch die Länge der Gasse.

$$s_n = L \quad (4.33)$$

Die Wegzeit t_n ergibt sich unter der Annahme einer Standardfahrrampe durch Einsetzen von (4.33) und (4.30) in (4.16) zu

$$t_n = \frac{L}{v} + (n+1) \cdot \frac{v}{a} \quad (4.34)$$

Die Wegzeit pro Position ergibt sich mit (4.17) zu

$$\begin{aligned}
 t_s &= \frac{\frac{L}{v} + (n+1) \cdot \frac{v}{a}}{n} \\
 &= \frac{L}{n \cdot v} + \frac{n+1}{n} \cdot \frac{v}{a} \\
 &= \frac{L}{n \cdot v} + \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot \frac{v}{a}
 \end{aligned} \tag{4.35}$$

Für den Fall, dass der Zielort identisch mit dem Startpunkt ist, muss der Kommissionierer bis zu dem Lagerfach der letzten Auftragsposition in die Gasse hineingehen und dann wieder bis zur Basis zurücklaufen. Diese Strategie wird als Stichgangstrategie ohne Wiederholung bezeichnet. Zur Ermittlung der mittleren Wegstrecke muss die Zugriffshäufigkeit auf die einzelnen Lagerfächer berücksichtigt werden.

Wird die Zugriffshäufigkeit eines Artikels nicht bei der Vergabe des Lagerplatzes berücksichtigt, kann in der Regel eine Gleichverteilung für die Zugriffshäufigkeit auf die Lagerplätze angenommen werden. Abbildung 4.7 zeigt die mittleren Zugriffshäufigkeiten über die Lagerplätze. Näherungsweise kann die empirische Verteilung durch eine

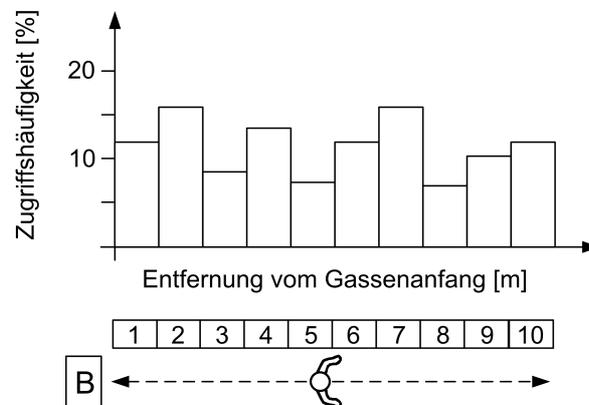


Abbildung 4.7: Empirische Häufigkeitsverteilung über die Entfernung vom Gassenanfang (Lagerplätze); Einlagerung ohne Berücksichtigung der Zugriffshäufigkeit

Gleichverteilung gemäß Abbildung 4.8 modelliert werden. In der Praxis werden häufig auch Einlagerstrategien eingesetzt, die die Zugriffshäufigkeit auf einen Artikel berücksichtigen, um so die Wegzeitanteile des Kommissionierers zu reduzieren. Die gewählten Strategien führen dazu, dass empirische Verteilungen beobachtet werden, die in der Regel durch eine Exponentialverteilung angenähert werden können. Abbildung 4.9 zeigt eine typische Häufigkeitsverteilung, wenn die Zugriffshäufigkeit bei der Einlagerung berücksichtigt wird. Diese Häufigkeitsverteilung kann näherungsweise durch eine Expo-

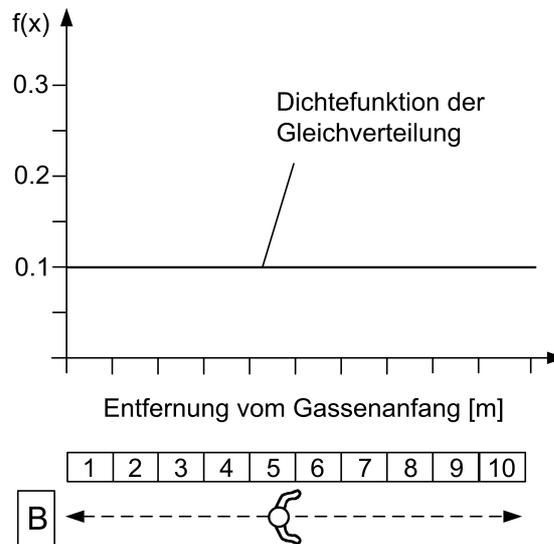


Abbildung 4.8: Gleichverteilte Zugriffshäufigkeit über die Entfernung vom Gassenanfang

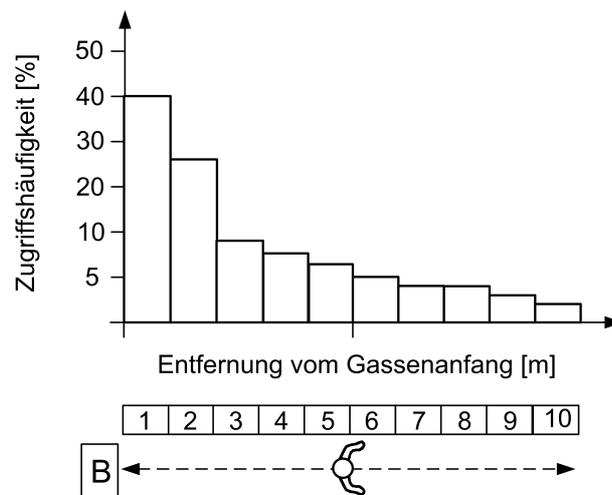


Abbildung 4.9: Empirische Häufigkeitsverteilung über die Entfernung vom Gassenanfang (Lagerplätze); Einlagerung mit Berücksichtigung der Zugriffshäufigkeit

nentialverteilung abgebildet werden (Abb. 4.10). Je nach Artikel- und Auftragsstruktur kann sich auch die Pareto- oder die Weibullverteilung als geeignete Abbildungsfunktion erweisen. Dies ist im Einzelfall zu prüfen.

Die mittlere Wegstrecke, die innerhalb einer Gasse bei der Bearbeitung von n Positionen zurückgelegt werden muss, ist bei Stichgangstrategie ohne Wiederholung nur vom Lagerplatz mit der maximalen Entfernung vom Gassenanfang abhängig.

Ist die theoretische Dichtefunktion $f(x)$ der Zugriffshäufigkeit über die Gasse bekannt,

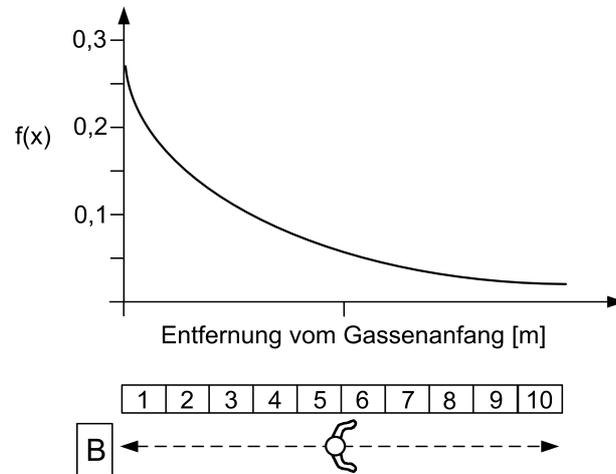


Abbildung 4.10: Exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit über die Entfernung vom Gassenanfang

kann die Zufallsvariable $X_{(n)}$ als die maximale Entfernung vom Gassenanfang definiert werden, die beim Picken von n Positionen zurückgelegt werden muss. Die Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen $F_{X_{(n)}}(x)$ ergibt sich nach den Gesetzen der Ordnungsstatistik durch [Gen04, Mod73]:

$$F_{X_{(n)}}(x) = [F(x)]^n \quad (4.36)$$

Die Dichtefunktion $f_{X_{(n)}}(x)$ erhält man durch die Ableitung der Verteilungsfunktion:

$$f_{X_{(n)}}(x) = n \cdot [F(x)]^{n-1} \cdot f(x) \quad (4.37)$$

Die mittlere Wegstrecke, die ein Kommissionierer in einen Gang hineingeht, wenn er n Positionen in einer Gasse nach der Stichgangstrategie ohne Wiederholung pickt, entspricht dem Erwartungswert von $X_{(n)}$. Da der Kommissionierer nach dem letzten Pick wieder an den Anfang der Gasse zurücklaufen muss, entspricht die gesamte Wegstrecke gerade zwei Mal dem Erwartungswert. Es gilt

$$s_n = 2 \cdot E(X_{(n)}) \quad (4.38)$$

Mit der allgemeinen Definition für den Erwartungswert und (4.37) ergibt sich der Erwartungswert des Maximums von n Picks zu

$$\begin{aligned} E(X_{(n)}) &= \int_0^{\infty} x \cdot f_{X_{(n)}}(x) dx \\ &= \int_0^{\infty} x \cdot n \cdot f(x) \cdot [F(x)]^{n-1} dx \end{aligned}$$

Alternativ kann der Erwartungswert auch mit dem Ausdruck

$$\begin{aligned} E(X_{(n)}) &= \int_0^{\infty} [1 - F_{X_{(n)}}(x) - F_{X_{(n)}}(-x)] dx \\ &= \int_0^{\infty} [1 - [F(x)]^n - \underbrace{[F(-x)]^n}_{=0}] dx \\ &= \int_0^{\infty} 1 - [F(x)]^n dx \end{aligned}$$

berechnet werden. Damit ergibt sich die mittlere Wegstrecke s_n beim Kommissionieren nach der Stichgangstrategie ohne Wiederholung durch den Ausdruck

$$s_n = 2 \cdot \int_0^{\infty} x \cdot n \cdot f(x) \cdot [F(x)]^{n-1} dx \quad (4.39)$$

bzw.

$$s_n = 2 \cdot \int_0^{\infty} 1 - [F(x)]^n dx \quad (4.40)$$

Da alle Picks auf dem Weg in den Gang hinein durchgeführt werden, wird die Berechnung der Kommissionierzeit t_n in zwei Schritte unterteilt. Im ersten Schritt wird die Wegzeit für den Weg in die Gasse $s_n/2$ berechnet. Im zweiten Schritt wird die Wegzeit für den Rückweg berechnet. Mit (4.16) und $n_a = n$ gilt

$$t_n^{hin} = \begin{cases} \frac{s_n}{2 \cdot v} + n \cdot \frac{v}{a} & \text{für } \frac{s_n}{2 \cdot n} \geq \frac{v^2}{a} \\ n \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{s_n}{n \cdot 2 \cdot a}} & \text{für } \frac{s_n}{2 \cdot n} < \frac{v^2}{a} \end{cases} \quad (4.41)$$

Da beim Rückweg nicht angehalten wird, ergibt sich die Fahrzeit für den Rückweg durch einsetzen von $s_n/2$ in (4.15) zu

$$t_n^{rueck} = \begin{cases} \frac{s_n}{2 \cdot v} + \frac{v}{a} & \text{für } \frac{s_n}{2} \geq \frac{v^2}{a} \\ 2 \cdot \sqrt{\frac{s_n}{2 \cdot a}} & \text{für } \frac{s_n}{2} < \frac{v^2}{a} \end{cases} \quad (4.42)$$

Die Gesamtfahrzeit für n Positionen ergibt sich dann zu

$$t_n = t_n^{hin} + t_n^{rueck} \quad (4.43)$$

Die Fahrzeit pro Position ergibt sich mit (4.17) zu

$$t_s = \frac{t_n^{hin} + t_n^{rueck}}{n} \quad (4.44)$$

Um die Berechnungen im realen Fall durchführen zu können, muss die Verteilungsfunktion $F(x)$ bzw. die Dichtefunktion $f(x)$ bekannt sein. In vielen Fällen kann diese durch eine **Gleichverteilung** approximiert werden. Für die Dichte- und die Verteilungsfunktion der Gleichverteilung gilt

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & , \text{ für } a \leq x \leq b \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (4.45)$$

$$F(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & , \text{ für } a \leq x \leq b \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (4.46)$$

$$E(X) = \frac{a+b}{2} \quad (4.47)$$

Damit ergibt sich die mittlere Wegstrecke durch einsetzen von (4.45) und (4.46) in (4.39) zu

$$s_n = 2 \cdot \int_a^b x \cdot n \cdot \frac{1}{b-a} \cdot \left[\frac{x-a}{b-a} \right]^{n-1} dx \quad x \geq 0 \quad (4.48)$$

Liegt die Verteilungsfunktion in der Standardnormalform vor, gilt für die Parameter $a = 0$ und $b = 1$. Damit gilt für s_n

$$\begin{aligned} s_n &= 2 \cdot L \cdot \int_0^1 x \cdot n \cdot 1 \cdot (x)^{n-1} dx \quad 0 \geq x \leq 1 \\ &= 2 \cdot n \cdot L \cdot \int_0^1 x \cdot x^{n-1} dx \quad 0 \geq x \leq 1 \\ &= 2 \cdot n \cdot L \cdot \int_0^1 x^n dx \quad 0 \geq x \leq 1 \\ &= 2 \cdot L \cdot \frac{n}{n+1} \cdot [x^{n+1}]_0^1 \quad 0 \geq x \leq 1 \\ &= 2 \cdot L \cdot \frac{n}{n+1} \end{aligned} \quad (4.49)$$

Lässt sich die Zugriffshäufigkeit auf die Lagerfächer durch eine normierte Exponentialverteilung der Form

$$f(x) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x} & , \text{ für } x \geq 0 \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (4.50)$$

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda \cdot x} & , \text{ für } x \geq 0 \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (4.51)$$

$$E(X) = \frac{1}{\lambda} \quad (4.52)$$

darstellen, dann ergibt sich die mittlere Wegstrecke durch Einsetzen von (4.51) in (4.40) zu

$$\begin{aligned} s_n &= 2 \cdot L \cdot \int_0^\infty [1 - [F(x)]^n] dx \\ &= 2 \cdot L \cdot \int_0^\infty 1 - (1 - e^{-\lambda \cdot x})^n dx \\ &= 2 \cdot L \cdot \lim_{z \rightarrow \infty} \int_0^z 1 - (1 - e^{-\lambda \cdot x})^n dx \\ &= 2 \cdot L \cdot \lim_{z \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} (1 - e^{-\lambda \cdot z})^k \right] \\ &= 2 \cdot L \cdot \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \end{aligned} \quad (4.53)$$

Gassenungebunden

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde die Wegstrecke für den Fall berechnet, dass n Positionen in einer Gasse kommissioniert werden müssen. Sind alle Artikel gleichmäßig auf mehrere Gassen verteilt, ergibt sich eine Vielzahl kombinatorischer Möglichkeiten für die Aufteilung der n Positionen auf die einzelnen Gassen. Um alle Positionen eines Auftrags zusammenzustellen, muss sich der Kommissionierer zunächst von der Basis, an der er den Kommissionierauftrag entgegennimmt, zum Hauptgang des Lagersystems bewegen, in dem er die Entnahmen durchführt. Nach Bearbeitung aller Positionen des Auftrags verlässt er das Lagersystem, um den fertig kommissionierten Auftrag zu übergeben. Die gesamte Wegstrecke außerhalb des Lagersystems wird als Basisweg s_B definiert. Liegt die Basis innerhalb des Lagersystems, dann ist der Basisweg 0.

Innerhalb des Lagersystems bewegt sich der Kommissionierer zunächst zu der Gasse, in der die erste Position seines Auftrags liegt. Nachdem der Kommissionierer alle Positionen in dieser Gasse gepickt hat, wechselt er zur nächsten Gasse, in der weitere Positionen des Auftrags vorliegen. Dies wird so oft wiederholt, bis alle Positionen des Auftrags bearbeitet sind. Abschließend kehrt er zur Basis zurück, um den kompletten Auftrag zu übergeben bzw. um einen neuen Auftrag entgegenzunehmen. Die Summe der Wegstrecken innerhalb der Gassen wird als Gassenweg s_{GW} bezeichnet. Die Summe der Wegstrecken, die beim Wechsel zwischen den Gassen notwendig sind, wird als Gassenwechselweg s_{GWW} definiert. Die Wegstrecke vom Eintritt in das Lagersystem bis zur

ersten Gasse und von der letzten Gasse bis zum Ende des Lagersystems wird ebenfalls dem Gassenwechselweg zugeordnet (Abb. 4.11).

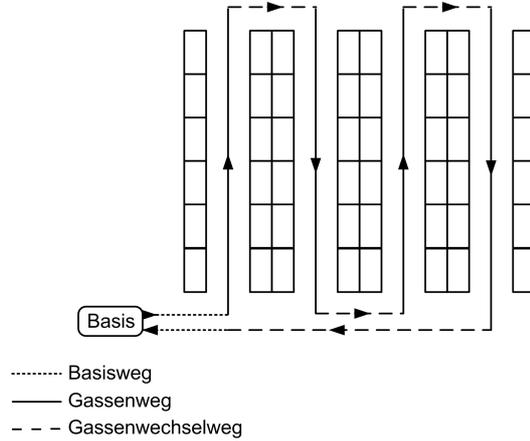


Abbildung 4.11: Basisweg, Gassenwechselweg und Gassenweg in einem konventionellen Kommissioniersystem nach dem Prinzip Mann-zur-Ware

Die gesamte Wegstrecke s_n , die beim Kommissionieren von n Positionen zurückgelegt wird, ergibt sich entsprechend in der Form

$$s_n = s_B + s_{GW} + s_{GWW} \tag{4.54}$$

Zur Berechnung der einzelnen Größen müssen Angaben bezüglich der Abmaße des zu berechnenden Kommissioniersystems vorliegen. Abbildung 4.12 definiert die im Folgenden verwendeten Größen und Bezeichnungen im Kopfgang- und Zentralganglayout.

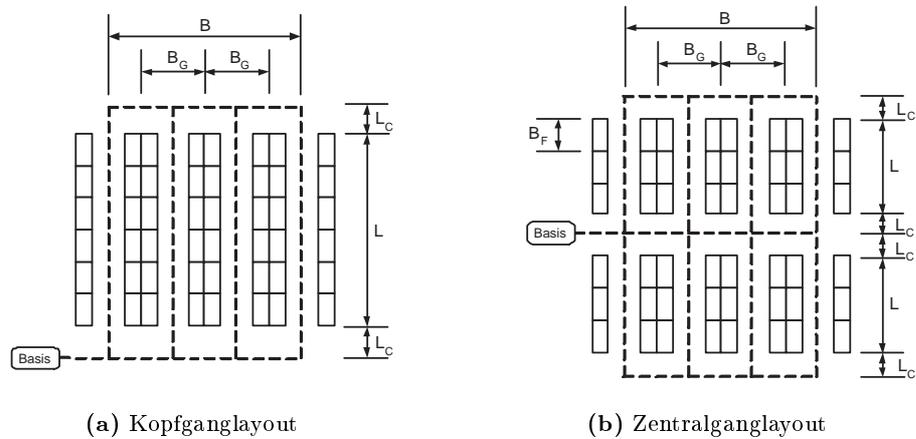


Abbildung 4.12: Bezeichnungen im Kopfganglayout und im Zentralganglayout

4.3.1.1 Ermittlung des Basisweges

Um den Basisweg zu ermitteln, muss die Art der Basis bekannt sein. Es wird zwischen einer zentralen und dezentralen Basis sowie zwischen einer inneren und äußeren Basislage unterschieden [Sch96].

Unter einer dezentralen Basis versteht man eine Basis, deren unterschiedliche Funktionsbereiche an verschiedenen Orten angeordnet werden. So kann eine Basis für den Kommissionierer bis zu drei unterschiedliche Stationen an jeweils anderen Orten aufweisen. Es kann eine Unterteilung in die Auftragsannahme B_1 , die Bereitstellung für Kommissionierbehälter B_2 und den Abgabeort B_3 für kommissionierte Aufträge vorgenommen werden. Da die Basisstationen im Vergleich zum gesamten Kommissionierbereich in der Regel einen geringen Flächenbedarf aufweisen, werden sie als punktförmig angenommen, sodass der Weg innerhalb der Stationen vernachlässigt werden kann.

Zur Minimierung des Basisweges sollten die Stationen einen möglichst geringen Abstand aufweisen. Ideal ist eine zentrale Basis, die alle drei Funktionsbereiche an einem Ort vereint.

Die Basislage beschreibt die Position der Basis in Bezug auf das gesamte Kommissioniersystem, das heißt, ob sie sich außerhalb oder innerhalb des Kommissionierbereiches befindet.

Die Basislage und die Basisform sind die entscheidenden Parameter für die Bestimmung des Basisweges. Die Abbildung 4.13 stellt eine dezentrale Basis mit äußerer Basislage und einem einseitigen Zonenzugang dar. Aufgrund der äußeren Basislage ist der Kommissionierer gezwungen, während der Auftragsbearbeitung den Kommissionierbereich einmal zu verlassen. Bis zum Erreichen der ersten Gasse muss er einen festen Basisweg zurücklegen, unabhängig davon, welche Wegstrategie innerhalb des Kommissionierbereiches vorgesehen ist. Der Basisweg kann in der Regel dem Layout des Systems entnommen werden. So setzt er sich bei einer dezentralen Basis aus den folgenden Wegstreckenanteilen zusammen:

$$s_B = s_{B_1B_2} + s_{B_2B'} + s_{B'B_3} + s_{B_3B_1} \quad (4.55)$$

Bei einer zentralen Basis ist der Basisweg durch den Zusammenhang

$$s_B = 2 \cdot s_{BB'} \quad (4.56)$$

gegeben. Kann das Kommissioniersystem an beiden Seiten betreten und verlassen werden, liegt ein System mit beidseitigem Zonenzugang vor. Für den Fall einer äußeren Basislage können die Auftragsannahme und die Abgabe der kommissionierten Behälter auf gegenüberliegenden Seiten des Kommissioniersystems erfolgen. Der zurückzulegende

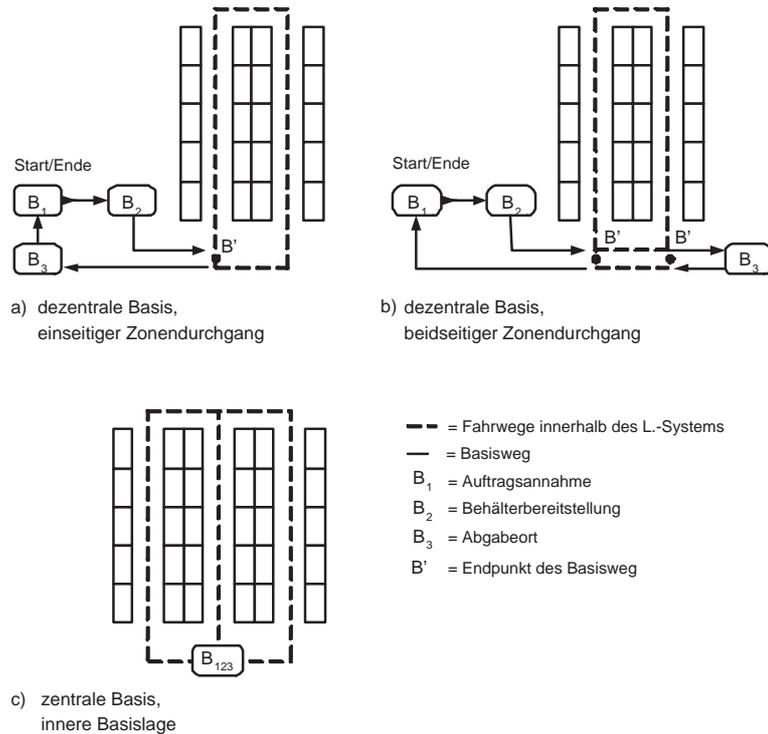


Abbildung 4.13: Dezentrale Basis mit äußerer Basislage und einseitigem Zonenzugang [Sch96]

Basisweg ergibt einen Rundweg, der von Gassenwechselwegen unterbrochen wird, und kann aus den Entfernungen im Layout entnommen werden (Abb. 4.13).

Liegt eine innere Basis vor, befindet sich die Basis innerhalb des des Lagersystems. Da der Kommissionierer das Lagersystem nicht verlassen muss, um zur Basis zu gelangen, fallen alle Wege beim Ansteuern der Basis unter den Gassenwechselweg. Somit ist bei einer inneren Basislage $s_B = 0$ (Abb. 4.13).

4.3.1.2 Berechnung des Gassenwechselweges

Bei der Berechnung der Gassenwechselwege sind zwei Fälle zu unterscheiden. Bewegt sich der Kommissionierer mäanderförmig durch das Lager, ohne einen Gang zu überspringen, ergibt sich der Gassenwechselweg aus dem Abstand B zwischen der ersten und der letzten Gasse (Abb. 4.12) multipliziert mit 2. Es gilt

$$s_{GWW} = 2 \cdot B \quad (\text{ohne Überspringen}) \quad (4.57)$$

Weiß der Kommissionierer beim Start des Kommissionier Rundgangs, in welchen Gassen sich die zu kommissionierenden Positionen befinden, muss er die übrigen Gassen nicht durchlaufen. Bei einer äußeren Basislage entspricht der Gassenwechselweg dann der Wegstrecke zu dem Gang, der einen zu kommissionierenden Artikel enthält und den

größten Abstand zur Basis aufweist multipliziert mit 2, da er diesen Weg hin- und zurückgehen muss. Zur Bestimmung der Wegstrecke kann der Ansatz gemäß (4.39) verwendet werden. Da die Positionen laut Voraussetzung gleichverteilt über N_G Gassen sind, ergibt sich der Gassenwechselweg durch Einsetzen von (4.46) mit $a = 0$ und $b = 1$ in (4.39) und Substitution von L durch B . Für den Gassenwechselweg ergibt sich dann

$$s_{GWW} = 2 \cdot \frac{n}{n+1} \cdot B \quad (\text{mit Überspringen}) \quad (4.58)$$

Der Gassenwechselweg ergibt sich für ein Kopfganglayout in gleicher Form wie bei einem Zentralganglayout. Liegt die Basis innerhalb des Lagersystems, ergeben sich für $n > 1$ ebenfalls identische Werte für den Gassenwechselweg [Sch96].

4.3.1.3 Berechnung des Gassenweges

Der Gassenweg, der bei der Bearbeitung eines Kommissionierauftrags im Mittel zurückgelegt wird, ist von der verwendeten Wegstrategie abhängig. Des Weiteren ist das konstante Anfahrmaß L_C (Abb.4.12) in den Berechnungen zu berücksichtigen.

Stichgangstrategie mit Wiederholung

Wird die Stichgangstrategie mit Wiederholung eingesetzt, ergibt sich der Gassenweg aus der mittleren Wegstrecke, die der Kommissionierer in eine Gasse hineingehen muss, multipliziert mit der Anzahl der Positionen n . Die mittlere Wegstrecke in einer Gasse ergibt sich dabei aus Addition des Anfahrmaßes L_C und des Produkts des Erwartungswerts der normierten Wahrscheinlichkeitsdichte $f(x)$ und der Länge der Gasse L . Unter Berücksichtigung des Hin- und Rückwegs gilt:

$$\begin{aligned} s_{GW} &= 2 \cdot n \cdot \left(L_C + L \cdot \int_0^{\infty} x \cdot f(x) dx \right) \\ &= 2 \cdot n \cdot (L_C + L \cdot E(X)) \end{aligned} \quad (4.59)$$

Entspricht $f(x)$ einer Gleichverteilung gemäß (4.46) mit $a = 0$ und $b = 1$, dann ergibt sich der Gassenweg durch einsetzen von (4.47) in (4.59) zu

$$s_{GW} = 2 \cdot n \cdot \left(L_C + \frac{1}{2} \cdot L \right) \quad \text{Gleichverteilung} \quad (4.60)$$

Kann für $f(x)$ eine Exponentialverteilung gemäß (4.51) angenommen werden, dann erhält man den Gassenweg durch Einsetzen von (4.52) in (4.59) zu

$$s_{GW} = 2 \cdot n \cdot \left(L_C + L \cdot \frac{1}{\lambda} \right) \quad \text{Exponentialverteilung} \quad (4.61)$$

Die gezeigten Berechnungsformeln gelten für das Zentralganglayout in gleicher Form wie für das Kopfganglayout.

Stichgangstrategie ohne Wiederholung

Wird die Stichgangstrategie ohne Wiederholung angewendet, werden zunächst die mittleren Wegstrecken s_r , die beim Picken von r Positionen innerhalb einer Gasse zurückgelegt werden müssen, berechnet. Dabei läuft r von $1 \rightarrow n$, da maximal n Positionen in einer Gasse liegen können. Im zweiten Schritt werden die jeweiligen Wegstrecken s_r mit der zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeit $p_{ges}(r)$ multipliziert. Für den Gassenweg gilt dann

$$s_{GW} = 2 \cdot \left(\sum_{r=1}^n p_{ges}(r) \cdot s_r \right) \quad (4.62)$$

Definiert man $p_i(r)$ als die Wahrscheinlichkeit, r Positionen in Gasse i vorzufinden, dann ergibt sich die Gesamtwahrscheinlichkeit $p_{ges}(r)$ zu

$$p_{ges}(r) = \sum_{i=1}^{N_G} p_i(r) \quad (4.63)$$

Unter der Voraussetzung, dass die Anzahl der Artikel und die Zugriffshäufigkeit pro Gasse gleich groß sind, gilt für die Wahrscheinlichkeiten

$$p_1(r) = p_2(r) = \dots = p_{N_G}(r) = p(r) \quad (4.64)$$

Die Eintrittswahrscheinlichkeit der Wegstrecke s_r kann dann durch

$$p_{ges}(r) = N_G \cdot p(r) \quad (4.65)$$

beschrieben werden. Einsetzen von (4.65) in (4.62) liefert für den Gassenweg s_{GW} den Zusammenhang

$$s_{GW} = 2 \cdot N_G \cdot \sum_{r=1}^n p(r) \cdot s_r \quad (4.66)$$

Die mittlere Wegstrecke s_r , die innerhalb einer Gasse bei der Bearbeitung von r Positionen zurückgelegt werden muss, ergibt sich aus der Addition von (4.39) bzw. (4.40) und dem Anfahrmaß L_C . Es gilt

$$s_r = 2 \cdot \left(L_C + L \cdot \int_0^{\infty} x \cdot r \cdot f(x) \cdot [F(x)]^{r-1} dx \right) \quad (4.67)$$

bzw.

$$s_r = 2 \cdot \left[L_C + L \cdot \int_0^{\infty} 1 - [F(x)]^r dx \right] \quad (4.68)$$

Zur Berechnung von s_{GW} muss gemäß Formel (4.66) im zweiten Schritt die Laplace Wahrscheinlichkeit $p(r)$ für das Ereignis bestimmt werden, dass genau r von insgesamt n Positionen in einer Gasse gepickt werden.

Dies kann durch ein Urnenmodell ohne Zurücklegen beschrieben werden. In der Urne befinden sich M_G schwarze Kugeln und $M - M_G$ weiße Kugeln. Die schwarzen Kugeln stellen die Artikel aus der zu betrachtenden Gasse dar. Die weißen Kugeln repräsentieren die Artikel der übrigen Gassen. Aus der Urne wird eine Zufallsstichprobe vom Umfang n ohne Zurücklegen entnommen. Um die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, bei n gezogenen Kugeln genau r schwarze vorzufinden, muss zunächst die Anzahl aller Möglichkeiten ermittelt werden, bei denen genau r schwarze Kugeln vorliegen.

Dazu bestimmt man zunächst die Möglichkeiten, r schwarzen Kugeln aus M_G zu kombinieren. Da keine Kugel zurückgelegt wird und die Reihenfolge nicht berücksichtigt wird, beträgt die Anzahl der möglichen Kombinationen $\binom{M_G}{r}$. In analoger Weise bestimmt man die Anzahl der möglichen Kombinationen von $n - r$ weißen Kugeln, das heißt $\binom{M - M_G}{n - r}$. Da sämtliche Kombinationen schwarzer Kugeln mit allen Kombinationen weißer Kugeln kombiniert werden können, ergibt sich die Anzahl aller kombinatorischen Möglichkeiten, bei n Zügen r schwarze Kugeln vorzufinden, durch $\binom{M_G}{r} \binom{M - M_G}{n - r}$. Zur Berechnung der Laplace-Wahrscheinlichkeit dividiert man die Anzahl der „günstigen“ Ereignisse durch die Anzahl aller kombinatorischen Möglichkeiten, d. h. durch $\binom{M}{n}$. Daraus ergibt sich die Wahrscheinlichkeit

$$p(r) = \frac{\binom{M_G}{r} \cdot \binom{M - M_G}{n - r}}{\binom{M}{n}} \quad r = 0, 1, 2, \dots, n; \quad NB : n \leq M_G \quad (4.69)$$

Die Wahrscheinlichkeit r Positionen in einer Gasse zu picken, entspricht damit der hypergeometrischen Verteilung.

Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit mit Hilfe der hypergeometrischen Verteilung muss gelten: $r \leq M_G$. Mit $r = 1, 2, 3, \dots, n$ folgt die Bedingung $n \leq M_G$. Das bedeutet, dass die Berechnung des mittleren Gassenweges nur dann möglich ist, wenn die mittlere Anzahl Positionen pro Auftrag geringer ist als die Anzahl der Artikel, die in einer Gasse gelagert werden. In realen Systemen übersteigt in der Regel die Anzahl der Artikel pro Gasse M_G die Anzahl der Positionen pro Auftrag n um ein Vielfaches. Es wird daher im weiteren Verlauf der Arbeit auf die Angabe dieser Nebenbedingung bei der Darstellung der Formeln verzichtet.

Der Gassenweg s_{GW} für beliebig verteilte Zugriffshäufigkeiten innerhalb der Gassen

ergibt sich durch Einsetzen von (4.39) und (4.69) in (4.66) zu

$$s_{GW} = 2 \cdot N_G \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G}{r} \cdot \binom{M - M_G}{n - r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + L \cdot \int_0^{\infty} x \cdot r \cdot f(x) \cdot [F(x)]^{r-1} dx \right) \right] \quad (4.70)$$

Damit ergibt sich bei gleichverteilter Zugriffshäufigkeit der Gassenweg zu

$$s_{GW} = 2 \cdot N_G \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G}{r} \cdot \binom{M - M_G}{n - r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + L \cdot \frac{r}{r + 1} \right) \right] \quad (4.71)$$

Entspricht die Zugriffshäufigkeit in der Gasse einer Exponentialverteilung, dann ergibt sich der Gassenweg zu

$$s_{GW} = 2 \cdot N_G \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G}{r} \cdot \binom{M - M_G}{n - r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{\lambda} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right] \quad (4.72)$$

Auch für die Stichgangstrategie ohne Wiederholung können die Berechnungsformeln bei Zentralganglayout und Kopfganglayout in gleicher Form benutzt werden.

Mittelpunkt-Heuristik

Bewegt sich der Kommissionierer nach der Mittelpunkt-Heuristik durch das Lager, kann die Berechnung des Gassenweges grundsätzlich wie bei der Stichgangstrategie ohne Wiederholung erfolgen.

Bei der Mittelpunkt-Heuristik ist strategiebedingt bei jedem Kommissionierrundgang ein Wechsel vom Kopfgang zum rückwärtigen Gang der Gassen erforderlich. Der Kommissionierer legt somit, unabhängig von der Anzahl zu kommissionierender Positionen, mindestens eine konstante Wegstrecke der Länge

$$s_{GW}^C = 2 \cdot (2 \cdot L_C + L) \quad (4.73)$$

zurück. Nur in dem Fall, dass alle Positionen in einer Gasse liegen, wird diese Strecke unterschritten. Dieser Fall stellt den Ausnahmefall dar und wird im Rahmen der Berechnungen vernachlässigt. Der gesamte Gassenweg, der bei einem Kommissionierrundgang zurückgelegt wird, setzt sich demnach aus einem konstanten und einem variablen Weganteil zusammen.

Da beim konstanten Weganteil bereits zwei Gassen durchschritten werden, reduziert sich die Anzahl der Gassen, die im variablen Anteil berücksichtigt werden müssen, um zwei.

Die verbleibenden Gassen ($N_G - 2$) werden vom Kommissionierer einmal von der Vorderseite und einmal von der Rückseite betreten und jeweils nur bis zur Mitte der Gasse durchlaufen. Daher werden alle verbleibenden Gassen als zwei unabhängige Gassen mit halber Länge und halber Anzahl Artikel betrachtet. Definiert man N_G^* als die Anzahl der Gassen, die im variablen Weganteil berücksichtigt werden, sowie L^* und M_G^* als die zugehörige Länge und Anzahl Artikel pro Gasse, dann ergibt sich der gesamte Gassenweg aus der Addition von (4.73) und (4.70) zu

$$s_{GW} = 2 \cdot (2 \cdot L_C + L) + 2 \cdot N_G^* \cdot$$

$$\sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G^*}{r} \cdot \binom{M - M_G^*}{n - r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + L^* \cdot \int_0^\infty x \cdot r \cdot f(x) \cdot [F(x)]^{r-1} dx \right) \right]$$

Ersetzt man N_G^* , L^* und M_G^* durch die Beziehungen

$$N_G^* = 2 \cdot (N_G - 2) \quad (4.74)$$

$$M_G^* = \frac{M_G}{2} \quad (4.75)$$

$$L^* = \frac{L}{2} \quad (4.76)$$

dann ergibt sich der allgemeine Zusammenhang für die Berechnung des Gassenweges bei Anwendung der Mittelpunkt-Heuristik in einem Kopfganglayout zu

$$s_{GW} = 2 \cdot (2 \cdot L_C + L) + 2 \cdot (N_G - 2) \cdot$$

$$\sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G/2}{r} \binom{M - M_G/2}{n - r}}{\binom{M}{n}} \left(L_C + \frac{L}{2} \int_0^\infty x \cdot r \cdot f(x) \cdot [F(x)]^{r-1} dx \right) \right] \quad (4.77)$$

Liegt ein Zentralganglayout vor, verdoppelt sich der konstante Weganteil s_{GW}^C auf

$$s_{GW}^C = 4 \cdot (2 \cdot L_C + L) \quad (4.78)$$

da der Kommissionierer zusätzlich einen Gang unterhalb der zentralen Gasse durchlaufen muss, um auf die Rückseite der Gasse zu gelangen. Damit ergibt sich für N_G^*

$$N_G^* = 2 \cdot (N_G - 4) \quad (4.79)$$

Der Gassenweg im Zentralganglayout ist dann durch den Zusammenhang

$$s_{GW} = 4 \cdot (2 \cdot L_C + L) + 4 \cdot (N_G - 4) \cdot$$

$$\sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G/2}{r} \binom{M - M_G/2}{n-r}}{\binom{M}{n}} \left(L_C + \frac{L}{2} \cdot \int_0^\infty x \cdot r \cdot f(x) \cdot [F(x)]^{r-1} dx \right) \right] \quad (4.80)$$

gegeben.

Wird die Zugriffshäufigkeit auf einen Artikel bei der Einlagerung berücksichtigt, dann ist es bei Anwendung der Mittelpunkt-Heuristik sinnvoll, die Artikel mit den höchsten Zugriffsraten an den jeweiligen Gassenanfang zu platzieren. Die Zugriffshäufigkeit kann jeweils bis zur Mitte der Gasse durch eine Exponentialverteilung angenähert werden. Abbildung 4.14 zeigt das Histogramm und die entsprechende Verteilungsfunktion. Für

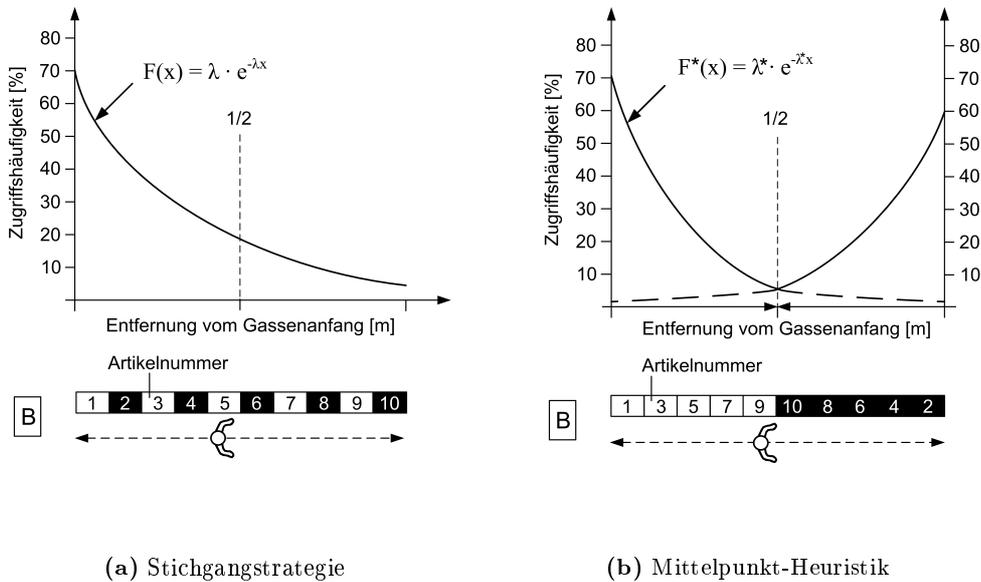


Abbildung 4.14: Verlauf der Zugriffshäufigkeit in einer Gasse bei Berücksichtigung der Zugriffshäufigkeit bei unterschiedlichen Wegstrategien

die Berechnung des Gassenweges muss der Erwartungswert $E(X)^*$, der sich durch die Zuteilung der Artikel auf die Lagerplätze ergibt, bekannt sein.

Der Gassenweg bei Einsatz der Mittelpunkt-Heuristik ergibt sich damit in Abhängigkeit vom Layout und von der Verteilungsfunktion zu

Kopfganglayout/Gleichverteilung:

$$\begin{aligned}
s_{GW} &= 2 \cdot (2 \cdot L_C + L) \\
&+ 2 \cdot (N_G - 2) \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G/2}{r} \cdot \binom{M - M_G/2}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{2} \cdot \frac{r}{r+1} \right) \right]
\end{aligned} \tag{4.81}$$

Kopfganglayout/Exponentialverteilung:

$$\begin{aligned}
s_{GW} &= 2 \cdot (2 \cdot L_C + L) \\
&+ 2 \cdot (N_G - 2) \cdot \sum_{r=1}^n \left(\frac{\binom{M_G/2}{r} \cdot \binom{M - M_G/2}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{\lambda^*} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right)
\end{aligned} \tag{4.82}$$

Für das Zentralganglayout gilt in analoger Form

Zentralganglayout/Gleichverteilung:

$$\begin{aligned}
s_{GW} &= 4 \cdot (2 \cdot L_C + L) \\
&+ 4 \cdot (N_G - 4) \cdot \sum_{r=1}^n \left(\frac{\binom{M_G/2}{r} \cdot \binom{M - M_G/2}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{2} \cdot \frac{r}{r+1} \right) \right)
\end{aligned} \tag{4.83}$$

Zentralganglayout/Exponentialverteilung:

$$\begin{aligned}
s_{GW} &= 4 \cdot (2 \cdot L_C + L) \\
&+ 4 \cdot (N_G - 4) \cdot \sum_{r=1}^n \left(\frac{\binom{M_G/2}{r} \cdot \binom{M - M_G/2}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{\lambda^*} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right)
\end{aligned} \tag{4.84}$$

Schleifenstrategie mit Überspringen

Für den Fall, dass der Kommissionierer Gassen überspringt, in denen keine Positionen zu picken sind, kann der Gassenweg mit (4.66) berechnet werden. Die Wegstrecken s_r entsprechen bei dieser Strategie immer der gesamten Weglänge der Gasse. Das heißt

$$s_r(1) = s_r(2) = s_r(3) = s_r(4) = \dots s_r(N_G) = s_r = L \quad (4.85)$$

Damit vereinfacht sich (4.66) zu

$$s_{GW} = N_G \cdot (2 \cdot L_C + L) \sum_{r=1}^n p(r) \quad (4.86)$$

Mit der Nebenbedingung

$$\sum_{r=0}^n p(r) = 1 \quad (4.87)$$

$$\Leftrightarrow \sum_{r=1}^n p(r) + p(0) = 1$$

$$\Leftrightarrow \sum_{r=1}^n p(r) = 1 - p(0) \quad (4.88)$$

erhält man durch Einsetzen von (4.88) in (4.86)

$$s_{GW} = N_G \cdot (2 \cdot L_C + L) \cdot (1 - p(0)) \quad (4.89)$$

Für p_0 ergibt sich gemäß (4.69) die hypergeometrische Verteilung zu

$$p(0) = \frac{\binom{M_G}{0} \cdot \binom{M - M_G}{n - 0}}{\binom{M}{n}} = \frac{\binom{M - M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \quad (4.90)$$

Für die mittlere Wegstrecke bei der Schleifenstrategie mit überspringen gilt dann:

$$s_{GW} = N_G \cdot (2 \cdot L_C + L) \cdot \left[1 - \frac{\binom{M - M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \right] \quad (4.91)$$

Schleifenstrategie ohne Überspringen

Bei dieser Strategie muss der Kommissionierer jede Gasse mindestens einmal durchlaufen. Liegt eine ungerade Anzahl Gassen vor, wird die letzte Gasse zweimal durchlaufen. Der Gassenweg ergibt sich zu

$$s_{GW} = \begin{cases} N_G \cdot (2 \cdot L_C + L) & \text{für } N_G \text{ gerade} \\ (N_G + 1) \cdot (2 \cdot L_C + L) & \text{für } N_G \text{ ungerade} \end{cases} \quad (4.92)$$

Berechnung der Wegzeit

Sind Basisweg, Gassenwechselweg und Gassenweg bekannt, kann die Zeit t_n ermittelt werden, die benötigt wird, um die gesamte Wegstrecke s_n gemäß (4.54) zurückzulegen.

Mit der Annahme, dass bei einem Gassenwechsel die Geschwindigkeit des Kommissionierers unverändert bleibt, folgt für die Anzahl der Beschleunigungen $n_a = n + 1$ (4.30).

Durch Einsetzen von n_a in (4.16) ergibt sich die Wegzeit t_n zu

$$t_n = \begin{cases} \frac{s_n}{v} + (n + 1) \cdot \frac{v}{a} & \text{für } \frac{s_n}{n} \geq \frac{v^2}{a} \\ (n + 1) \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{s_n}{n \cdot a}} & \text{für } \frac{s_n}{n} < \frac{v^2}{a} \end{cases} \quad (4.93)$$

Wird bei einem Gassenwechsel die Geschwindigkeit auf 0 m/s reduziert (z. B. vollautomatisches System), ergibt sich sowohl bei der Einfahrt als auch bei der Ausfahrt aus einer Gasse ein Beschleunigungszeitanteil. Die Anzahl der zusätzlichen Beschleunigungen pro Kommissionierauftrag ergibt sich damit aus dem zweifachen der im Mittel angesprochenen Gassen χ . Diese sind durch den Zusammenhang

$$\begin{aligned} \chi &= N_G \cdot \sum_{r=1}^n p(r) \\ &= N_G \cdot (1 - p(0)) \\ &= N_G \cdot \left[1 - \frac{\binom{M - M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \right] \end{aligned} \quad (4.94)$$

gegeben. Die Anzahl der insgesamt durchzuführenden Beschleunigungen pro Kommissionierauftrag ergibt sich entsprechend aus

$$n_a = n + 1 + 2 \cdot N_G \cdot \left[1 - \frac{\binom{M - M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \right] \quad (4.95)$$

Die Wegzeit pro Kommissionierauftrag ergibt sich durch Einsetzen von (4.95) in (4.16) zu

$$t_n = \begin{cases} \frac{s_n}{v} + \left[n + 1 + 2 \cdot N_G \cdot \left[1 - \frac{\binom{M - M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \right] \right] \cdot \frac{v}{a} & \text{für } \frac{s_n}{n} \geq \frac{v^2}{a} \\ \left[n + 1 + 2 \cdot N_G \cdot \left[1 - \frac{\binom{M - M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \right] \right] \cdot \sqrt{\frac{s_n}{n \cdot a}} & \text{für } \frac{s_n}{n} < \frac{v^2}{a} \end{cases} \quad (4.96)$$

Die Wegzeit pro Position ergibt sich durch Division von t_n und n .

4.3.2 Ware-zum-Mann

WzM-Systeme bestehen im Gegensatz zu MzW-Systemen aus einem vollautomatischen Lagersystem (z. B. AKL), einem Kommissioniersystem und der die Teilsysteme verbindenden Fördertechnik. Um die Leistung eines solchen Systems zu ermitteln, müssen gemäß Kapitel 4.1 die Leistungen der Teilsysteme und die daraus resultierenden Zwischenankunftszeiten der Ladeeinheiten bekannt sein. In Kapitel 3 wurden die Berechnungsverfahren der verschiedenen Teilsysteme dargestellt; sie werden im Folgenden so weiterentwickelt, dass die erforderlichen Zwischenankunftszeiten berechnet werden können.

4.3.2.1 Bereitstellsystem – Vollautomatische Lager

Bei der Ermittlung der minimalen Zwischenankunftszeit von Objekten, die durch das Lagersystem bereitgestellt werden, ist zu berücksichtigen, dass jede Ladeeinheit zeitnah wieder zurückgelagert wird. Wird eine Ladeeinheit bei der Kommissionierung vollständig geleert, wird ein entsprechender Nachschubauftrag generiert, sodass anstelle des leeren Behälters ein voller Behälter des gleichen Artikels ins Lager eingelagert wird.

Das bedeutet für das Lagersystem, dass im Prinzip auf jede Auslagerung eine Einlagerung folgt. Aus diesem Grund entspricht die Zwischenankunftszeit $t_{ZAZ,B}$ der ausgelagerten Ladeeinheiten der doppelten mittleren Spielzeit gemäß (3.5). Es gilt

$$t_{ZAZ-B} = 2 \cdot t_{sp} \quad (4.97)$$

Die Spielzeiten sind gemäß Kapitel 3 für gleichverteilte Zugriffshäufigkeiten gegeben.

Um die Leistungsfähigkeit eines Lagers zu erhöhen, kann bei der Einlagerung von Artikeln die Zugriffshäufigkeit berücksichtigt werden. Dadurch wird der Anteil der kurzen Fahrstrecken größer und die mittlere Fahrzeit bei der Durchführung eines Arbeitsspiels geringer. Die Einführung einer Schnelldreherzone bzw. ABC-Zone ist die einfachste Methode, um diesen Effekt zu nutzen.

Die geringste mittlere Fahrzeit in einem Lager erhält man, wenn jedem Artikel ein Lagerplatz zugeordnet wird, der seiner Zugriffshäufigkeit entspricht. Das heißt, dass die Artikel absteigend nach ihrer Zugriffshäufigkeit und die Lagerplätze aufsteigend nach der benötigten Fahrzeit zur Erreichung des Lagerplatzes sortiert werden. Anschließend werden jedem Artikel und Lagerplatz ein absoluter Rang R und ein relativer Rang r , der sich aus dem Quotienten des absoluten Ranges R und der Anzahl der Artikel M bzw. Lagerplätze m ergibt, zugeteilt. Es gilt

$$r_{i,M} = \frac{R_i}{M} \quad \text{Artikel} \quad (4.98)$$

$$r_{j,m} = \frac{R_j}{m} \quad \text{Lagerfach} \quad (4.99)$$

In Abbildung (4.15-a) sind die Lagerfächer entsprechend ihres Rangs R_j nummeriert. Da die Fahrzeiten zu den Lagerplätzen auf den grau bzw. weiß hinterlegten Isochronen identisch sind ($\omega = 1$), ist der Rang in diesen Bereichen willkürlich vergeben. In (4.15-b) ist die relative Zugriffshäufigkeit der Artikel nach Rang R_i dargestellt, die näherungsweise durch eine Exponentialverteilung abgebildet wird. Jedem Artikel wird nun der

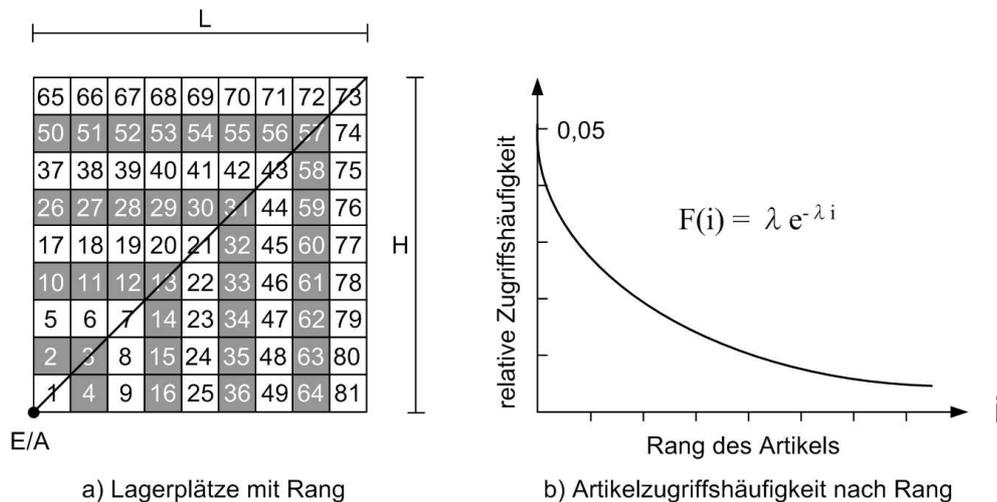


Abbildung 4.15: Rang der Lagerplätze und Zugriffshäufigkeit der Artikel nach Rang

Lagerplatz zugeordnet, bei dem die Differenz der relativen Ränge minimal wird. Es gilt

$$|r_{i,M} - r_{j,m}| = \min \quad (4.100)$$

Damit wird jedem Artikel i genau ein Lagerplatz j zugeordnet. Die daraus resultierende Fahrzeit zum Lagerplatz des Artikels i wird mit t_i bezeichnet.

Die Wahrscheinlichkeit p_i für das Auftreten der Fahrzeit t_i entspricht der relativen Zugriffshäufigkeit des Artikels i . Damit ergibt sich die mittlere Fahrzeit bei einem Einzelspiel $t_{F,es}$ zu

$$t_{F,es} = 2 \cdot \sum_{i=1}^M t_i \cdot p_i \quad (4.101)$$

Lässt sich die relative Zugriffshäufigkeit mit einer Exponentialverteilung gemäß Abbildung 4.15-b abbilden und berücksichtigt man, dass sich die Zeit t_i aus dem Maximum von $t_{i,x}$ und $t_{i,y}$ ergibt, dann gilt

$$t_{F,es} = 2 \cdot \sum_{i=1}^M \max(t_{i,x}; t_{i,y}) \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot i} \quad (4.102)$$

Setzt man eine Standardfahrrampe für alle Fahrbewegungen innerhalb des Lagers gemäß (4.15) voraus, dann gilt für die mittlere Fahrzeit eines Einzelspiels

$$t_{F,es} = 2 \cdot \sum_{i=1}^M \max \left[\left(\frac{d_{i,x}}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right), \left(\frac{d_{i,y}}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} \right) \right] \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot i} \quad (4.103)$$

Einsetzen von (4.103) in (3.7) liefert die mittlere Spielzeit t_{es} . Die Distanzen s_i ergeben sich direkt aus der Geometrie des Lagers. Für die Berechnung der mittleren Doppelspielzeit muss die Fahrzeit zwischen zwei beliebigen Lagerplätzen ermittelt werden. Da im vorliegenden Fall die Eintrittswahrscheinlichkeit der unterschiedlichen Wegstrecken nicht analytisch beschrieben werden kann, ist eine Berechnung nicht möglich. Es wird daher näherungsweise davon ausgegangen, dass alle Wegstrecken mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten. Unter dieser Voraussetzung und mit $\omega = 1$ ist die mittlere Wegstrecke durch (3.35) gegeben. Die mittlere Fahrzeit eines Doppelspiels ergibt sich dann zu

$$t_{F,ds} = 2 \cdot \sum_{i=1}^M \max \left[\left(\frac{d_{i,x}}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right), \left(\frac{d_{i,y}}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} \right) \right] \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot i} + \frac{1}{2} \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \frac{14}{30} \frac{L}{v_x} \quad (4.104)$$

Einsetzen von (4.104) in (3.8) liefert die mittlere Doppelspielzeit für $\omega = 1$.

4.3.2.2 Fördersystem

Für die Ermittlung der Zwischenankunftszeiten $t_{ZAZ,FT}$ muss zwischen der normalen Fördertechnik und den Transportknoten unterschieden werden. Für die einfachen Förderelemente vom Typ (1/1) können die Durchsatzberechnungen gemäß Kapitel 3 direkt in die Zwischenankunftszeit umgerechnet werden. Es gilt

$$t_{ZAZ,FT} = \frac{1}{\lambda} \quad (4.105)$$

Für Transportknoten des Typs (m/n) müssen die Grenzleistungsgesetze aus Kapitel 3 so umformuliert werden, dass sich die maximale Stromstärke λ_{max} in Abhängigkeit von allen bekannten Größen ergibt. Die Auslastung des Knotens beträgt in diesem Fall 100 %.

Wird der Anteil der Einzelströme λ_i am Gesamtstrom λ_{max} mit p_i beschrieben, dann gilt

$$\lambda_i = \lambda_{max} \cdot p_i \quad (4.106)$$

mit der Nebenbedingung

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^k \lambda_i \quad (4.107)$$

Stochastische Abfertigung

Für die stochastische Abfertigung an einem unstetigen Knoten mit einer Auslastung von 100% ergibt sich durch Einsetzen von (4.106) in (3.55) der Zusammenhang

$$\lambda_{max} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^k \left\{ \left[\sum_{x=1}^{c_i-1} p_i^x \cdot \frac{1-p_i}{\mu_i(x)} \right] + p_i^{c_i} \cdot \frac{1}{\mu_i(c_i)} \right\} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}^{ver} \right\} = 1 \quad (4.108)$$

Mit

$$\lambda_{max} = \frac{1}{t_{ZAZ,TK}} \quad (4.109)$$

ergibt sich die minimale Zwischenankunftszeit bei stochastischer Abfertigung für einen unstetigen Transportknoten zu

$$t_{ZAZ,TK} = \sum_{i=1}^k \left\{ \left[\sum_{x=1}^{c_i-1} p_i^x \cdot \frac{1-p_i}{\mu_i(x)} \right] + p_i^{c_i} \cdot \frac{1}{\mu_i(c_i)} \right\} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}^{ver} \quad (4.110)$$

Liegt eine stochastische Abfertigung an einem stetigen Transportknoten vor, wird (3.56) zu

$$\lambda_{max} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}^{ver} \right\} = 1 \quad (4.111)$$

Mit (4.109) ergibt sich die minimale Zwischenankunftszeit für einen stetigen Transportknoten mit stochastischer Abfertigung:

$$t_{ZAZ,TK} = \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}^{ver} \quad (4.112)$$

Schubweise Abfertigung

Liegt eine schubweise Abfertigung vor, ergibt sich bei 100 % Auslastung und Einsetzen von (4.106) in (3.61) die Beziehung:

$$\begin{aligned} 1 &= \lambda_{max} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i(c_i)} + \nu \cdot \left(\sum_{j=1}^{k-1} t_{j,j+1}^{ums} + t_{k,1}^{ums} \right) \\ \Leftrightarrow \lambda_{max} &= \frac{1 - \nu \cdot \left(\sum_{j=1}^{k-1} t_{j,j+1}^{ums} + t_{k,1}^{ums} \right)}{\sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i(c_i)}} \end{aligned} \quad (4.113)$$

Mit (4.109) ergibt sich die Zwischenankunftszeit eines Transportknotens $t_{ZAZ,TK}$ zu:

$$t_{ZAZ,TK} = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i(c_i)}}{1 - \nu \cdot \left(\sum_{j=1}^{k-1} t_{j,j+1}^{ums} + t_{k,1}^{ums} \right)} \quad (4.114)$$

Um die minimale Zwischenankunftszeit $t_{ZAZ,TK}$ zu erreichen, müssen die Zeitanteile $\frac{T_i}{T_Z}$ den Stromstärkeanteilen p_i entsprechen. Durch eine geeignete Bestimmung der Zyklusdauer T_Z kann die Umschaltfrequenz reduziert werden. Bei variabler Umschaltung auf die einzelnen Stromrichtungen ergeben sich automatisch die optimalen Zeitanteile für die einzelnen Richtungen. Bei der variablen Abfertigung ist zu beachten, dass die Zykluszeit T_Z keine konstante Größe mehr ist, sondern vom zeitlichen Verhalten der Materialströme abhängt.

Vorfahrt

Wird an einem Transportknoten nach dem Vorfahrtsprinzip abgefertigt, dann gilt das

allgemeine Materialflussgesetz bei Vorfahrt gemäß (3.68). Für die maximale Nebenstromstärke $\lambda_{N,max}$ gilt unter Berücksichtigung der Nebenbedingung, dass $0 < \lambda_H \leq \mu_H$ und $\lambda_N \leq \mu_N$

$$\lambda_{N,max} = \lambda_H \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(k \cdot \int_{t_k}^{t_{k+1}} f(t) dt \right)$$

$$NB: 0 < \lambda_H \leq \mu_H; \lambda_N \leq \mu_N \quad (4.115)$$

Die maximale Gesamtstromstärke λ_{max} ergibt sich aus der Summe von Haupt- und Nebenstrom. Es gilt

$$\lambda_{max} = \lambda_H + \lambda_{N,max} \quad NB: \lambda_H \leq \mu_H; \lambda_N \leq \mu_N \quad (4.116)$$

Durch Einsetzen von (4.115) in (4.116) ergibt sich die maximale Gesamtstromstärke λ_{max} des Transportknotens zu

$$\lambda_{max} = \lambda_H \left[1 + \sum_{k=0}^{\infty} \left(k \cdot \int_{t_k}^{t_{k+1}} f(t) dt \right) \right]$$

$$NB: 0 < \lambda_H \leq \mu_H; \lambda_N \leq \mu_N \quad (4.117)$$

Der maximale Durchsatz ist demnach abhängig von der Stromstärke des Hauptstroms λ_H und dessen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(x)$. Mit (4.109) ergibt sich die minimale mittlere Zwischenankunftszeit eines Transportknotens bei Vorfahrt $t_{ZAZ,TK}$ zu

$$t_{ZAZ,TK} = \frac{1}{\lambda_H \left[1 + \sum_{k=0}^{\infty} \left(k \cdot \int_{t_k}^{t_{k+1}} f(t) dt \right) \right]}$$

$$NB: 0 < \lambda_H \leq \mu_H; \lambda_N \leq \mu_N \quad (4.118)$$

4.3.2.3 Sortier-und Verteilsystem

Gemäß dem Berechnungsansatz aus Kapitel 4.1 muss die Sortierzeit pro Sortiereinheit bekannt sein, um die Leistungsfähigkeit eines mit Sortiersystem ausgestatteten Kommissioniersystems zu berechnen.

Im Kapitel 3.5 wird dargelegt, wie der maximale Durchsatz einer Sortieranlage $\lambda_{sort,max}$ für unterschiedlichste technische Realisationen von Sortiersystemen ermittelt wird. Die

Berechnung beschränkt sich dabei auf den Durchsatz des Verteilförderers der Sortieranlage (vgl. Kapitel 3.5). Die Sortierzeit pro Sortiereinheit kann direkt aus dem Maximaldurchsatz $\lambda_{sort,max}$ abgeleitet werden. Es gilt

$$t_{sort,max} = \frac{1}{\lambda_{sort,max}} \quad (4.119)$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass alle anderen Funktionsbereiche des Sortiersystems (vgl. Kapitel 2.2.3) auf die Leistungsfähigkeit des Verteilförderers abgestimmt sind.

4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Kapitels wurde ein Berechnungsalgorithmus entwickelt, mit dem die Leistungsfähigkeit von verschiedensten Kommissioniersystemen nach einem standardisierten Verfahren ermittelt werden kann. Basis des Berechnungsalgorithmus ist die Annahme, dass sich jedes Kommissioniersystem in Teilsysteme untergliedern lässt, die nach den Prinzipien WzM und MzW arbeiten.

Die Berechnungsformeln zur Leistungsermittlung der Teilsysteme Lager, Fördertechnik und Sortieranlage wurden so weiterentwickelt, dass sie direkt in den Berechnungsalgorithmus eingesetzt werden können.

Kern des Kapitels ist die Entwicklung eines Berechnungsverfahrens für die Kommissionierung nach dem Prinzip MzW, mit dem die Kommissionierleistung für verschiedene Wegstrategien auch für sehr kleine Auftragsgrößen bestimmt werden kann und das zudem die Einlagerstrategie berücksichtigt.

In Abbildung 4.16 ist die Vorgehensweise bei der Berechnung eines Kommissioniersystems in Form eines Flussdiagramms dargestellt. Auf den grau hinterlegten Feldern sind die Nummern der Formeln angegeben, mit der die entsprechende Berechnung erfolgt. Liegt ein zweistufiges Kommissioniersystem vor, dann muss die Schleife entsprechend zweimal durchlaufen werden. Die vorgestellte Systematik lässt sich auf alle in Kapitel 2.2.4 vorgestellten Systeme anwenden. WzM- und MzW-Systeme werden direkt behandelt. Die Schachtkommissionierung kann durch einem MzW-System abgebildet werden. Dabei wird der Behälter, der von einem Automaten zum nächsten fährt, wie der Kommissionierer in einem konventionellen Kommissionierlager behandelt. Das Kommissioniernest entspricht einem WzM-System, bei dem die Zwischenankunftszeiten des Lagers und der Fördertechnik null Sekunden entsprechen. Ein zweistufiges Pick-to-Belt-System entspricht in der ersten Stufe einem WzM-System und in der zweiten Stufe einem MzW-System. Das inverse Kommissionieren entspricht ebenfalls einem zweistufigen Kommissioniersystem. Bei diesem System entspricht die erste Stufe einem WzM-System und die

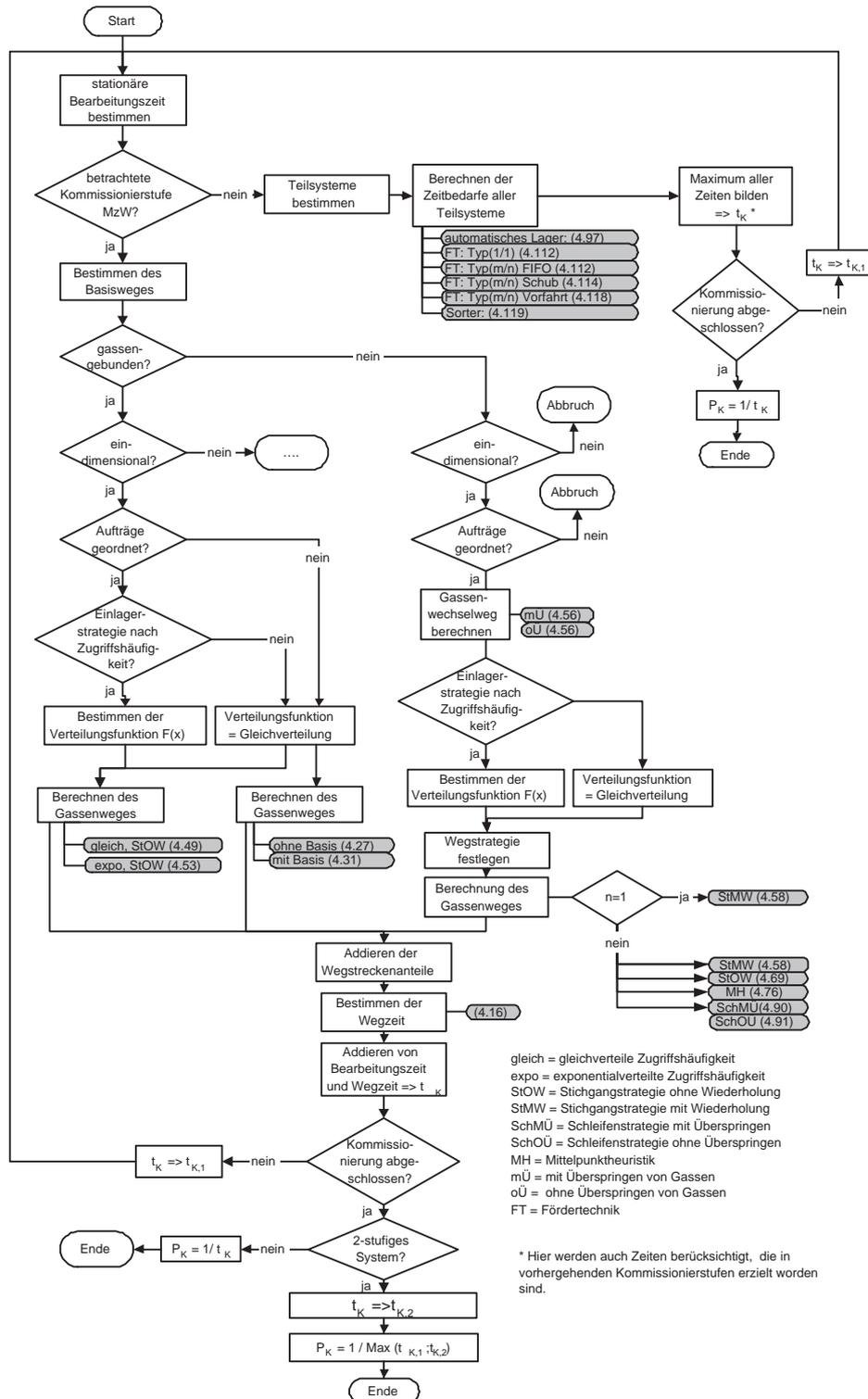


Abbildung 4.16: Vorgehen bei der Berechnung eines Kommissioniersystems

zweite Stufe einem MzW-System. Die Anforderung an den Berechnungsalgorithmus, dass alle Grundtypen der Kommissionierung gemäß Kapitel 2.2.4 berechenbar sind, ist demnach erfüllt.

Um die Gültigkeit des vorgestellten Berechnungsverfahrens für MzW-Systeme zu belegen, erfolgt im Kapitel 5 eine ausführliche Validierung.

Kapitel 5

Validierung und Bewertung

Das vorgestellte Berechnungsverfahren für die Kommissionierung nach dem Prinzip MzW in Kapitel 4.1 wurde auf Basis verschiedener Annahmen und Restriktionen entwickelt. Diese Vereinfachungen können dazu führen, dass die berechneten Werte nicht vollständig mit den in realen Systemen erzielten Werten übereinstimmen. Für den Einsatz des Berechnungsverfahrens in der Planungsphase eines Kommissioniersystems muss jedoch bekannt sein, welche Genauigkeiten in Bezug auf später zu realisierende Kommissioniersysteme mit dem Verfahren erzielbar sind.

Es werden daher im Rahmen der Validierung drei Kommissioniersysteme nach dem Prinzip MzW in einem Simulationsmodell abgebildet. In der Simulation können die stochastischen Einflüsse eines realen Systems berücksichtigt werden und die tatsächlichen Wegstrecken, die ein Kommissionierer während der Bearbeitung eines Kommissionierauftrags zurücklegt, experimentell ermittelt werden. Durch einen Vergleich der berechneten Werte mit den simulativ erzielten Ergebnissen kann die Genauigkeit der Berechnungen bestimmt werden.

Die drei konventionellen Kommissioniersysteme unterscheiden sich in der Größe des Sortiments, in der Lagerfachbreite und in der Anzahl der Gassen, auf die sich die Artikel verteilen. Für jedes System wird zudem unterschieden, ob bei der Einlagerung die Zugriffshäufigkeit der Artikel berücksichtigt wird oder ob eine zufällige Zuordnung von Lagerplatz und Artikel realisiert wird. Die Zugriffshäufigkeit eines Artikels wird im Simulationsmodell und im Rahmen der Berechnungen mit Hilfe einer Exponentialverteilung mit gegebenem Erwartungswert $E(X)$ realisiert. Dadurch ist gewährleistet, dass sowohl bei der analytischen Ermittlung der Gassen- und Gassenwechselwege als auch bei den simulativ ermittelten Werten identische Voraussetzungen vorliegen.

Die Validierung des Simulationsmodells erfolgt unter der Voraussetzung, dass die Zuordnung von Artikel und Lagerfach zufällig erfolgt. In diesem Fall kann die Zugriffs-

häufigkeit auf die Lagerplätze durch eine Gleichverteilung abgebildet werden. Die Berechnungsalgorithmen von Gudehus und Schulte liefern hierfür, unter Einhaltung der jeweiligen Einschränkungen (vgl. Kapitel 2.4), genaue Werte bezüglich der Gassenwege (Gudehus) und der Gassenwechselwege (Schulte) [Gud04, Sch96]. Stimmen die simulativ ermittelten Werte mit den berechneten Werten überein, kann das Modell als valide bezeichnet werden.

Das in Kapitel 4 vorgestellte Berechnungsverfahren ist auf beliebige Verteilungsfunktionen anwendbar. Für die Exponentialverteilung kann das Integral aus (4.59) so weit vereinfacht werden, dass eine Berechnung mit mathematischen Grundkenntnissen einfach durchführbar ist, was den Nutzen in der Praxis deutlich erhöht. Die Praxis zeigt allerdings auch, dass eine Exponentialverteilung den Verlauf der Zugriffshäufigkeit nur sehr ungenau abbildet. Mit anderen Verteilungsfunktionen wie der Weibullverteilung oder der allgemeinen Paretoverteilung lassen sich in der Regel bessere Anpassungen erzielen. Der wesentliche Nachteil dieser Verteilungen liegt darin, dass sich die Integrale (vgl. Kapitel 4.1) nur sehr schwer analytisch lösen lassen. Welche Abweichungen sich durch die Annahme einer Exponentialverteilung bei realen Daten für die unterschiedlichen Wegstrategien ergeben, wird anhand von zwei Beispielen in Kapitel 5.2 untersucht. Das Kapitel 5.3 liefert eine abschließende Bewertung der Ergebnisse.

5.1 Validierung des Berechnungsverfahrens

Zur Validierung des in Kapitel 4 vorgestellten Berechnungsverfahrens werden drei MzW-Systeme untersucht. Diese sind so gewählt, dass eine möglichst große Bandbreite möglicher Realisierungsformen bezüglich der Gassenanzahl und der Sortimentsgröße abgedeckt wird.

Das erste System weist ein kleines Sortiment von 300 Artikeln auf, die sich auf fünf Gassen verteilen. Die Fachbreite von $1,2\text{ m}$ entspricht einem Palettenplatz. Da auf beiden Seiten der Gasse gelagert wird, ergibt sich eine Gassenlänge von 36 m . Das Anfahrmaß beträgt sowohl auf der Regalstirnseite als auch an der Regalrückseite in allen Systemen 1 m . Die Gassenbreite ist ebenfalls in allen Systemen auf $3,5\text{ m}$ fixiert. Damit ergibt sich für das System 1 gemäß Abbildung 4.12-a die Breite $B = 14\text{ m}$.

Das System 2 repräsentiert ein Sortiment von 960 Artikeln, die sich auf acht Gassen verteilen. Die Fachbreite von $0,6\text{ m}$ entspricht in diesem Fall einer quer eingelagerten Düsseldorfer Palette. Die Gassenlänge beträgt entsprechend 36 m . Fachbreite und Anfahrmaß sind mit denen in System 1 identisch. Die Breite B ergibt sich zu $24,5\text{ m}$.

Das Kommissioniersystem 3 hat mit 3600 Artikeln das größte Sortiment, das sich auf zehn Gassen verteilt. Die Lagerfächer weisen eine Breite von $0,2\text{ m}$ auf. Es ergibt sich

System	M	N_G	B_F [m]	L [m]	L_C [m]	B_G [m]	B [m]
1	300	5	1,2	36	1	3,5	14
2	960	8	0,6	36	1	3,5	24,5
3	3600	10	0,2	36	1	3,5	31,5

Tabelle 5.1: Untersuchte Kommissioniersysteme

eine Gassenlänge von 36 m und eine Gesamtbreite von 31,5 m. Tabelle 5.1 zeigt die Daten der drei Systeme im Überblick.

Der Gassenweg und der Gassenwechselweg werden bei den folgenden Untersuchungen für eine fest vorgegebene Anzahl Positionen pro Auftrag analytisch und simulativ ermittelt. Der Untersuchungsbereich umfasst dabei Aufträge, die $n = 1 \rightarrow 50$ Positionen pro Auftrag aufweisen. Die Gassenwege werden jeweils für die Schleifenstrategie mit Überspringen (SchMÜ), für die Stichgangstrategie mit (StMW) und ohne Wiederholung (StOW) sowie für die Mittelpunkt-Heuristik (MH) untersucht.

Die simulativ und analytisch ermittelten Wegstrecken werden in Abhängigkeit von der Anzahl Positionen pro Auftrag grafisch dargestellt. Zudem werden die prozentualen Abweichungen der unterschiedlichen Berechnungsverfahren von der Simulation abgebildet. Da die Ergebnisse der drei untersuchten Systeme die gleichen Schlussfolgerungen zulassen, werden im Folgenden exemplarisch die Ergebnisse aus System 2 ausführlich dargestellt und erläutert. Die Ergebnisse aus System 1 und 3 sind im Anhang einzusehen.

5.1.1 Gleichverteilung – Validierung des Simulationsmodells

Es werden zunächst die Ergebnisse für die gleichverteilten Zugriffshäufigkeiten dargestellt. Die Validierung des Simulationsmodells erfolgt durch den Vergleich mit den analytisch ermittelten Werten nach Gudehus und Schulte für gleichverteilte Zugriffshäufigkeiten (s.o.). Liegt ein valides Simulationsmodell vor, dann kann das Modell als Referenz für den Fall der exponentialverteilten Zugriffshäufigkeit genutzt werden. Um eine doppelte Darstellung der Ergebnisse zu vermeiden, werden an dieser Stelle auch die Ergebnisse der anderen Berechnungsverfahren für gleichverteilte Zugriffshäufigkeiten dargestellt und bewertet.

Abbildung 5.1 zeigt den mittleren Gassenweg bei Schleifenstrategie mit Überspringen in Abhängigkeit von der Anzahl Positionen pro Kommissionierauftrag des Systems 2. In Abbildung 5.2 sind die prozentualen Abweichungen dargestellt. Der Vergleich der Simulationsdaten mit den Berechnungen zeigt sowohl für das neue Berechnungsverfahren als auch für das Verfahren von Hwang sehr gute Übereinstimmung über den gesamten

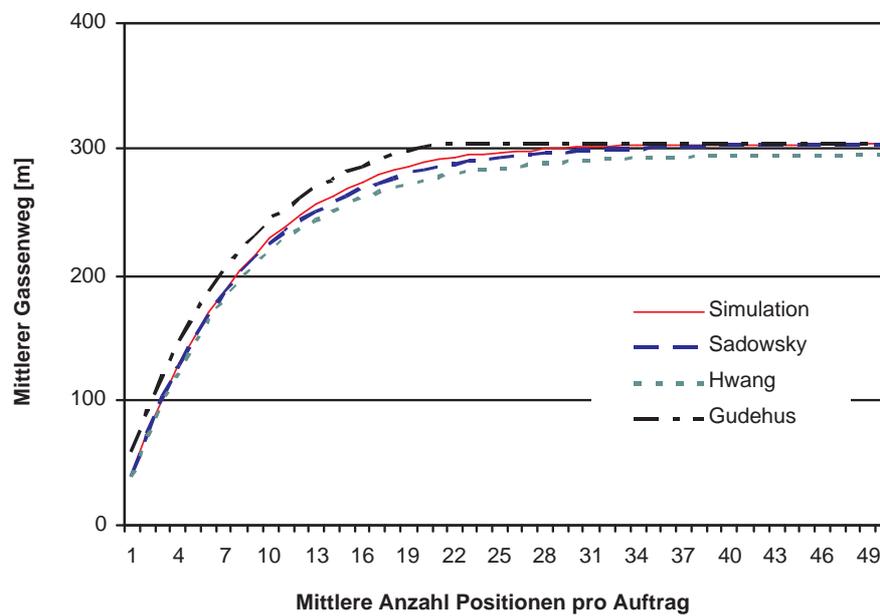


Abbildung 5.1: Gassenweg für System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen

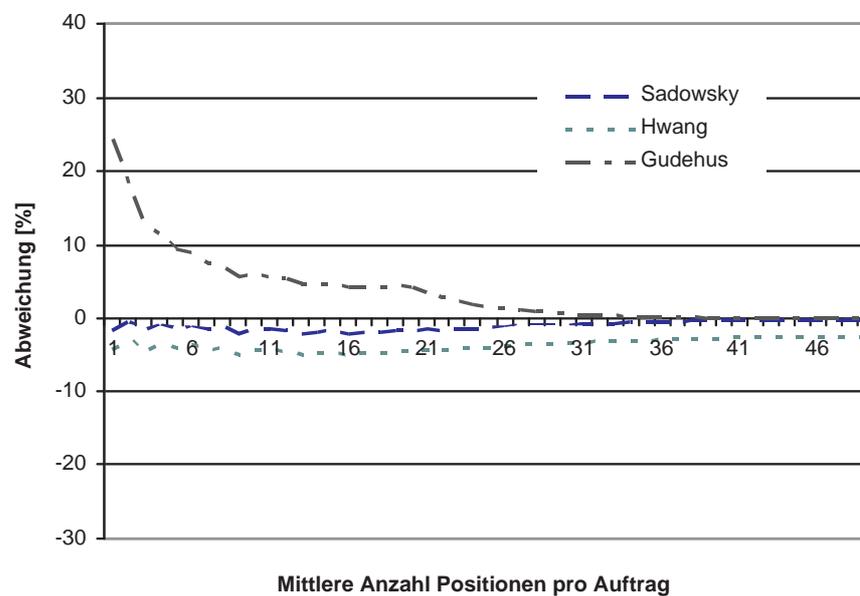


Abbildung 5.2: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen

Bereich.

Die maximale Abweichung des neuen Berechnungsverfahrens tritt mit 2,37% bei 17 Positionen pro Auftrag auf. Werden mehr als 28 Positionen pro Auftrag kommissioniert, sinkt der Fehler unter 1%. Das Berechnungsverfahren von Hwang weist eine Abweichung von maximal 5,09% auf. Im gesamten Bereich der Untersuchung schwankt die Abweichung nur gering. Bei 50 Positionen wird eine Abweichung von 2,71% ermittelt. Gudehus erreicht in dem gültigen Bereich für $n \geq 8$ eine maximale Abweichung von 7,55%. Liegen mehr als 13 Positionen pro Auftrag vor, sinkt die Abweichung auf unter 5%. Befinden sich 50 Positionen auf einem Auftrag, beträgt die Abweichung 0,043%.

Alle Verfahren zeigen, dass die Abweichungen der berechneten Werte mit zunehmender Anzahl der Positionen pro Auftrag sinken. Die neue Berechnungsmethode erzielt bereits bei einer Position pro Auftrag eine Genauigkeit von 98%.

In Abbildung 5.3 und 5.4 sind die Ergebnisse für die Stichgangstrategie ohne Wiederholung dargestellt.

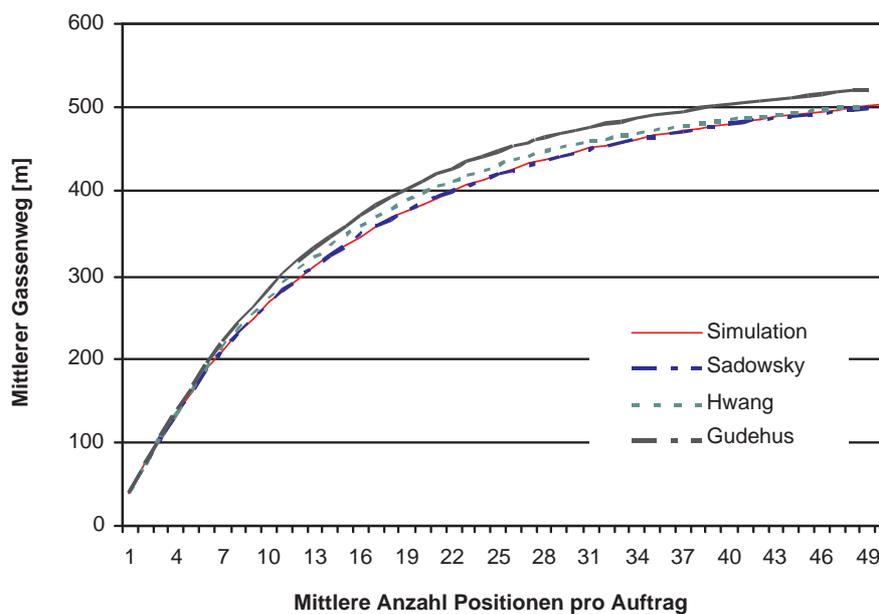


Abbildung 5.3: Gassenweg für System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung

Auch bei der Stichgangstrategie ohne Wiederholung werden von allen drei Verfahren sehr gute Näherungen erzielt. Hwang und Gudehus zeigen maximale Abweichungen von 3,47% bzw. 7,18% bei 20 Positionen pro Auftrag. Mit dem neuen Berechnungsverfahren ergibt sich eine maximale Abweichung von 0,57% bei einer Position pro Auftrag. Auch

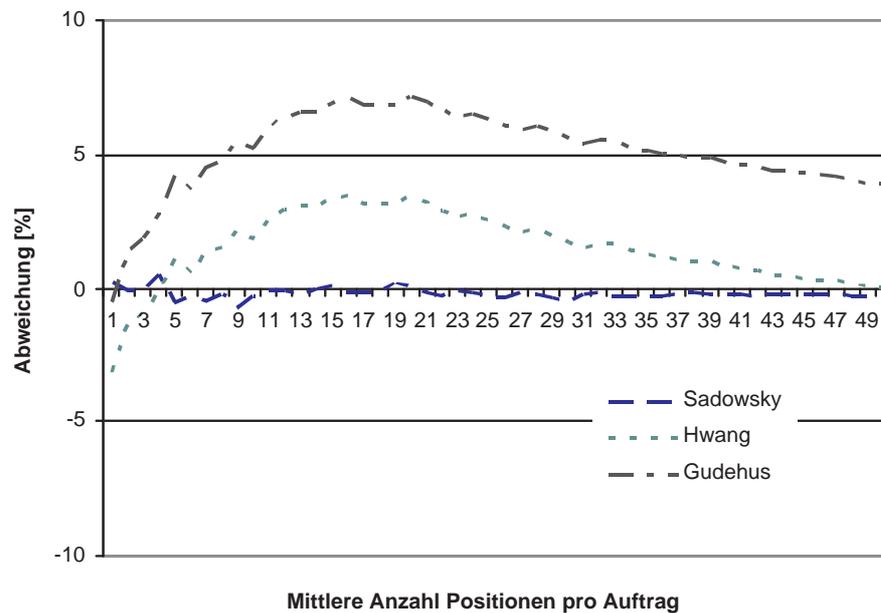


Abbildung 5.4: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung

bei dieser Wegstrategie sinken die Abweichungen für die Berechnungen von Gudehus und Hwang mit zunehmender Anzahl der Positionen pro Auftrag tendenziell ab.

Für die Stichgangstrategie mit Wiederholung werden sowohl von Gudehus als auch durch das neue Berechnungsverfahren nahezu identische Gassenwege ermittelt (Abb. 5.5, 5.6). In der grafischen Darstellung ist daher nur eine Kurve zu erkennen. Hwang liefert für diese Wegstrategie keine Berechnungsvorschrift.

Beim Vergleich mit den Simulationsdaten ergeben sich für beide Berechnungsverfahren maximale Abweichungen von 0,575 % bei einer Position pro Auftrag. Mit zunehmender Anzahl der Positionen pro Auftrag sinkt auch hier die Abweichung tendenziell ab. Im untersuchten Maximalfall von 50 Positionen pro Auftrag liegt die Abweichung bei 0,021 %.

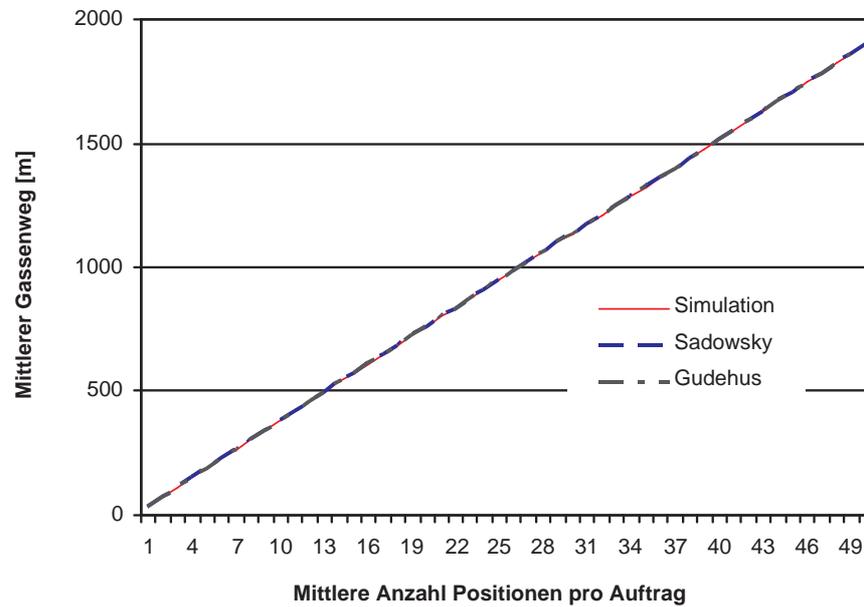


Abbildung 5.5: Gassenweg für System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung

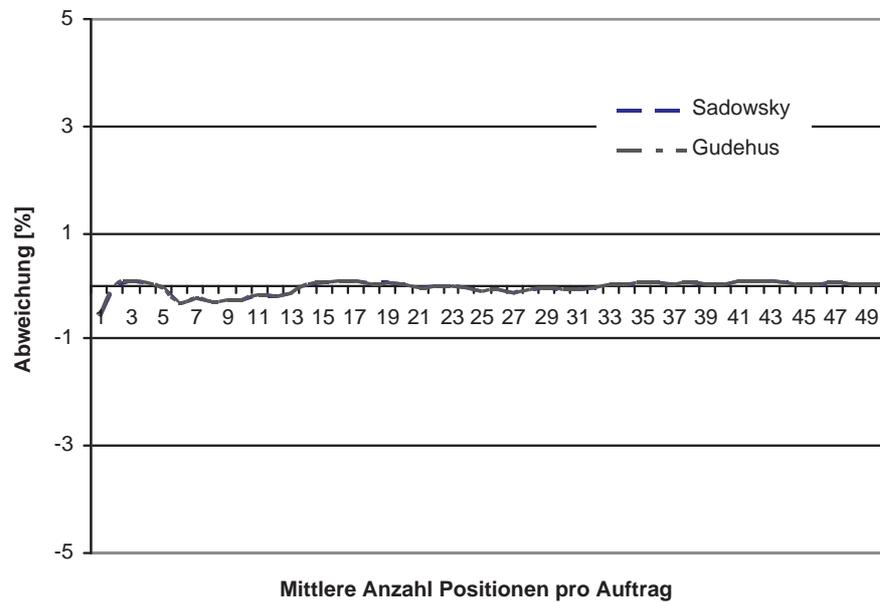


Abbildung 5.6: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung

Im Gegensatz zu den anderen Wegstrategien liegt bei der Mittelpunkt-Heuristik für $n < 5$ beim neuen Berechnungsverfahren eine sehr große Abweichung von den simulativ ermittelten Werten vor (Abb.5.7).

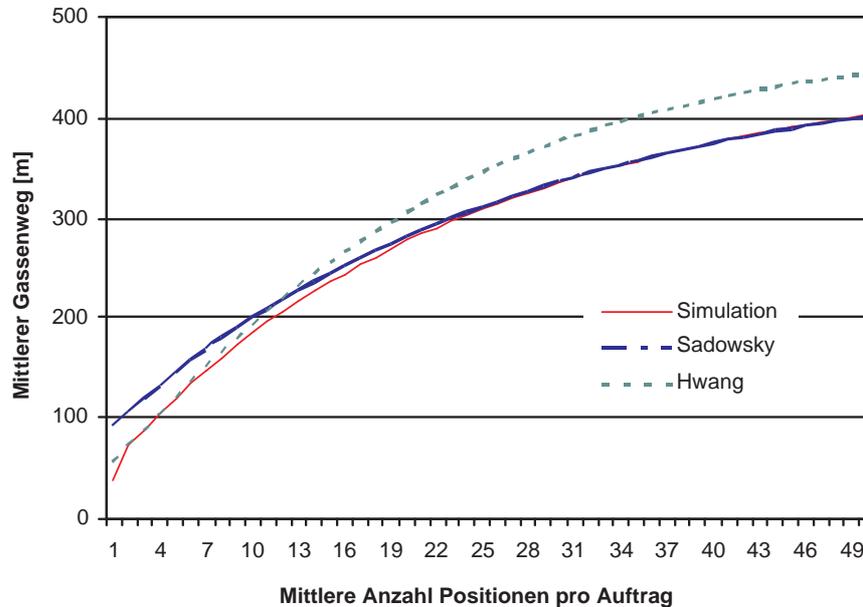


Abbildung 5.7: Gassenweg für System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik

Dies hängt vom konstanten Weganteil (vgl. Formel 4.73) ab, der in dem Berechnungsverfahren enthalten ist. Werden nur sehr wenige Artikel kommissioniert, dann ergibt sich häufig die Situation, dass der Kommissionierer nur von der Frontseite in die Gänge hineinlaufen muss. Damit entfällt der konstante Weganteil, der zum Wechsel von der Frontseite auf die Rückseite der Gasse implementiert worden ist. Wird die Anzahl der Positionen größer, gleicht der reale Laufweg des Kommissionierers immer mehr dem theoretisch angenommenen Verlauf. Die berechneten Wegstrecken weichen somit weniger von der Simulation ab.

Bei der neuen Berechnungsvorschrift erreicht die Abweichung bei fünf Positionen 21,29%. Ab neun Positionen liegt die Abweichung noch bei 9,75%. Ab 23 Positionen pro Auftrag sinkt die Abweichung auf unter 1% ab. Im Maximalfall von 50 Positionen liegt die Abweichung bei 0,36%. Es ist erkennbar, dass sich der Kurvenverlauf mit zunehmender Anzahl Positionen immer mehr dem simulativen Ergebnis annähert. Das zeigt, dass die Abweichungen, die bei geringer Anzahl Positionen pro Auftrag auftreten, auf die oben beschriebenen konstanten Weganteile zurückzuführen sind.

Liegen so viele Positionen pro Auftrag vor, dass die Wegstrecke des Kommissionierers

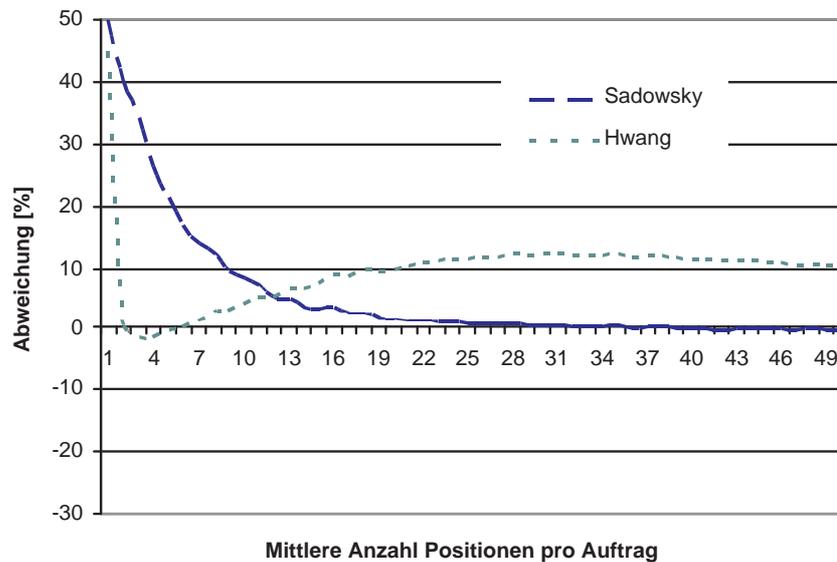


Abbildung 5.8: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik

tatsächlich der Mittelpunkt-Heuristik entspricht, werden mit den Berechnungen gute Ergebnisse erzielt. Da der Einsatz der Mittelpunkt-Heuristik ohnehin erst bei größerer Anzahl Positionen pro Auftrag sinnvoll ist, kann der Fehler, der bei weniger als neun Positionen erreicht wird, vernachlässigt werden.

Vergleicht man die Kurve von Hwang mit dem tatsächlichen Verlauf, so ist zu erkennen, dass bereits bei drei Positionen pro Auftrag der Fehler bis auf -1,67 % absinkt. Anschließend steigt die Abweichung bis auf 11,9 % bei 27 Positionen pro Auftrag an. Steigt die Anzahl Positionen pro Auftrag weiter an, bleibt der Fehler konstant (Abb. 5.8). Dies zeigt, dass das Berechnungsverfahren von Hwang so angelegt ist, dass der Fehler bei den Berechnungen für Aufträge mit wenig Positionen minimiert wird. Dies führt dazu, dass bei steigender Anzahl der Positionen pro Auftrag der berechnete Wert eine nahezu konstante Abweichung vom realen Wert aufweist.

Die Länge des Gassenwechselweges ist unabhängig von der Wegstrategie. Das zeigen auch die Ergebnisse der Simulation, die für jede Wegstrategie identische Ergebnisse bezüglich des Gassenwechselweges liefern.

Die Berücksichtigung der Zugriffshäufigkeit bei der Positionierung der Artikel innerhalb der Gassen ist nur bei den Berechnungen von Hwang relevant. Alle anderen Verfahren berücksichtigen die Verteilung nicht. In den Abbildungen 5.9 und 5.10 sind die mittleren Gassenwechselwege und die prozentuale Abweichung zur Simulation für den Fall der

gleichverteilten Zugriffshäufigkeit innerhalb der Gassen dargelegt.

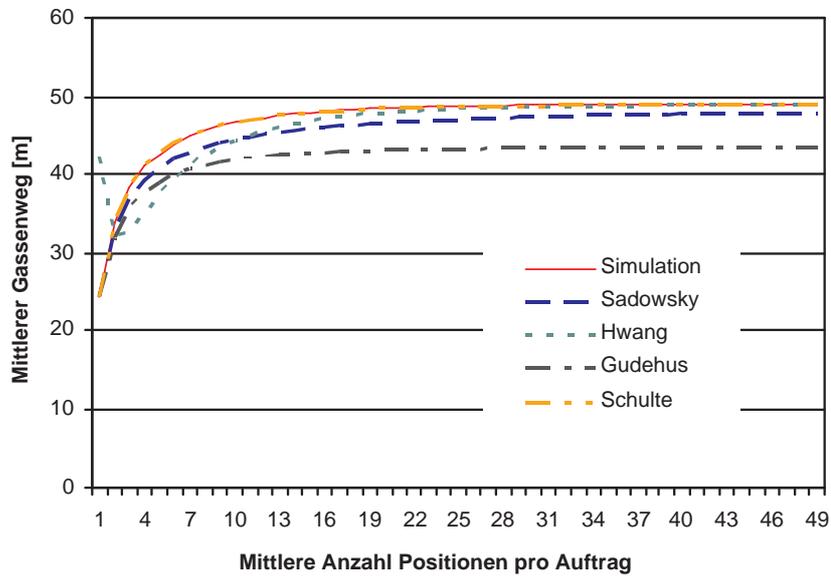


Abbildung 5.9: Gassenwechselweg für System 2, gleichverteilte Zugriffshäufigkeit

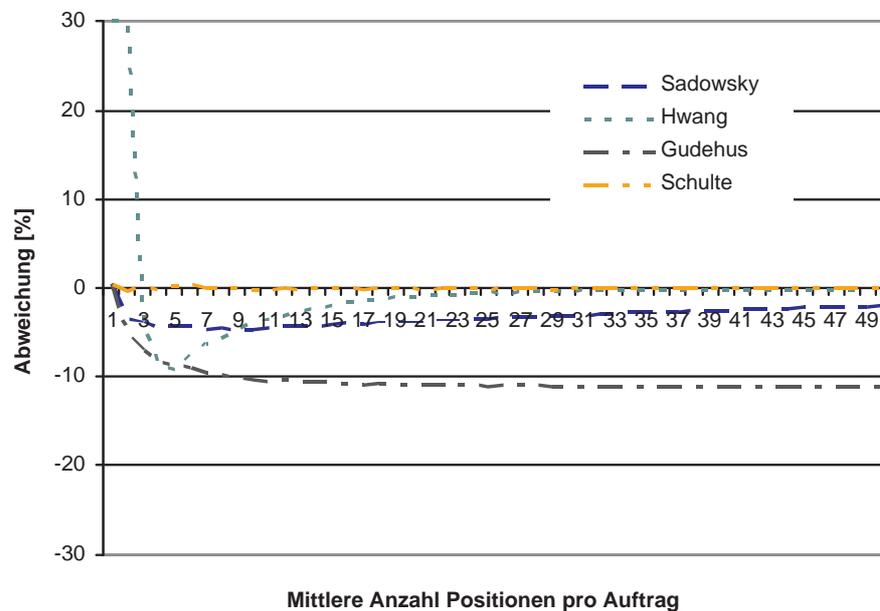


Abbildung 5.10: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwechselweges von der Simulation; System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit

Neben den Ergebnissen von Hwang und dem neuen Berechnungsverfahren sind in diesem Fall die Berechnungsergebnisse von Schulte aufgeführt. Er liefert für den Fall, dass die Zugriffshäufigkeit aller Gassen gleich groß ist, einen vollständigen mathematischen Lösungsansatz [Sch96].

Das neue Berechnungsverfahren liefert in allen Bereichen Werte, die eine Abweichung von 2 bis 5 % aufweisen. Das Verfahren von Hwang liefert für $n = 1$ eine Abweichung von 75 %. Ab drei Positionen pro Auftrag wird eine Abweichung von 10 % unterschritten, die mit zunehmender Anzahl der Positionen weiter absinkt. Bei 20 Positionen pro Auftrag wird eine Abweichung von 1 % unterschritten.

Der Vergleich der Simulation mit den Berechnungen von Schulte zeigt Abweichungen von weniger als einem Prozent. Steigt die Positionenanzahl pro Auftrag auf fünf an, sinkt die Abweichung auf unter 0,2 %.

Wird die Zugriffshäufigkeit durch eine Exponentialverteilung beschrieben, ergeben sich nur bei Hwang unterschiedliche Werte bezüglich des Gassenwechselweges. Für alle anderen Berechnungsverfahren sind die Werte konstant. Die Abbildungen 5.11 und 5.12 zeigen die entsprechenden Werte für die Exponentialverteilung.

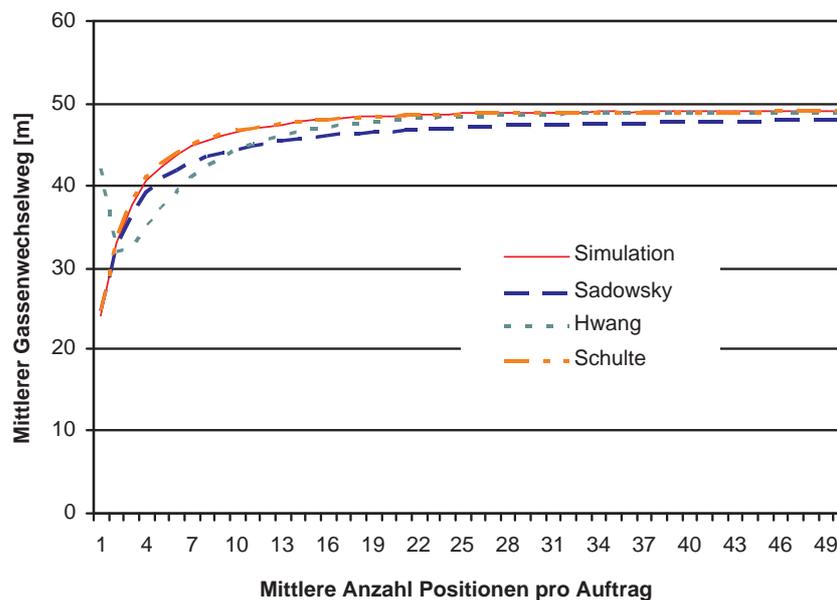


Abbildung 5.11: Gassenwechselweg für System 2, exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit

Die durchgeführte Untersuchung zeigt, dass die Ergebnisse bezüglich der Gassenwege, die mit dem Simulationsmodell erzielt werden, gut mit den berechneten Werten übereinstimmen. Insbesondere für den Fall, dass die Anzahl der Positionen einen Wert von 10 überschreitet, nähern sich die Ergebnisse immer stärker an.

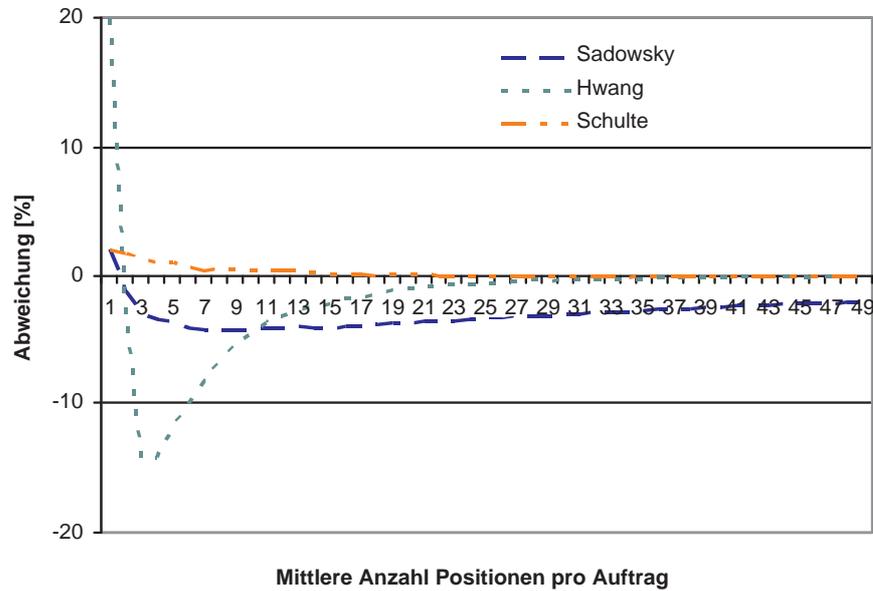


Abbildung 5.12: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwechselweges von der Simulation; System 2; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit

Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Anteil des Fehlers, der durch die stetige Darstellung des diskreten Problems entsteht, mit zunehmender Gesamtwegstrecke geringer wird. Bei der Mittelpunkt-Heuristik kommt hinzu, dass der Anteil der Aufträge, bei denen der Kommissionierer den Laufweg der vorgegebenen Wegstrategie abläuft immer höher wird.

Betrachtet man diese Ergebnisse in Verbindung mit den Übereinstimmungen beim Gassenwechselweg, die beim Vergleich mit dem Verfahren von Schulte nahezu 100 % betragen, kann das Simulationsmodell als valide bezüglich des Gassenweges und des Gassenwechselweges bezeichnet werden.

Zur weiteren Prüfung der Validität des Simulationsmodells wurden für das System zwei Simulationsläufe mit unterschiedlichen Randomstreams durchgeführt. Die Anzahl Positionen pro Auftrag wurde dabei auf $n = 10$ festgelegt. Die Ergebnisse sind im Anhang (Abb. 9.1) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen Abweichungen von maximal 0,16%.

Insgesamt kann das Simulationsmodell aufgrund der erzielten Übereinstimmungen als valide bezeichnet werden und wird im Rahmen dieser Arbeit als Referenz für die Untersuchungen der exponentialverteilten Zugriffshäufigkeiten gesetzt.

5.1.2 Exponentialverteilung

Wird bei der Einlagerung die Zugriffshäufigkeit der Artikel berücksichtigt, entspricht die Zugriffshäufigkeitsverteilung über die Entfernung vom Gassenanfang der Verteilungsfunktion, die die Zugriffshäufigkeit über alle Artikel beschreibt. Der Erwartungswert $E(X)$ für die normierte Exponentialverteilung wurde im Rahmen der Validierung mit 0,1244 angenommen. Das entspricht dem Fall, dass 20 % der Artikel 80 % der Zugriffe verursachen. Bei Anwendung der Schleifenstrategie mit Überspringen ergeben sich für System 2 die in Abbildung 5.13 angegebenen absoluten Werte für die Gassenwege. Die Abweichungen zu den Ergebnissen der Simulation werden in Abb. 5.14 dargestellt.

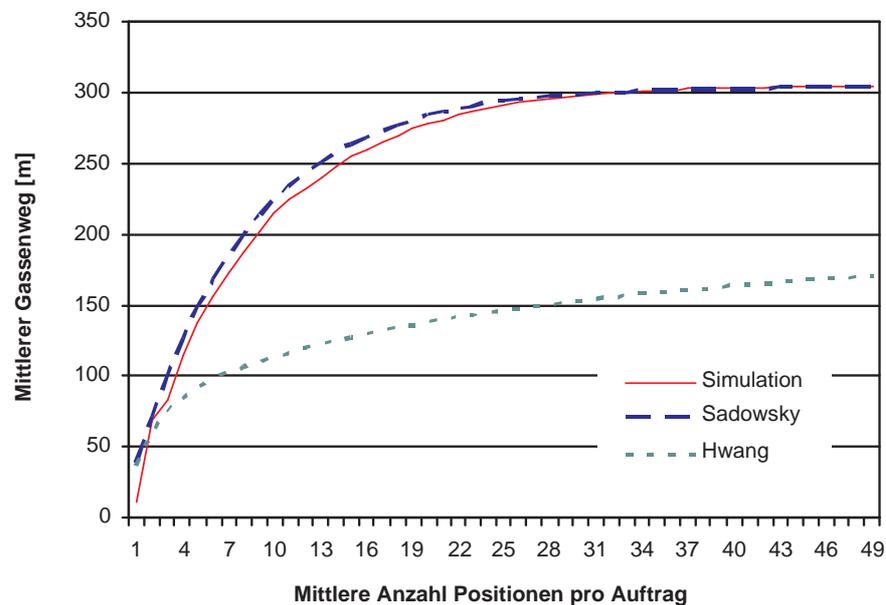


Abbildung 5.13: Gassenweg für System 2; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen

Beide Berechnungsverfahren liefern für $n = 1$ sehr große Abweichungen von den Simulationsdaten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Kommissionierer bei der Bearbeitung einer Position pro Auftrag nicht den Wegverlauf einer Schleifenstrategie aufweist. Der Kommissionierer betritt eine Gasse, pickt die entsprechende Position und beendet gleichzeitig den Auftrag und kehrt zum Anfang der Gasse zurück. Das bedeutet, dass der reale Laufweg des Kommissionierers dem Laufweg der Stichgangstrategie gleicht. Ein Vergleich der Gassenwege bei der Schleifenstrategie und der Stichgangstrategie für $n = 1$, die in der Simulation ermittelt werden, bestätigt diese Aussage.

Beinhaltet der Auftrag zwei Positionen, ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die beiden Artikel in unterschiedlichen Gassen befinden, sehr groß. Daher werden in den meisten

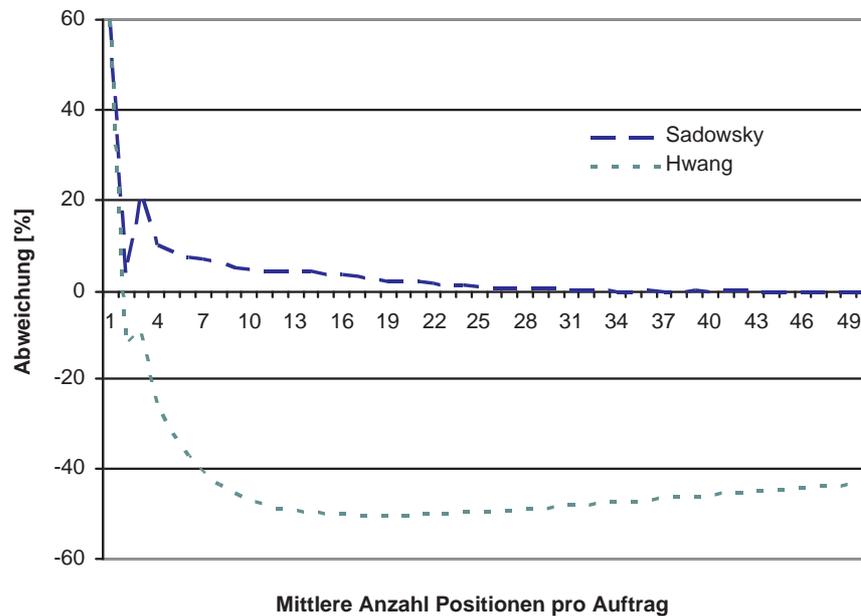


Abbildung 5.14: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen

Fällen zwei Gassen durchlaufen. Die Ergebnisse des neuen Berechnungsverfahrens weichen daher nur um 3,73 % von den Simulationsergebnissen ab. Bei drei Positionen in einem Auftrag entsteht ein ähnlicher Effekt wie bei einer Position pro Auftrag. Der Fehler wirkt sich in diesem Fall geringer aus, da die ersten beiden Artikel nach der Schleifenstrategie gepickt werden und nur beim dritten Artikel der Laufweg wieder der Stichgangstrategie entspricht. Der Fehler beträgt aber immer noch 21,73 %. Je größer die Anzahl Positionen pro Auftrag ist, desto geringer wird der Fehleranteil, da die gesamte Wegstrecke größer wird. Bei fünf Positionen sinkt die Abweichung auf 10 % ab. Ab zehn Positionen pro Auftrag wird die Fünf-Prozent-Marke unterschritten. Liegen mehr als 25 Positionen pro Auftrag vor, sinkt die Abweichung unter 1 %.

Die Berechnungen von Hwang zeigen zunächst einen ähnlichen Verlauf. Allerdings steigt der Fehler bei mehr als drei Positionen pro Auftrag immer weiter in den negativen Bereich. Bei neun Positionen pro Auftrag wird ein Fehler von -45 % erreicht. Diese Abweichung bleibt auch bei größerer Positionenanzahl auf gleichem Niveau. Es ist daher zu vermuten, dass bei der Berechnungsformel ein Faktor 2 unberücksichtigt bleibt.

Für die Stichgangstrategie ohne Wiederholung erzielen beide Berechnungsverfahren sehr gute Übereinstimmungen mit den Simulationsergebnissen (Abb. 5.15). Beide Verfahren weisen eine maximale Abweichung von 1,5 % (neues Verfahren) bzw. 8 % (Hwang) zur Simulation auf (Abb. 5.15). Werden mehr als fünf Positionen pro Auftrag bearbeitet,

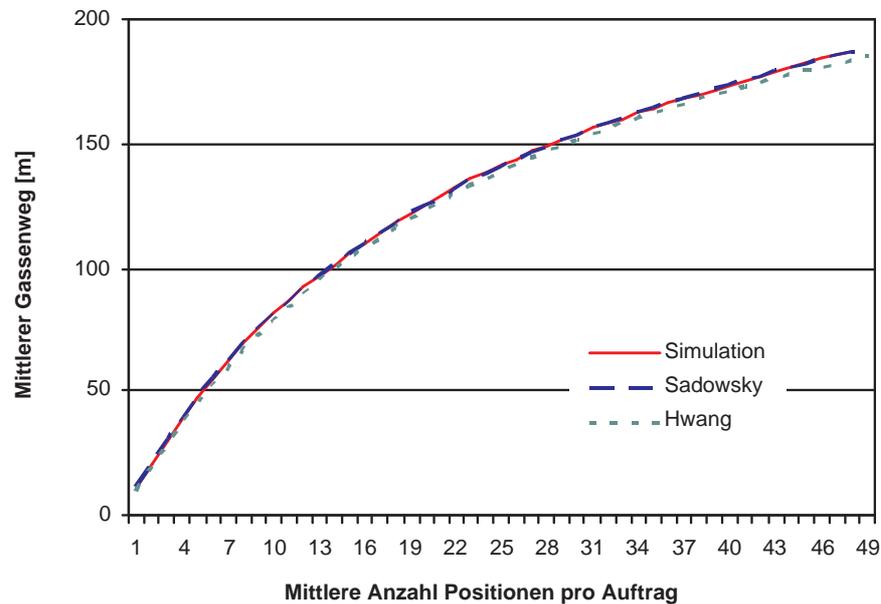


Abbildung 5.15: Gassenweg für System 2; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung

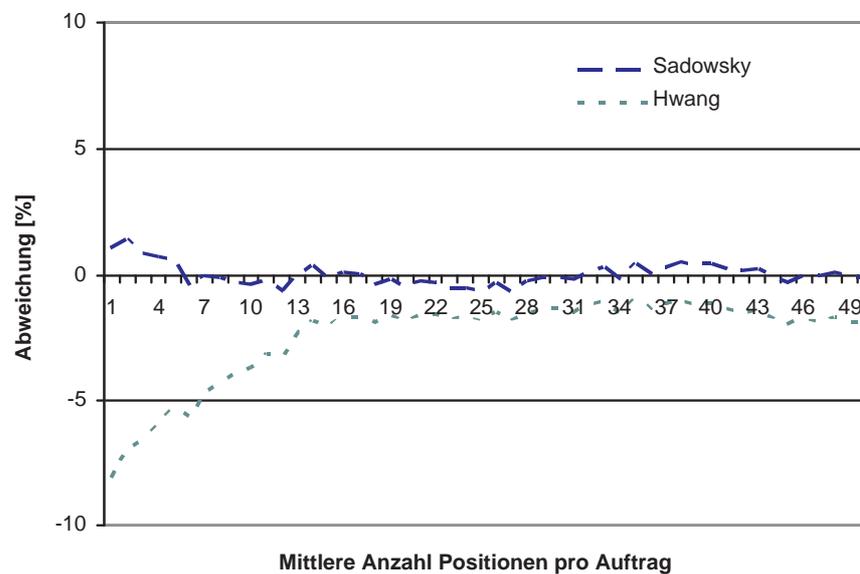


Abbildung 5.16: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung

sinkt der Fehler beim neuen Berechnungsverfahren auf unter 0,5 %. Das Verfahren von

Hwang unterschreitet ab fünf Positionen pro Auftrag die Fünf-Prozent-Marke.

Für die Stichgangstrategie mit Wiederholung wird von Hwang keine Berechnungsformel angegeben. Das neue Berechnungsverfahren weist auch bei dieser Strategie eine maximale Abweichung von 1,3 % bei zwei Position auf. Ab vier Positionen pro Auftrag sinkt die Abweichung auf unter 1 % (Abb. 5.18).

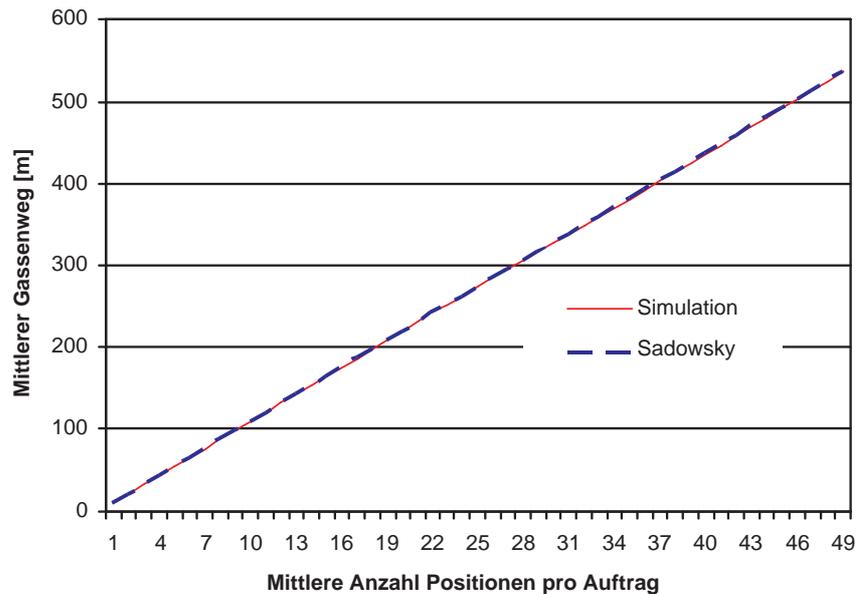


Abbildung 5.17: Gassenweg für System 2; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung

Abbildung 5.19 zeigt die berechneten Gassenwege bzw. die simulativ ermittelten Werte für die Mittelpunkt-Heuristik. Die entsprechenden Abweichungen sind in Abbildung 5.20 dargestellt.

Der Gassenweg, der bei der Mittelpunkt-Heuristik nach dem neuen Berechnungsverfahren ermittelt wird, weicht bei geringer Anzahl Positionen aufgrund des konstanten Weganteils zunächst sehr stark nach oben ab (vgl. Gleichverteilung). Ab vier Positionen sinkt die Abweichung auf unter 10 %. Werden mehr als zehn Positionen pro Auftrag kommissioniert, sinkt die Abweichung unter 5 %.

Der Kurvenverlauf für das Berechnungsverfahren von Hwang ist für kleine Positionenzahlen sehr ähnlich. Die Abweichung fällt bei zwei Positionen pro Auftrag zunächst auf $-2,47\%$ ab. Anschließend steigt die Abweichung mit zunehmender Positionenzahl pro Auftrag tendenziell bis auf 11 % an. Es zeigt sich das gleiche Verhalten wie bei der Gleichverteilung.

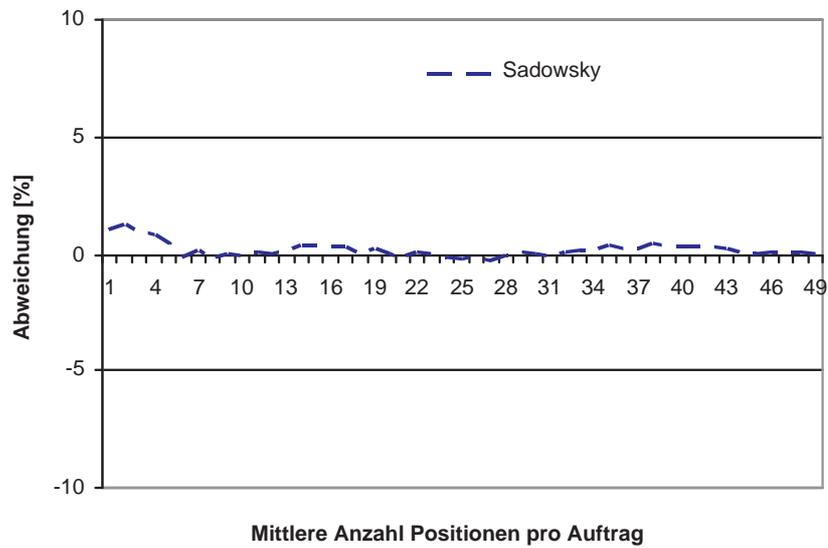


Abbildung 5.18: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung

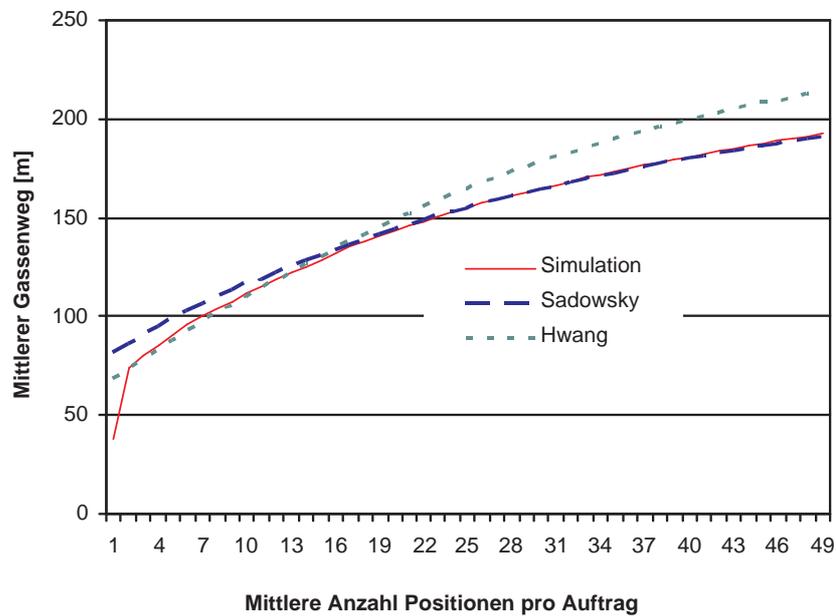


Abbildung 5.19: Gassenweg für System 2; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik

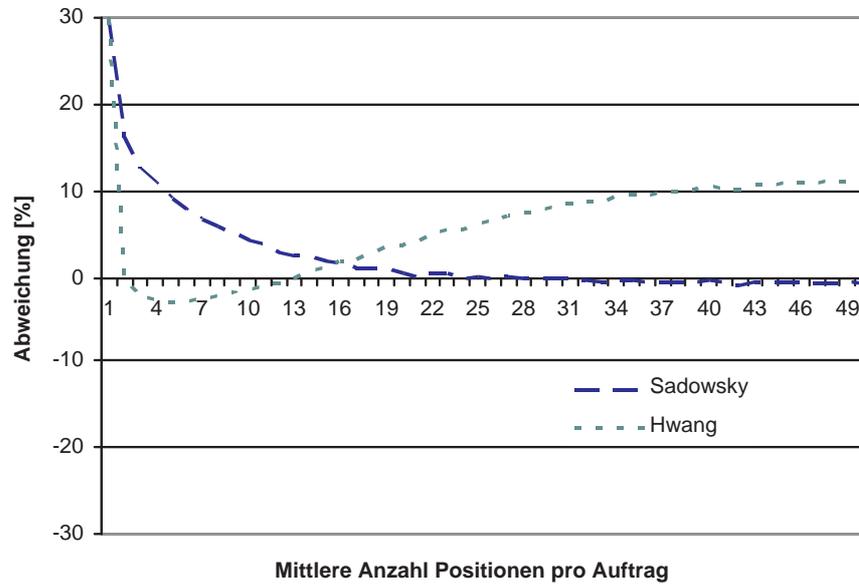


Abbildung 5.20: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass das neue Berechnungsverfahren für alle Wegstrategien und auch für den Gassenwechselweg sehr gute Ergebnisse liefert (vgl. Tabelle 5.2). Die Qualität der Ergebnisse ist dabei nicht von der Art der Verteilungsfunktion abhängig, mit der die Zugriffshäufigkeiten erzielt werden. Die Abweichungen liegen je nach Strategie und Anzahl Positionen pro Auftrag zwischen 1-5 %.

Die wesentlichen Ergebnisse für die Systeme 1,2 und 3 sind den Tabellen 5.2, 5.3 und 5.4 dargestellt.

	10 %	5 %	1 %		10 %	5 %	1 %
GW-SchMÜ	1	-	-	GW-SchMÜ	6	-	-
GW-StOW	-	-	1	GW-StOW	-	1	2
GW-StMW	-	-	1	GW-StMW	-	1	2
GW-MH	8	10	16	GW-MH	4	7	12
GWW	-	1	-	GWW	-	1	-

Tabelle 5.2: Anzahl Positionen pro Auftrag n , bei der die angegebene Abweichung unterschritten wird; System 1, links: Gleichverteilung, rechts: Exponentialverteilung

	10 %	5 %	1 %		10 %	5 %	1 %
GW-SchMÜ	-	1	28	GW-SchMÜ	5	10	25
GW-StOW	-	-	1	GW-StOW	-	1	3
GW-StMW	-	-	1	GW-StMW	-	1	4
GW-MH	9	14	23	GW-MH	5	10	-
GWW	-	1	-	GWW	-	1	-

Tabelle 5.3: Anzahl Positionen pro Auftrag n , bei der die angegebene Abweichung unterschritten wird; System 2, links: Gleichverteilung, rechts: Exponentialverteilung

	10 %	5 %	1 %		10 %	5 %	1 %
GW-SchMÜ	-	1	-	GW-SchMÜ	4	12	34
GW-StOW	-	-	1	GW-StOW	2	4	36
GW-StMW	-	-	1	GW-StMW	2	4	16
GW-MH	10	15	29	GW-MH	5	12	32
GWW	-	1	-	GWW	-	1	-

Tabelle 5.4: Anzahl Positionen pro Auftrag n , bei der die angegebene Abweichung unterschritten wird; System 3, links: Gleichverteilung, rechts: Exponentialverteilung

5.2 Approximation durch Exponentialverteilungen

Bei der Planung von Kommissioniersystemen müssen möglichst einfache Berechnungsmethoden vorliegen, um die unterschiedlichsten Grobplanungsvarianten schnell und unkompliziert miteinander vergleichen zu können. Für das neu entwickelte Berechnungsverfahren vereinfachen sich die Formeln maßgeblich, wenn für die Zugriffshäufigkeitsverteilung der Artikel eine Gleichverteilung oder eine Exponentialverteilung angenommen wird. In vielen Fällen kann die empirische Zugriffshäufigkeit nur sehr grob durch eine Gleichverteilung bzw. eine Exponentialverteilung approximiert werden. Inwieweit die Genauigkeit der berechneten Werte durch eine genauere Approximation der empirischen Häufigkeitsverteilung verbessert werden kann, wird im Folgenden untersucht.

Dazu werden reale Auftragsdaten von zwei unterschiedlichen Kommissioniersystemen in das Simulationsmodell eingelastet und die mittleren Gassenwege für die verschiedenen Wegstrategien und der Gassenwechselweg für diese Systemlast bestimmt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Zugriffshäufigkeit eines Artikels bei der Einlagerung berücksichtigt wird.

Im zweiten Schritt wird der Erwartungswert $E(X)$ der empirischen Zugriffshäufigkeitsverteilung durch eine Auftragsdatenanalyse bestimmt. Diese Größe dient als Skalierungsparameter der Exponentialverteilung. Es gilt $E(X) = 1/\lambda$. Zudem wird die Zugriffshäufigkeit auf die Artikel durch eine stetige Verteilungsfunktion approximiert, die

den höchsten Überdeckungsgrad mit der empirischen Verteilungsfunktion liefert. Zur Ermittlung dieser Verteilungsfunktion und deren Parameter wird das Softwaretool Expert-Fit eingesetzt, das die Güte der Abbildung von 32 Verteilungsfunktionen ermittelt und die Genauigkeit auf Basis verschiedener Heuristiken bestimmt [Law03, Law91]. Die Verteilungsfunktion mit der höchsten Abbildungsgenauigkeit erhält eine relative Punktzahl von 100 %. Alle anderen Verteilungsfunktionen erhalten ebenfalls eine relative Punktzahl, die sich auf die 100 % der besten Funktion bezieht. Für die beiden untersuchten Verteilungsfunktionen ergibt sich die Weibullverteilung als beste Verteilungsfunktion. Im Rahmen der Datenanalyse wird zudem die mittlere Anzahl Positionen pro Kommissionierauftrag ermittelt, die als Eingangsgröße für die Berechnungen der Gassenwege und Gassenwechselwege erforderlich ist.

Mit der ermittelten Exponentialverteilung bzw. Weibullverteilung und der mittleren Anzahl Positionen pro Auftrag werden abschließend die Gassenwege und der Gassenwechselweg berechnet und das Verbesserungspotenzial durch die Weibullverteilung bestimmt.

5.2.1 Realdaten 1

Bei dem ersten System handelt es sich um ein Kommissionierlager mit fünf Gassen, in dem die Ware auf bodengelagerten Paletten bereitgestellt werden. Insgesamt besteht das Sortiment aus 375 Artikeln. Jeder Artikel belegt genau einen Palettenplatz im Lager, der eine Breite von 1,2 m aufweist.

Die Datenbasis besteht aus 27.986 Kommissionieraufträgen, die über einen Zeitraum von fünf Monaten aufgezeichnet wurden. Der Zeitraum erstreckt sich vom 02.01.2006 bis zum 31.05.2006. Der berechnete Erwartungswert $E(X)$ der Zugriffshäufigkeit liegt bei 49,91. Damit kann die Zugriffshäufigkeit über den Rang eines Artikels durch eine Exponentialverteilung mit $\lambda = \frac{1}{E(X)} = \frac{1}{49,91} = 0,02$ beschrieben werden. Der Vergleich der empirischen Häufigkeitsverteilung und der Exponentialverteilung mit $\lambda = 0,02$ sowie einer angepassten Weibullverteilung mit $\alpha = 0,7331$, $\beta = 37,57$ und $\gamma = 0$ ist in Abbildung 5.21 dargestellt. Die absoluten Abweichungen der Weibullverteilung und der Exponentialverteilung zu den empirischen Werten zeigt Abbildung 5.22.

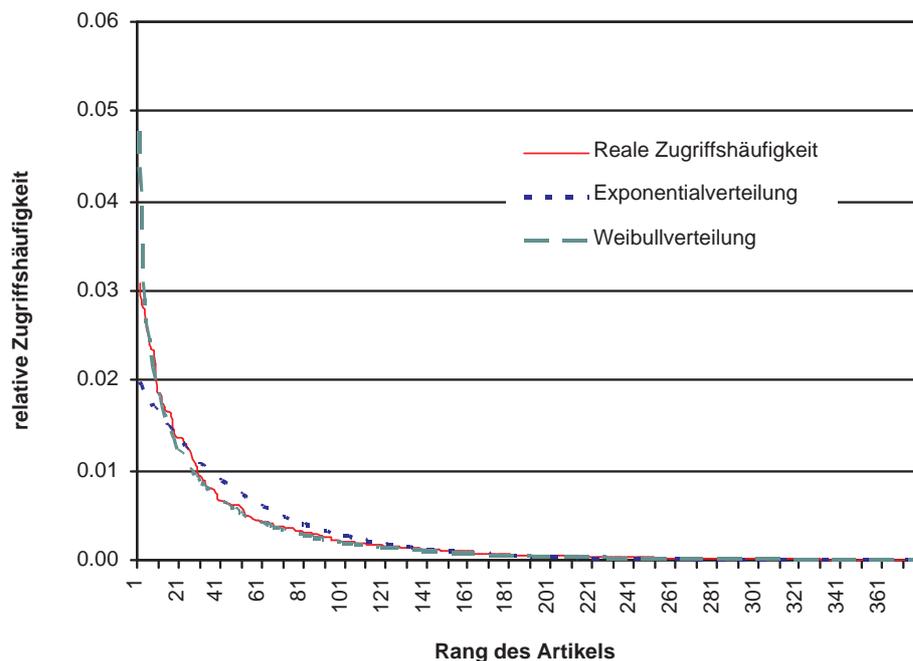


Abbildung 5.21: Empirische Zugriffshäufigkeitsverteilung der Artikel im Vergleich zu den theoretischen Verteilungen

Die mittlere Anzahl Positionen pro Kommissionierauftrag beträgt $n = 3,065$ mit einer Standardabweichung von 3,4577. Die Auftragsstruktur ist detailliert in Abbildung 5.23 zu erkennen. Es fällt auf, dass der Anteil der Aufträge die nur eine Position aufweisen,

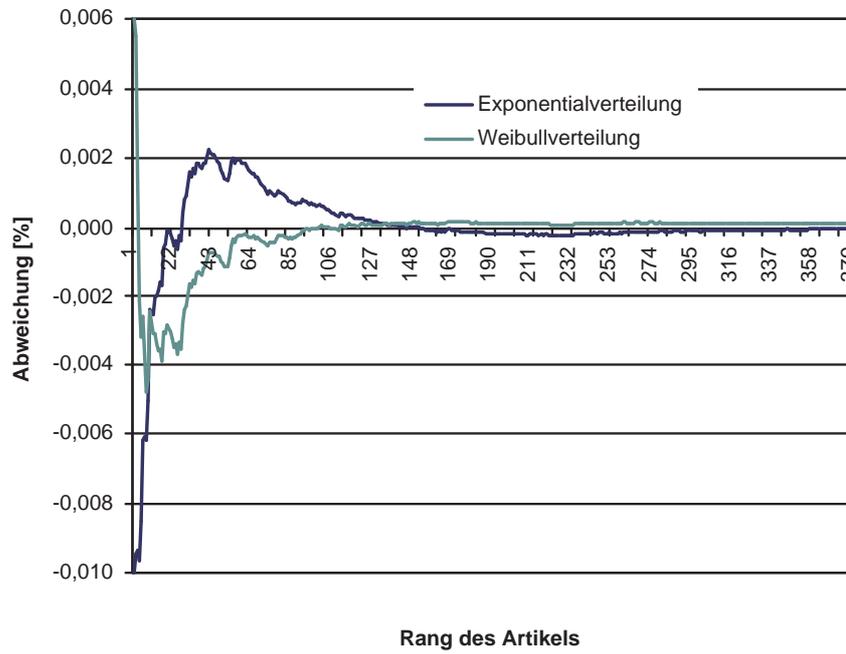


Abbildung 5.22: Abweichung der theoretischen Verteilungsfunktionen von der empirischen Zugriffshäufigkeitsverteilung der Artikel

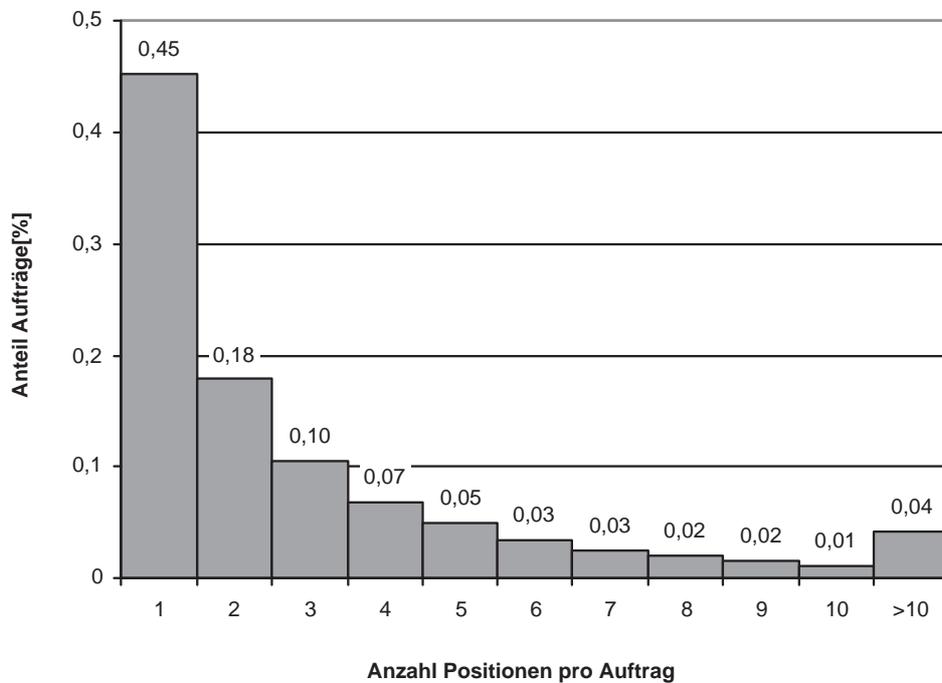


Abbildung 5.23: Empirische Häufigkeitsverteilung der Auftragsgrößen, Realdaten 1

mit 45 % sehr hoch ist. Dies ist insofern von Bedeutung, als sich bei der Bearbeitung eines Auftrags mit einer Position automatisch der Laufweg der Stichgangstrategie ergibt (vgl. Kapitel 5.1). Dies muss bei der Ermittlung des Gassenweges berücksichtigt werden. In Abbildung 5.24 sind die Wegstrecken, die in der Simulation ermittelt wurden und die Berechnungsergebnisse für die Exponentialverteilung und die Weibullverteilung dargestellt. Abbildung 5.25 zeigt die prozentuale Abweichung der Berechnungen zur Simulation.

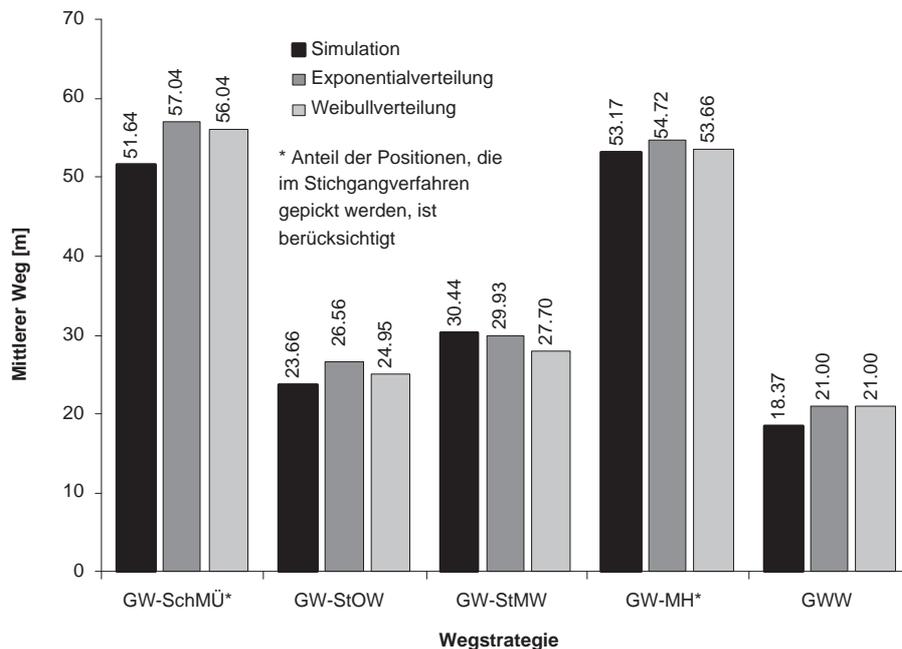


Abbildung 5.24: Vergleich der Simulationsergebnisse und der berechneten Werte für Realdaten.

Für die Stichgangstrategie ohne Wiederholung ergibt sich bei Annahme der Exponentialverteilung eine Abweichung von 12,23 % zur Simulation. Berechnet man den Gassenweg mit der Weibullverteilung, sinkt die Abweichung bis auf 5,42 % ab. Die Berechnungen für die Stichgangstrategie mit Wiederholung weisen für die Exponentialverteilung eine Abweichung von 1,68 % auf. Wird die Weibullverteilung zugrundegelegt, steigt die Abweichung auf 8,99 % an.

Dieser Effekt ist dadurch zu erklären, dass die Zugriffshäufigkeitsverteilung der Artikel direkt auf die Gassen übertragen wird. Real unterscheiden sich die Verteilungsfunktionen in den Gassen geringfügig. Wie stark die Funktionen von Gasse zu Gasse differieren, hängt vom Verhältnis der Sortimentsgröße und der Anzahl Gassen ab sowie vom Gradienten der Verteilungsfunktion, die die Zugriffshäufigkeit der Artikel beschreibt. Für

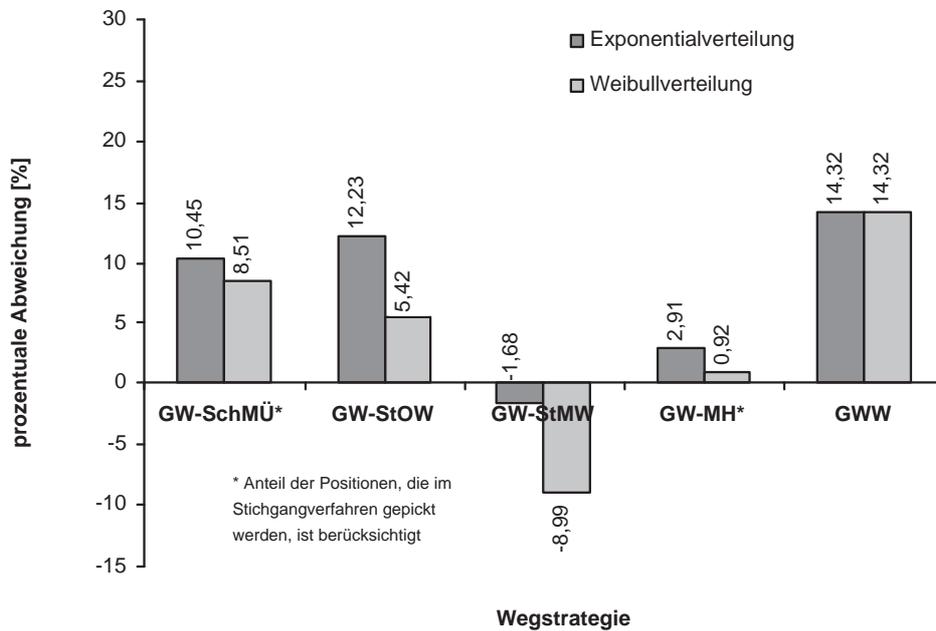


Abbildung 5.25: Abweichung der Berechnungsergebnisse von der Simulation.

den Einzelfall lassen sich die Funktionen für jede Gasse bestimmen, anschließend lässt sich eine Ausgleichsfunktion bilden. Die angepasste Exponentialverteilung weist im vorliegenden Beispiel im linken Bereich ein geringeres Gefälle auf als die reale Funktion (vgl. Abbildung 5.21). Damit nähert sie sich im vorliegenden Fall dem mittleren Verlauf innerhalb der Gassen besser an als die Weibullverteilung. Die Exponentialverteilung gleicht in diesem Fall den Fehler, der bei der Übertragung der Verteilungsfunktion auf die Gasse gemacht wird, aus.

Für die Schleifenstrategie mit Überspringen muss berücksichtigt werden, dass 45 % der Aufträge nur eine Position enthalten. Da der Kommissionierer bei der Bearbeitung dieser Aufträge den gleichen Laufweg hat wie bei der Stichgangstrategie ohne Wiederholung, muss dies bei der Berechnung berücksichtigt werden. Dies wird erreicht, wenn der berechnete mittlere Gassenweg für Stichgangstrategie mit Wiederholung $s_{GW,StMW}$ zu 45 % in die Berechnung einfließt und der mittlere Gassenweg für Schleifenstrategie $s_{GW,SchMU}$ mit 55 %. Es gilt

$$s_{GW,SchMU}^* = 0,45 \cdot s_{GW,StMW} + 0,55 \cdot s_{GW,SchMU} \quad (5.1)$$

Unter Berücksichtigung dieser Annahme ergibt sich für die Schleifenstrategie mit Überspringen eine Abweichung von 10,45 %. Für die Weibullverteilung sinkt die Abweichung auf 8,51 %.

Auch bei der Mittelpunkt-Heuristik muss der Anteil der Aufträge mit einer Position in der gleichen Weise berücksichtigt werden wie bei der Schleifenstrategie. Unter dieser Berücksichtigung erhält man bei dieser Wegstrategie eine Abweichung von 2,91 % unter Annahme der Exponentialverteilung und von 0,92 % für die Weibullverteilung.

Der Gassenwechselweg ist unabhängig von der Verteilungsfunktion der Zugriffshäufigkeit und ergibt sich entsprechend für beide Verteilungsfunktionen zu 14,34 %. Diese Abweichung ist ausschließlich auf die stetige Abbildung des diskreten Systems zurückzuführen.

5.2.2 Realdaten 2

Das zweite System ist ein Kommissionierlager, in dem die Bereitstellung in Behältern der Größe 600 mm x 400 mm erfolgt. Die Behälter sind längs eingelagert, sodass die Fachbreite 400 mm beträgt. Das Sortiment von 234 Artikeln ist auf drei Gassen verteilt.

Die Datenbasis besteht aus 18.569 Kommissionieraufträgen bzw. 43.590 Auftragspositionen. Die Datenaufnahme erfolgte vom 02.01.2006 bis zum 31.05.2006. Der berechnete relative Erwartungswert zur Abbildung der Zugriffshäufigkeit beträgt 21,36 %. Der Parameter λ ergibt sich entsprechend zu 4,6816. Werden die Daten durch eine Weibullverteilung approximiert, ergibt sich für $\alpha = 0,8844$, für $\beta = 55,44$ und für den Lageparameter der Wert $\gamma = 0$. Die Funktionsverläufe der empirischen Häufigkeitsverteilung sowie der Exponentialverteilung und der Weibullverteilung sind in Abbildung 5.26 dargestellt. Die absoluten Abweichungen der Weibullverteilung und der Exponentialverteilung zu den empirischen Werten zeigt Abbildung 5.27. Die mittlere Anzahl Positionen n beträgt $n = 2,347$ mit einer Standardabweichung von 2,32. Die detaillierte Auftragsstruktur ist in Abbildung 5.28 dargestellt. Es zeigt sich auch bei diesen Auftragsdaten ein sehr hoher Anteil von Aufträgen, die nur eine Position betragen. Insgesamt beträgt der Anteil 51 %.

In Abbildung 5.29 sind die Ergebnisse des Gassenweges für die verschiedenen Wegstrategien und der Gassenwechselweg dargestellt. Abbildung 5.30 zeigt die prozentualen Abweichungen der Exponentialverteilung und der Weibullverteilung zu den simulativ ermittelten Werten.

Bei den mit ** gekennzeichneten Werten wurde der 51 % ige Anteil von Kommissionieraufträgen mit einer Position nach dem oben dargestellten Verfahren (vgl. s_{GW}^*) berücksichtigt. Da die mittlere Positionenanzahl n in den Berechnungsformeln eine natürliche Zahl sein muss, im vorliegenden Fall aber $n = 2,35$ ist, wurden die Berechnungen sowohl für den Fall $n=2$ und $n=3$ durchgeführt. Die Ergebnisse für $n = 2$ und $n = 3$ wurden

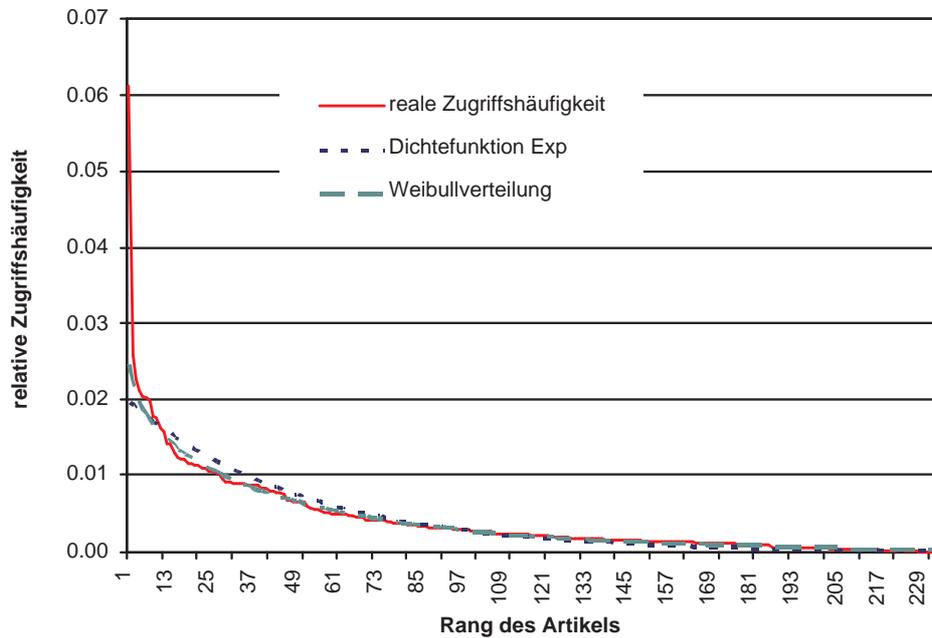


Abbildung 5.26: Empirische Zugriffshäufigkeitsverteilung der Artikel im Vergleich mit einer theoretischen Exponentialverteilung

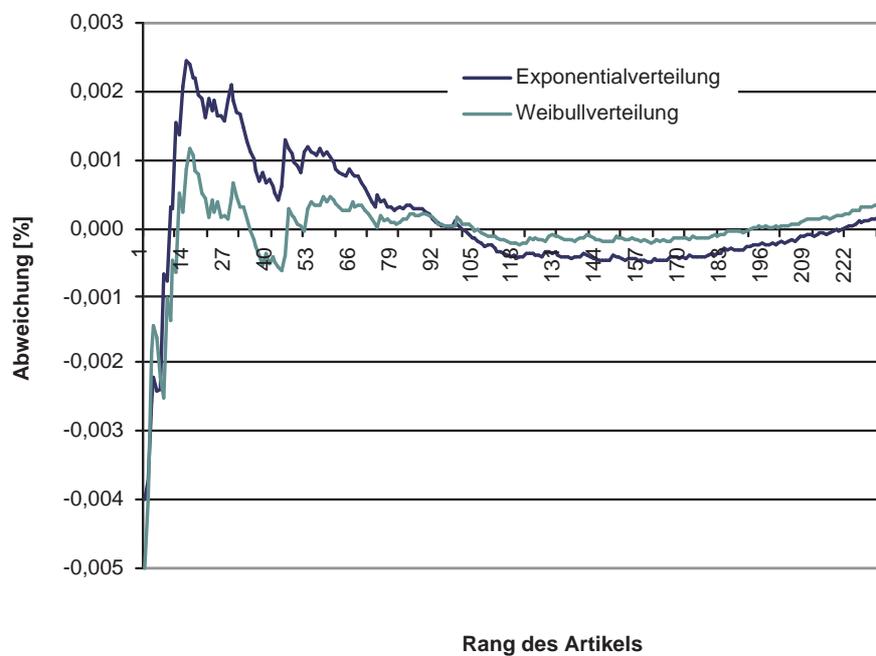


Abbildung 5.27: Abweichung der Dichtefunktionen von den realen Werten

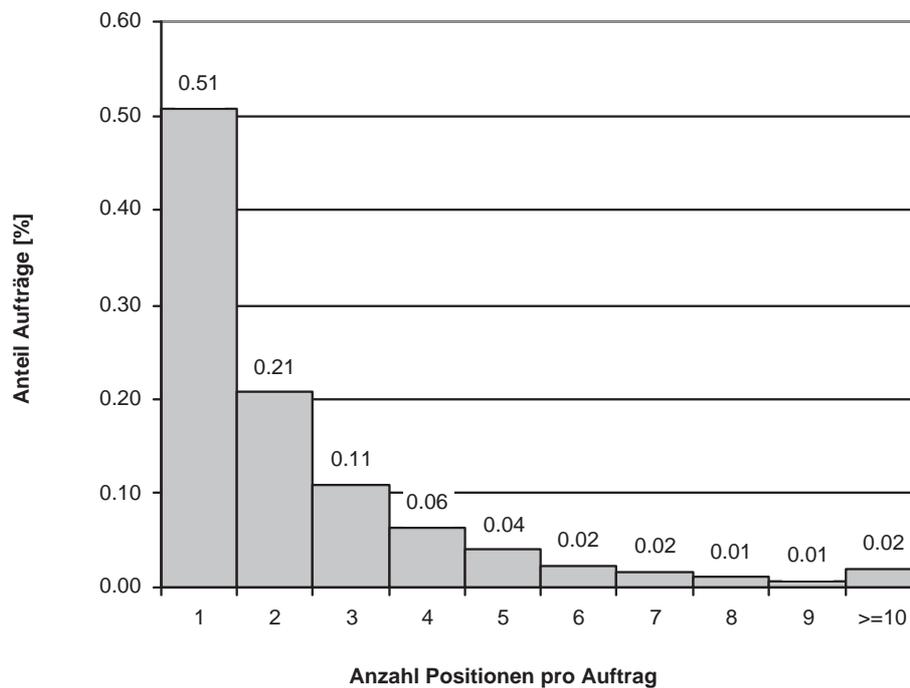


Abbildung 5.28: Empirische Häufigkeitsverteilung der Auftragsgrößen, Realdaten 2

abschließend wie folgt gewichtet:

$$s_{GW}^{**} = 0,653 \cdot s_{GW}^*(n=2) + 0,347 \cdot s_{GW}^*(n=3) \quad (5.2)$$

Dadurch wird der Fehler, der beim einfachen Auf- oder Abrunden entstehen würde, verringert.

Bei Stichgangstrategie ohne Wiederholung ergibt sich unter der Annahme der Exponentialverteilung eine Abweichung gegenüber der Simulation von 14,51 %. Wird die Stichgangstrategie mit Wiederholung eingesetzt, wird eine Abweichung von 0,5 % erzielt. Wird die Weibullverteilung zugrundegelegt, sinkt die Abweichung bei der Stichgangstrategie mit Wiederholung auf -0,88 %. Bei der Stichgangstrategie ohne Wiederholung kann die Abweichung um 1,09 % auf 13,43 % gesenkt werden.

Bei der Schleifenstrategie beträgt die Abweichung für die Exponentialverteilung 21,87 % und sinkt unter der Annahme der Weibullverteilung um 0,65 % auf 21,22%. Bei der Mittelpunkt-Heuristik kann eine Verringerung der Abweichung von 14,31 % auf 13,55 % erzielt werden.

Die berechneten Gassenwege für Exponentialverteilung und Weibullverteilung unterscheiden sich nicht, da keine Abhängigkeit von der Verteilungsfunktion vorliegt.

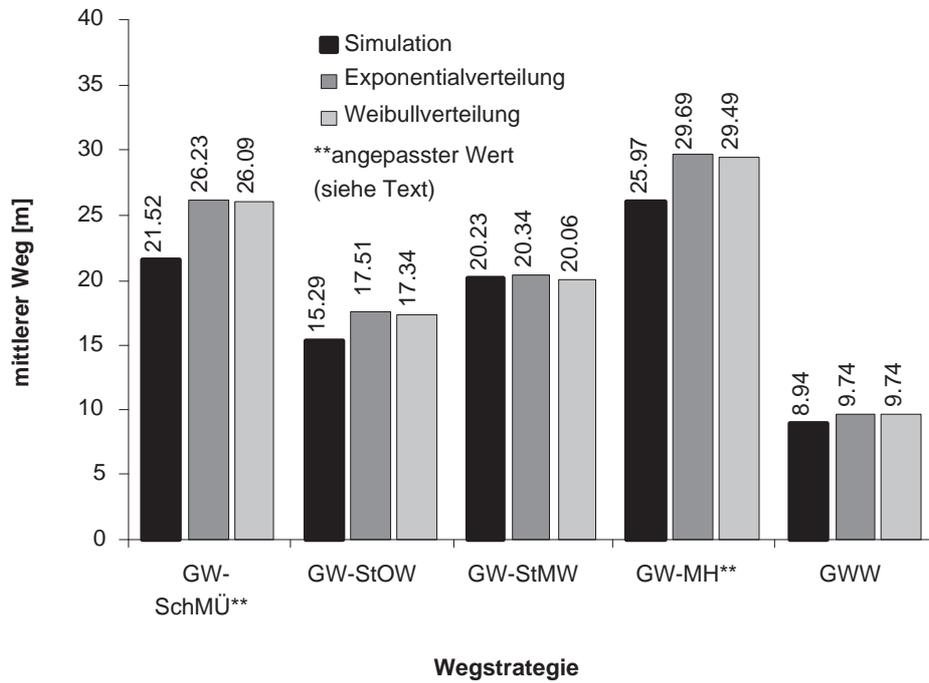


Abbildung 5.29: Vergleich der Simulationsergebnisse und der berechneten Werte für Realdaten

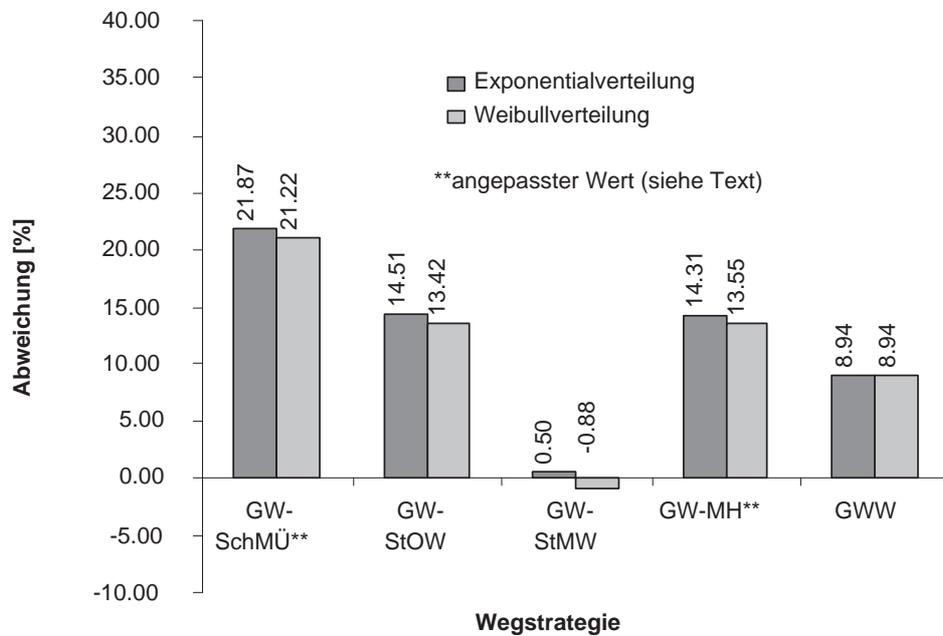


Abbildung 5.30: Abweichung der Berechnungsergebnisse von der Simulation

5.3 Bewertung des Berechnungsverfahrens

Die Untersuchungen zeigen, dass das in dieser Arbeit vorgestellte Berechnungsverfahren sehr gut geeignet ist, um den mittleren Gassenweg und den mittleren Gassenwechselweg in einem konventionellen Kommissioniersystem zu bestimmen.

Kann eine Gleichverteilung der Zugriffshäufigkeit über die Lagerplätze angenommen werden, erreichen die berechneten Gassenwege für jede Anzahl Positionen pro Auftrag Genauigkeiten von mindestens 97 %. Für die Stichgangstrategie mit und ohne Wiederholung werden Genauigkeiten von mindestens 99 % erzielt. Für die Mittelpunkt-Heuristik kann eine Genauigkeit von 90 % erreicht werden, wenn mehr als acht Positionen pro Auftrag vorliegen.

Kann die Zugriffshäufigkeit auf die Lagerplätze einer Gasse durch eine Exponentialverteilung beschrieben werden, sind mit dem in Kapitel 4 vorgestellten Berechnungsverfahren ebenfalls sehr gute Ergebnisse bezüglich der Gassenwege zu erzielen. Für die Schleifenstrategie lassen sich ab fünf Positionen pro Auftrag Genauigkeiten von mindestens 90 % erreichen. Berücksichtigt man bei den Berechnungen den Anteil der Aufträge, die nur eine Position haben, kann die Genauigkeit der Berechnungen weiter verbessert werden. Für die Stichgangstrategie mit und ohne Wiederholung wird bereits bei zwei Positionen pro Auftrag eine Genauigkeit von 97 % erreicht. Für die Mittelpunkt-Heuristik können ab acht Positionen pro Auftrag Genauigkeiten von 90 % erzielt werden.

Bei der Berechnung des Gassenwechselweges werden Genauigkeiten von 96 % erreicht. Steigt die Anzahl der Gassen in denen kommissioniert wird, steigt die Genauigkeit des Verfahrens weiter an. Die vorgestellte Berechnungsformel ist dabei extrem einfach und hängt ausschließlich von der mittleren Anzahl Positionen pro Auftrag und von der Summe der Gassenbreiten B ab.

Sowohl bei der Schleifenstrategie mit Überspringen als auch bei der Mittelpunkt-Heuristik ist darauf zu achten, dass die Anzahl der Positionen pro Auftrag eine Mindestgröße von vier, bei der Schleifenstrategie bzw. fünf Positionen pro Auftrag bei der Mittelpunkt-Heuristik nicht unterschreitet. Liegen die Werte darunter, müssen die Berechnungen entsprechend modifiziert werden (vgl. Kapitel 5.2).

Die Abweichungen der berechneten Werte zu den Simulationswerten in Kapitel 5.1 sind im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass reale Kommissioniersysteme diskrete Abstände zwischen den Lagerfächern bzw. zwischen den Gassen aufweisen. Gleiches gilt für die Abbildung der Zugriffshäufigkeit auf die Artikel. Im Rahmen der Berechnungen werden diese Größen durch stetige Funktionen abgebildet. Dadurch ist auch zu erklären, dass mit zunehmender Lagerplatzdichte und einer größeren Anzahl Gassen die Abweichungen zwischen Berechnung und Simulation sinken.

Die Kenntnis der empirischen Häufigkeitsverteilung der Zugriffe auf die Artikel ist Voraussetzung zur Anwendung des Verfahrens, da mit ihr die Parameter der Verteilungsfunktion, z. B. der Wert λ bei der Exponentialverteilung, ermittelt werden. Liegen keine empirischen Daten vor, können die Parameter der entsprechenden Verteilungsfunktion auch geschätzt werden. So gilt für den Parameter λ der Exponentialverteilung der Zusammenhang $E(X) = 1/\lambda$. Nimmt der Erwartungswert $E(X)$ den Wert 0,1244 an, entspricht dies dem Fall, dass 20 % der Artikel 80 % der Zugriffe verursachen. Entsprechend gilt für $E(X)=0,218$, dass 20 % der Artikel 60% der Zugriffe verursachen usw.

Die Untersuchungen bezüglich der Güte der Approximation durch die Exponentialverteilung zeigen, dass durch die vereinfachte Annahme der Exponentialverteilung nur geringe Abweichungen von ca. 5 % gegenüber einer Verteilungsfunktion einzukalkulieren sind, die die empirische Zugriffshäufigkeit der Artikel am besten abbildet.

Insbesondere bei der Stichgangstrategie und der Mittelpunkt-Heuristik steigt die Güte der Berechnungen mit der Genauigkeit der Abbildung der empirischen Daten. Für die Schleifenstrategie ergeben sich nur dann Verbesserungen, wenn bei der Berechnung die Anteile der Aufträge mit einer Position gemäß (5.1) berücksichtigt werden.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse hat die Auftragsstruktur. Die in Kapitel 5.2 untersuchten realen Auftragsdaten weisen beide eine linksschiefe Verteilung auf. Das führt dazu, dass die berechneten Wahrscheinlichkeiten gemäß (4.69) keine exakten Ergebnisse liefern. Der dadurch auftretende Fehler der Berechnungen liegt bei den untersuchten Daten im Bereich von 5 bis 10 % und ist somit im Rahmen der Grobplanungsphase eine gute Näherung.

Der Vergleich der bestehenden Berechnungsmethoden mit dem in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsverfahren zeigt, dass der Gassenweg bei beliebiger Verteilung der Zugriffshäufigkeit auf die Lagerfächer mit diesem Verfahren die beste Annäherung an die realen Wegstrecken liefert.

Kapitel 6

Anwendung des Berechnungsverfahrens

Das in Kapitel 4 entwickelte Berechnungsmodell zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit eines mehrstufigen Kommissioniersystems wird in diesem Kapitel auf ein konkretes zweistufiges Kommissioniersystem angewendet. Dabei werden die einzelnen Berechnungsschritte gemäß Kapitel 4.1 detailliert erläutert.

6.1 Systembeschreibung

Die erste Stufe des Kommissioniersystems wird durch ein konventionelles MzW-System realisiert, bei dem sich der Kommissionierer eindimensional nach der Stichgangstrategie ohne Wiederholung durch das Lager bewegt (Abb. 6.1). Dabei entnimmt er die Entnahmeeinheiten von quer eingelagerten Paletten und legt sie dezentral auf dem in jeder Gasse vorhandenen Bandförderer ab (Pick-to-Belt). Im Lager werden insgesamt $M = 224$ Artikel bevorratet, die auf $N_G = 4$ Gassen verteilt sind. Jeder Artikel belegt genau eine Palette im Lager. Die Lagerfachbreite beträgt $1,2 \text{ m}$. Damit ergibt sich die Gassenlänge $L = 33,6 \text{ m}$. Das Anfahrmaß beträgt $L_C = 1 \text{ m}$. Die Artikel werden auf $N_G = 4$ Gassen verteilt. Pro Gasse werden entsprechend $M_G = 56$ Artikel gelagert. Die Gassenbreite beträgt $B_a = 3,5 \text{ m}$. Der Abstand der Mitte der ersten Gasse zur Mitte der letzten Gasse ergibt sich zu $B = 10,5 \text{ m}$.

Die mittlere Geschwindigkeit der Kommissionierer wird mit $v = 1 \text{ m/s}$ angenommen und die Beschleunigung mit $a = 2 \text{ m/s}^2$. Die mittlere Anzahl Positionen pro Auftrag beträgt $n = 10$. Die Zugriffshäufigkeit über den Rang der Artikel kann durch eine normierte Exponentialverteilung mit $\lambda = 5$ abgebildet werden.

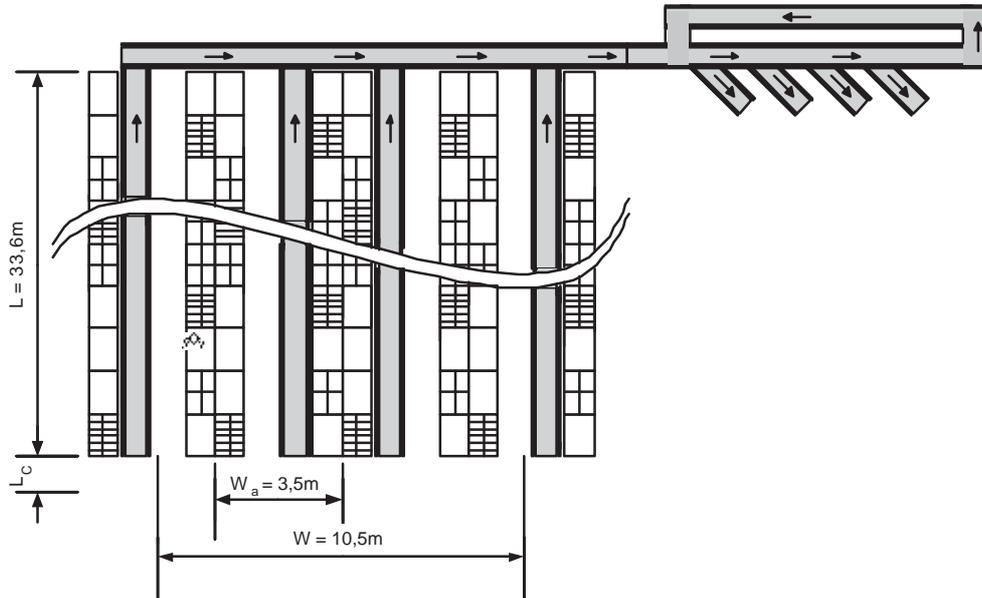


Abbildung 6.1: Zweistufiges Kommissioniersystem

Die zweite Kommissionierstufe besteht aus dem Bandförderer, der die Verbindung zum Sorter herstellt, und dem Sorter selbst. Die Fördergeschwindigkeit des Bandförderers beträgt $v_B = 1 \text{ m/s}$. Die Zusammenführungselemente des Förderers sind halbstetig ausgeführt. Die Kapazität in unstetiger Richtung beträgt $c = 1$. Die Abfertigungsstrategie an den Zusammenführungen ist stochastisch. Alle Zusammenführungselemente des Fördersystems sind baugleich. Die Sortierung der Güter wird durch einen Kippschalensorter realisiert, der mit einer Fördergeschwindigkeit von $v_S = 3 \text{ m/s}$ betrieben wird. Die Stückgüter belegen jeweils eine Kippschale. Die Teilung der Kippschalen beträgt $e_s = 0,4 \text{ m}$. Alle Daten sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

6.2 Berechnung der Kommissionierleistung

Die Kommissionierleistung des Kommissioniersystems ergibt sich gemäß (4.2) zu

$$P_K = \frac{1}{t_{K,system}} \left[\frac{Pos}{h} \right]$$

Die Kommissionierzeit t_K eines k -stufigen Kommissioniersystems wird durch die Kommissionierzeit der Stufe k bestimmt. Es gilt gemäß (4.5)

$$t_{K,system} = t_{K,k}$$

Für $k = 2$ ergibt sich entsprechend

$$t_{K,system} = t_{K,2}$$

Parameter	Variable	Wert
Anzahl Artikel	M	224
Anzahl Artikel pro Gasse	M_G	56
Anzahl Gassen im Lager	N_G	4
Anzahl Positionen pro Auftrag	n	15
Länge einer Gasse	L	33,6 m
Abstand Gassenende bis zur Gassenwechselwegmitte	L_C	1,0 m
Breite einer Kommissioniergasse	B_a	3,5 m
Abstand zwischen erstem und letztem Gang	B	10,5 m
Geschwindigkeit des Kommissionierers	v	1,0 $\frac{m}{s}$
Beschleunigung des Kommissionierers	a	2,0 $\frac{m}{s^2}$
Erwartungswert der Exponentialverteilung	$\frac{1}{\lambda}$	0,3
Geschwindigkeit des Bandförderers	v_B	1,0 $\frac{m}{s}$
mittlere Gutlänge	L_{Gut}	1
Kapazität der Zusammenführungselemente	c	1
Einfahrzeit unstetige Richtung	t_{Ein}	1 s
Ausfahrzeit unstetige Richtung	t_{Aus}	0,5 s
Umschaltzeit unstetige Richtung	t_{Ums}	1 s
Geschwindigkeit des Kippschalensorters	v_S	1,0 $\frac{m}{s}$
Teilung des Kippschalensorters	e_S	0,4 m

Tabelle 6.1: Parameter des zweistufigen Kommissioniersystems

Die zweite Kommissionierstufe besteht aus dem Fördersystem, das die Entnahmeeinheiten aus dem Lagerbereich zur Sortieranlage transportiert, und der Sortieranlage selbst. Definiert man den Sortierprozess als einen Bearbeitungsprozess mit einer Bearbeitungszeit t_B pro Position, dann kann die zweite Kommissionierstufe als ein WzM-System bezeichnet werden. Die Bereitstellung der Entnahmeeinheiten dieses Ware-zu-Mann Systems wird durch die erste Kommissionierstufe realisiert. Für die Kommissionierzeit eines WzM-Systems gilt gemäß (4.4)

$$t_K = \max(t_{ZAZ-B}; t_{ZAZ-FT}; t_B) \quad (6.1)$$

Die minimale Zwischenankunftszeit des Bereitstellensystems t_{ZAZ-B} entspricht bei dem betrachteten Beispiel der Kommissionierzeit der ersten Kommissionierstufe $t_{K,1}$. Die minimale Zwischenankunftszeit des Fördersystems muss mit den gegebenen Größen berechnet werden. Die Bearbeitungszeit t_B ist identisch mit der Sortierzeit pro Position

t_{Sort} , die sich als Kehrwert der Sortierleistung ergibt. Es gilt

$$\begin{aligned} t_{ZAZ-B} &= t_{K,1} \\ t_B &= t_{sort} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Damit ergibt sich die Kommissionierzeit der zweiten Stufe $t_{K,2}$ durch Einsetzen der Zusammenhänge aus (6.2) in (6.1) zu

$$t_{K,2} = \max(t_{K,1}; t_{ZAZ-FT}; t_{sort}) \quad (6.3)$$

Berechnung von t_{Sort}

Für den gegebenen Kippschalensorter ergibt sich die Leistung nach (3.69) und (3.72) zu

$$P_{Sort} = \lambda_{sort,max} = \frac{v_S}{e_s} = \frac{1 \frac{m}{s}}{0,4 m} = 7,5 \frac{1}{s}$$

Die Sortierzeit pro Position ergibt sich durch den Kehrwert der berechneten Leistung. Damit ergibt sich t_{Sort} zu:

$$t_{Sort} = 0,133 s \quad (6.4)$$

Berechnung von t_{ZAZ-FT}

Die minimale Zwischenankunftszeit t_{ZAZ-FT} , die auf der Fördertechnik realisierbar ist, wird durch die Zusammenführungselemente bestimmt. Es gilt $t_{ZAZ-FT} = t_{ZAZ-TK}$. Für eine halbstetige Zusammenführung gilt der allgemeine Zusammenhang der unstetigen Abfertigung gemäß (4.112)

$$t_{ZAZ,TK} = \sum_{i=1}^k \left\{ \left[\sum_{x=1}^{c_i-1} p_i^x \cdot \frac{1-p_i}{\mu_i(x)} \right] + p_i^{c_i} \cdot \frac{1}{\mu_i(c_i)} \right\} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}^{ver}$$

Mit $k = 2$ und $c = 1$ vereinfacht sich dieser Term zu:

$$t_{ZAZ,TK} = \sum_{i=1}^2 \left\{ p_i \cdot \frac{1}{\mu_i} \right\} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}^{ver}$$

Die charakteristischen Zwischenzeiten t_{ij}^z und t_{ji}^z ergeben sich für die vorliegenden Zusammenführungen zu Null. Damit kann der Term weiter vereinfacht werden und es ergibt sich $t_{ZAZ,TK}$ durch den einfachen Zusammenhang

$$t_{ZAZ,TK} = \frac{p_1}{\mu_1} + \frac{p_2}{\mu_2}$$

Da sich der Gesamtstrom, der durch den Konfliktbereich fließt, aus den Teilströmen der vier Gassen zusammensetzt, ergibt sich der Anteil des unstetigen Stroms am betrachteten Knoten zu $\frac{1}{4}$. Wird die unstetige Stromrichtung mit 1 bezeichnet, dann ergibt sich

$$t_{ZAZ,TK} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\mu_1} + \frac{3}{4} \cdot \frac{p_2}{\mu_2}$$

Die partielle Grenzleistung in stetiger Richtung ist durch die Fördergeschwindigkeit und die mittlere Paketlänge gegeben. Es gilt

$$\mu_2 = \frac{v_B}{L_{Gut}} = \frac{1 \frac{m}{s}}{0,2 m} = 5 \frac{1}{s}$$

Die partielle Grenzleistung des unstetigen Stroms ergibt sich aus der Einfahrzeit, der Umschaltzeit und der Ausfahrzeit. Es gilt

$$\mu_1 = \frac{1}{t_{Ein} + t_{Ums} + t_{Aus} + t_{Ums}} = \frac{1}{0,5 s + 1 s + 0,5 s + 1 s} = 0,3 \frac{1}{s}$$

Damit ergibt sich $t_{ZAZ,TK}$ bzw. t_{ZAZ-FT} zu

$$t_{ZAZ-FT} = t_{ZAZ,TK} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{0,33} s + \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{5} s = 0,907 s \quad (6.5)$$

Berechnung von $t_{K,1}$

Für die Berechnung der Kommissionierzeit der ersten Stufe $t_{K,1}$ gilt die Berechnungsformel für MzW-Systeme gemäß (4.1).

$$t_K = t_Z + t_B$$

Die Zusammenführungszeit t_Z entspricht bei Mann-zu-Ware Systemen gemäß (4.3) der mittleren Wegzeit pro Position t_d . Die Wegzeit pro Position ist gemäß (4.17) definiert als

$$t_d = \frac{t_n}{n}$$

Die mittlere Anzahl Positionen pro Auftrag n ist bekannt. Zur Berechnung des mittleren Zeitbedarfs t_n für den zurückzulegenden Weg bei der Bearbeitung eines Auftrags mit n Positionen muss zunächst die zurückzulegende Wegstrecke s_n ermittelt werden. Die Wegstrecke setzt sich gemäß (4.54) aus dem Basisweg, dem Gassenweg und dem Gassenwechselweg zusammen. Da die Entnahmeeinheiten direkt an das Förderband vor dem Lagerfach übergeben werden und die neuen Aufträge per Funk an das mobile Datenterminal des Kommissionierers übertragen werden, entfällt der Basisweg.

Die Berechnung des Gassenweges ist von der eingesetzten Wegstrategie abhängig. Im vorliegenden Beispiel wird aufgrund der baulichen Gegebenheiten nach der Stichgangstrategie ohne Wiederholung kommissioniert. Der Verlauf der Zugriffshäufigkeit über den Rang der Artikel kann durch eine Exponentialverteilung mit $\lambda = 3,33$ approximiert werden. Das bedeutet, dass 20 % der Artikel 50 % Prozent der Lagerzugriffe verursachen.

Die Einlagerung der Artikel erfolgt im vorliegenden Fall nach der Zugriffshäufigkeit. Daher kann der Verlauf der Zugriffshäufigkeit über die Lagerplätze einer Gasse, die zur Berechnung des Gassenweges benötigt wird, durch die gleiche Funktion approximiert werden, die auch die Zugriffshäufigkeit über den Rang der Artikel abbildet.

Für exponentialverteilte Zugriffshäufigkeiten in der Gasse gilt nach (4.72) der Zusammenhang:

$$s_{GW} = 2 \cdot N_G \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G}{r} \cdot \binom{M - M_G}{n - r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + L \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right]$$

Einsetzen der Werte aus Tabelle 6.1 liefert

$$\begin{aligned} s_{GW} &= 2 \cdot 4 \cdot \sum_{r=1}^{10} \left[\frac{\binom{56}{r} \cdot \binom{224 - 56}{15 - r}}{\binom{224}{15}} \cdot \left(1 \text{ m} + 33,6 \text{ m} \cdot 0,3 \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right] \\ &= 164,37 \text{ m} \end{aligned}$$

Der Gassenwechselweg ergibt sich unabhängig von der Wegstrategie aus (4.58) zu

$$\begin{aligned} s_{GWW} &= 2 \cdot \frac{n}{n+1} \cdot B = 2 \cdot \frac{15}{16} \cdot 10,5 \text{ m} \\ &= 19,69 \text{ m} \end{aligned}$$

Die zurückzulegende Wegstrecke ergibt sich durch Addition des Gassenweges und des Gassenwechselweges zu

$$\begin{aligned} s_n &= s_{GW} + s_{GWW} = 164,37 \text{ m} + 19,69 \text{ m} \\ &= 184,06 \text{ m} \end{aligned}$$

Mit der berechneten Wegstrecke kann die Wegzeit ermittelt werden. Geht man davon aus, dass das Geschwindigkeits-Zeitprofil des Kommissionierers durch eine Standardfahrrampe beschrieben werden kann, dann gilt für die Wegzeit t_n der Zusammenhang

$$t_n = \frac{s_n}{v} + n_a \cdot \frac{v}{a}$$

Die Anzahl der Beschleunigungen n_a entspricht der Anzahl der zu kommissionierenden Positionen, da ein Stopp an einer Basis nicht erforderlich ist. Damit ergibt sich die mittlere Kommissionierzeit zu

$$\begin{aligned} t_n &= \frac{184,06 \text{ m}}{1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}} + 15 \cdot \frac{1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2,0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \\ &= 191,56 \text{ s} \end{aligned}$$

Die Wegzeit pro Position ergibt sich durch Division mit 15 zu

$$t_d = \frac{t_n}{n} = \frac{191,56 \text{ s}}{15} = 12,77 \text{ s}$$

Die Bearbeitungszeit t_B pro Position setzt sich gemäß (4.4) wie folgt zusammen

$$t_B = t_{Basis} + t_{greif} + t_{tot}$$

Die Totzeit wird in diesem Beispiel gleich Null gesetzt. Die Greifzeit für das Picken aus einem Regal und Ablegen auf einem Bandförderer betrage 3 s. Die Basiszeit besteht in diesem Fall nur aus der Übernahmezeit eines neuen Auftrags. Da der Kommissionierer mit einem Mobilten Datenterminal arbeitet, wird als Basiszeit eine Sekunde angenommen. Einsetzen der Werte liefert

$$t_B = \frac{1 \text{ s} + 3 \text{ s} + 0 \text{ s}}{10} = 0,4 \text{ s}$$

Damit ergibt sich die Kommissionierzeit der Kommissionierstufe 1 $t_{K,1}$ aus der Addition der Wegzeit und der Bearbeitungszeit. Es gilt

$$t_{K,1}^* = t_d + t_B = 12,77 \text{ s} + 0,4 \text{ s} = 13,17 \text{ s}$$

Da in der ersten Kommissionierstufe manuell kommissioniert wird, ist ein entsprechender Verlustfaktor η_{ver} zu berücksichtigen. Für $t_{K,1}$ gilt unter der Annahme $\eta_{ver} = 0,9$

$$t_{K,1} = \frac{t_{K,1}^*}{0,9} = \frac{13,17}{0,9} = 14,63 \text{ s} \quad (6.6)$$

Einsetzen von (6.4),(6.5) und (6.6) in (6.1) liefert die Kommissionierzeit pro Position des Systems

$$\begin{aligned} t_{K,2} &= \max (t_{K,1} ; t_{ZAZ-FT} ; t_{Sort}) = \max (14,63 \text{ s} ; 0,907 \text{ s} ; 0,133 \text{ s}) \\ &= 14,63 \text{ s} \end{aligned}$$

Damit ergibt sich eine Kommissionierleistung von:

$$P_{K,system} = 246,07 \frac{1}{h}$$

Die Kommissionierleistung wird im vorliegenden Fall durch das manuelle Kommissioniersystem begrenzt. Eine Leistungssteigerung ist möglich, wenn die Anzahl der Kommissionierer in der ersten Kommissionierstufe erhöht wird. Theoretisch können acht Kommissionierer eingesetzt werden. Bei einer größeren Anzahl reicht die installierte Sortierleistung nicht mehr aus.

6.3 Untersuchung von Systemvarianten

Mit dem neuen Berechnungsansatz können nun unterschiedliche Parameter des Systems und ihre Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit untersucht werden. Für das vorliegende System soll zunächst geprüft werden, ob unter den gegebenen Voraussetzungen die Stichgangstrategie ohne Wiederholung die beste Wegstrategie darstellt, oder ob mit der Schleifenstrategie mit Überspringen oder der Mittelpunkt-Heuristik höhere Leistungen erzielt werden können.

Im zweiten Schritt soll geprüft werden, welche Wegstrategie den minimalen Gassenweg liefert, wenn sich die Auftragsstruktur verändert. Es wird angenommen, dass die Anzahl der Positionen pro Auftrag bis auf acht sinkt.

Abschließend soll der Einfluss der Zugriffshäufigkeit auf die einzelnen Artikel untersucht werden. Man geht davon aus, dass sich die Bestellungen weiter auf einzelne Artikel konzentrieren. Das bedeutet, dass die Zugriffshäufigkeit durch eine Exponentialverteilung mit einem Erwartungswert von 0,1 approximiert werden kann. Das heißt, dass 20 % der Artikel 85 % der Lagerzugriffe verursachen.

Die Resultate der jeweiligen Untersuchungsparameter sind in Tabelle 6.2 zusammenfassend dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass unter den derzeit gegebenen Größen (Spalte 1) die Stichgangstrategie ohne Wiederholung die schlechteste Wegstrategie darstellt. Mit der Mittelpunkt-Heuristik besteht unter Berücksichtigung des konstanten Gassenwechselweges ein Einsparungspotenzial von 20 %. Aber auch die Schleifenstrategie würde Einsparungen von 13 % liefern.

Wegstrategie	$E(X) = 0,3 ; n = 15$	$E(X) = 0,3 ; n = 8$	$E(X) = 0,2 ; n = 15$
GW-StOW	164,37 m	117,10 m	112,22 m
GW-SchMÜ	140,79 m	128,74 m	140,78 m
GW-MH	130,30 m	109,48 m	112,93 m

Tabelle 6.2: Gassenwege bei unterschiedlichen Werten für die Zugriffshäufigkeitsverteilung und die Anzahl der Positionen pro Auftrag

Sinkt die Anzahl Positionen pro Auftrag auf acht (2. Spalte), stellt auch hier die Mittelpunkt-Heuristik die beste Wegstrategie dar. Das Einsparungspotenzial sinkt allerdings auf 5%. Die Schleifenstrategie liefert für diesen Fall schlechtere Ergebnisse als die Stichgangstrategie ohne Wiederholung.

Konzentrieren sich die Zugriffe auf weniger Artikel (3. Spalte), wird mit der Stichgangstrategie die kürzeste mittlere Wegstrecke erzielt. Die Mittelpunkt-Heuristik liefert aber nahezu identische Werte.

Die Ergebnisse zeigen, dass die optimale Wegstrategie in einem konventionellen Kommissioniersystem von vielen Faktoren abhängig ist und im Einzelfall geprüft werden muss. Für den Planer eines Kommissioniersystems ist es daher von besonderer Bedeutung, schnell über Leistungsgrößen unterschiedlicher Planungsvarianten zu verfügen, um so eine möglichst optimale Lösung zu finden. Mit den in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsformeln steht ihm dafür ein geeignetes Werkzeug zur Verfügung.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Planung und Gestaltung moderner Kommissioniersysteme müssen diverse Richtlinien, Restriktionen und Nebenbedingungen eingehalten werden. Dadurch werden die möglichen Realisierungsmöglichkeiten eingeschränkt. In der Regel ergibt sich aber immer noch eine Vielzahl möglicher Varianten, die durch den Planer soweit spezifiziert werden müssen, dass Abschätzungen bezüglich der Investitions- und Betriebskosten des geplanten Systems möglich sind. So muss zum Beispiel in einem WzM-System die Anzahl der erforderlichen Gassen eines AKL bestimmt werden oder die Anzahl der Kommissionierplätze und der damit verbundene Personalbedarf.

Zur Bestimmung dieser Größen sind im Wesentlichen die Leistungsanforderungen an das zu planende Kommissioniersystem maßgebend. Daher muss der Planer eines Kommissioniersystems die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichsten Varianten schnell und unkompliziert ermitteln können. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit sollte dabei möglichst mit einem standardisierten Verfahren erfolgen, damit die erzielten Ergebnisse unterschiedlicher Planer für den Kunden vergleichbar sind.

Die existierenden Richtlinien zum Thema Kommissionierung bzw. Kommissioniersysteme zeigen ein solches Verfahren nicht auf. In der Literatur wird unter der Berechnung von Kommissioniersystemen ausschließlich die Berechnung von konventionellen Systemen behandelt. Die bekannten Berechnungsverfahren sind dabei auf bestimmte Konstellationen zwischen Auftragsgröße und Lagerlayout beschränkt.

Für die Berechnung von Kommissioniersystemen, in denen unterschiedliche förder- und lagertechnische Komponenten zusammenwirken, existiert kein allgemeiner Berechnungsalgorithmus. Die Leistungsermittlung einzelner Komponenten von Kommissioniersystemen werden zwar in der Literatur beschrieben, aber die Beeinflussung der erzielbaren Gesamtleistung durch die Kombination unterschiedlicher Gewerke wird dabei nicht berücksichtigt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war deshalb die Entwicklung eines Berechnungsalgorithmus zur Leistungsbestimmung beliebiger Kommissioniersysteme sowie die Erstellung eines Berechnungsverfahrens für MzW-Systeme, das die bestehenden Einschränkungen existierender Lösungsansätze auflöst.

Um diese Ziele zu erreichen, wurden zunächst die existierenden Berechnungsverfahren konventioneller Kommissioniersysteme analysiert und darauf aufbauend ein neues Berechnungsverfahren entwickelt. Es wurde ein Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Systemleistung beliebiger Kommissioniersysteme formuliert, mit dem auch mehrstufige Systeme berechnet werden können. Die bestehenden Berechnungsverfahren für die wichtigsten förder- und lagertechnischen Komponenten eines Kommissioniersystems wurden so weiterentwickelt, dass die erzielten Ergebnisse direkt in den Berechnungsalgorithmus übernommen werden können.

Der wissenschaftliche Kern dieser Arbeit besteht in der Entwicklung eines Berechnungsverfahrens für Kommissioniersysteme nach dem Prinzip Mann-zu-Ware, bei dem die Zugriffshäufigkeit eines Artikels bei der Einlagerung berücksichtigt wird. Der Verlauf der Zugriffshäufigkeit über die Gasse kann durch theoretische Verteilungsfunktionen approximiert werden, die in die Berechnungen einfließen und so die Auswirkungen der Einlagerstrategie bei der Leistungsermittlung berücksichtigen. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass mit einer Approximation der Zugriffshäufigkeiten durch eine Exponentialverteilung gute Näherungslösungen zu erzielen sind. Die entwickelten Berechnungsformeln kombinieren dabei Verfahren der Ordnungsstatistik mit der Wahrscheinlichkeitsrechnung, wodurch die einschränkenden Bedingungen bestehender Verfahren aufgelöst werden konnten. Die Validierung des entwickelten Berechnungsverfahrens erfolgte mit Hilfe der Simulation.

Als Ergebnis dieser Arbeit liegt erstmals ein durchgängiger Berechnungsalgorithmus für beliebige Kommissioniersysteme vor. Die entwickelten Berechnungsformeln für die Kommissionierung nach dem Prinzip Mann-zur-Ware nehmen für exponentialverteilte Systeme eine so einfache Struktur an, dass die Berechnung mit einfachen mathematischen Mitteln möglich wird. Dadurch ist der Einsatz dieses Berechnungsverfahrens sehr gut für die Praxis geeignet.

Die vorliegenden Berechnungsformeln für MzW-Systeme bieten sich ferner dazu an, in eine Planungssoftware integriert zu werden, in der die wegoptimale Kombination aus Gassenanzahl und Wegstrategie durch vollständige Enumeration ermittelt wird.

Im Rahmen der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Auftragsstruktur einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der erzielten Ergebnisse hat. Ziel weiterer Untersuchungen sollte es daher sein, die Auftragsstruktur durch Verteilungsfunktionen zu beschreiben, um so Lageparameter wie die Schiefe und die Kurtosis zu bestimmen. Auf

Basis dieser Lageparameter können anschließend Korrekturfaktoren bestimmt werden, die in die Berechnungen einfließen, um so die Güte der berechneten Werte weiter zu erhöhen.

Kapitel 8

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

2.1	Grundfunktionen des Materialflusssystems in der Kommissionierung nach [Jün99]	10
2.2	Morphologischer Kasten, Organisationssystem [VDI94a]	12
2.3	Teilsysteme in einem zweistufigen Pick-to-Belt Kommissioniersystem	16
2.4	Boden-Zeilenlager in der Kommissionierung	18
2.5	Behälterregal für die Kommissionierung [Quelle: Bito]	19
2.6	Automatisches Kleinteilelager [Quelle: KTL]	20
2.7	Schwerkraftdurchlaufregallager [Quelle: SSI Schäfer]	21
2.8	Sammel- und Verteilelemente	22
2.9	Transportknoten mit Verteilwagen vom Typ (2/3)	23
2.10	Stetige Transportknoten der Ordnung 3 und 4	24
2.11	Beispiele für die unstetige Abfertigung	24
2.12	Beispiele für die halbstetige Abfertigung	25
2.13	Aufbau einer Sortieranlage [Jod06]	27
2.14	Strukturvarianten von Verteilförderern	29
2.15	Leistungsorientierte Systematik [Jod06]	30
2.16	Prinzipieller Aufbau einer Endstelle [Jod06]	31
2.17	Differenzierung von Kommissioniersystemen nach der Art der Bereitstellung und der Abgabe der Entnahmeeinheit	32
2.18	Konventionelles Kommissioniersystem	33
2.19	Schachtkommissionierer	34
2.20	Kommissioniernest	35

2.21	Pick-to-Belt-System	36
2.22	Beispiel eines Ware-zum-Mann-Systems	36
2.23	Inverses Kommissionieren	37
2.24	Weganteile in einem Kommissioniersystem nach dem Prinzip Mann-zur-Ware	40
2.25	Schleifenstrategie ohne Überspringen	41
2.26	Schleifenstrategie mit Überspringen	41
2.27	Stichgangstrategie ohne Gangwiederholung	42
2.28	Stichgangstrategie mit Gangwiederholung	43
2.29	Mittelpunkt-Heuristik	43
2.30	Largest-Gap-Heuristik	44
3.1	Fahrwege bei einem Einzel- und einem Doppelspiel in einem vollautomatischen Lager mit Regalbediengerät	53
3.2	Zuordnung der Ein- und Auslageraufträge zu Einzel- bzw. Doppelspielen	53
3.3	Einzel-/Doppelspiel [Quelle: FEM 9.851]	54
3.4	Regalwand mit Geschwindigkeitsgerade	55
3.5	Grenzleistungsdiagramm ohne Verlustzeiten	64
3.6	Grenzleistungsdiagramm mit Verlustzeiten	64
3.7	Zyklus eines Verschiebewagens der Kapazität $c = 2$	64
3.8	Prinzip der Flusszerlegung am Beispiel eines Verteilwagens mit der Kapazität $c = 2$ [Gro84]	65
3.9	Ermittlung der Verlustzeit t_{ij}^{ver}	66
3.10	Zeitlücken im Hauptstrom bei Vorfahrt	70
3.11	Dichtefunktion der Zwischenankunftszeit des Hauptstroms	71
3.12	Abstand von Sortiergütern	72
3.13	Abstand von Sortiergütern	73
4.1	Anwendung des Berechnungsalgorithmus auf zweistufige Kommissioniersysteme	80
4.2	Beispiel eines zweistufigen Kommissioniersystems mit Pick-to-Belt und anschließender Sortierung	81

4.3	Fahrrampen	88
4.4	Ein- und zweidimensionale Bewegung eines Kommissionierers innerhalb einer Gasse	90
4.5	Sortierte Reihenfolge der Auftragspositionen bei der Kommissionierung in einer Gasse	91
4.6	Sortierte Reihenfolge der Auftragspositionen bei der Kommissionierung in einer Gasse	93
4.7	Empirische Häufigkeitsverteilung über die Entfernung vom Gassenanfang (Lagerplätze); Einlagerung ohne Berücksichtigung der Zugriffshäufigkeit	94
4.8	Gleichverteilte Zugriffshäufigkeit über die Entfernung vom Gassenanfang	95
4.9	Empirische Häufigkeitsverteilung über die Entfernung vom Gassenanfang (Lagerplätze); Einlagerung mit Berücksichtigung der Zugriffshäufigkeit .	95
4.10	Exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit über die Entfernung vom Gassenanfang	96
4.11	Basisweg, Gassenwechselweg und Gassenweg in einem konventionellen Kommissioniersystem nach dem Prinzip Mann-zur-Ware	100
4.12	Bezeichnungen im Kopfganglayout und im Zentralganglayout	100
4.13	Dezentrale Basis mit äußerer Basislage und einseitigem Zonenzugang [Sch96]	102
4.14	Verlauf der Zugriffshäufigkeit in einer Gasse bei Berücksichtigung der Zugriffshäufigkeit bei unterschiedlichen Wegstrategien	108
4.15	Rang der Lagerplätze und Zugriffshäufigkeit der Artikel nach Rang . . .	113
4.16	Vorgehen bei der Berechnung eines Kommissioniersystems	119
5.1	Gassenweg für System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen	124
5.2	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen	124
5.3	Gassenweg für System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung	125
5.4	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung	126

5.5	Gassenweg für System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung	127
5.6	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung	127
5.7	Gassenweg für System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik	128
5.8	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik	129
5.9	Gassenwechselweg für System 2, gleichverteilte Zugriffshäufigkeit	130
5.10	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwechselweges von der Simulation; System 2; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit	130
5.11	Gassenwechselweg für System 2, exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit	131
5.12	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwechselweges von der Simulation; System 2; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit	132
5.13	Gassenweg für System 2; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen	133
5.14	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen	134
5.15	Gassenweg für System 2; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung	135
5.16	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung	135
5.17	Gassenweg für System 2; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung	136
5.18	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung	137
5.19	Gassenweg für System 2; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik	137
5.20	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenweges von der Simulation; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik	138

5.21	Empirische Zugriffshäufigkeitsverteilung der Artikel im Vergleich zu den theoretischen Verteilungen	141
5.22	Abweichung der theoretischen Verteilungsfunktionen von der empirischen Zugriffshäufigkeitsverteilung der Artikel	142
5.23	Empirische Häufigkeitsverteilung der Auftragsgrößen, Realdaten 1	142
5.24	Vergleich der Simulationsergebnisse und der berechneten Werte für Realdaten.	143
5.25	Abweichung der Berechnungsergebnisse von der Simulation.	144
5.26	Empirische Zugriffshäufigkeitsverteilung der Artikel im Vergleich mit einer theoretischen Exponentialverteilung	146
5.27	Abweichung der Dichtefunktionen von den realen Werten	146
5.28	Empirische Häufigkeitsverteilung der Auftragsgrößen, Realdaten 2	147
5.29	Vergleich der Simulationsergebnisse und der berechneten Werte für Realdaten	148
5.30	Abweichung der Berechnungsergebnisse von der Simulation	148
6.1	Zweistufiges Kommissioniersystem	152
9.1	Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen	190
9.2	Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen	190
9.3	Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung . . .	191
9.4	Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung	191
9.5	Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung	192
9.6	Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung	192

9.7	Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik	193
9.8	Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik	193
9.9	Gassenwechselweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit	194
9.10	Prozentuale Abweichung der berechneten Gassenwechselwege von der Simulation; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit	194
9.11	Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen	195
9.12	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs von der Simulation; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen	195
9.13	Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung	196
9.14	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung	196
9.15	Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung	197
9.16	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs von der Simulation; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung	197
9.17	Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik	198
9.18	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs von der Simulation; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik	198
9.19	Gassenwechselweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit	199
9.20	Prozentuale Abweichung der berechneten Gassenwechselwege von der Simulation; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit	199
9.21	Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen	200

9.22	Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen	200
9.23	Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung . . .	201
9.24	Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung	201
9.25	Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung	202
9.26	Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung	202
9.27	Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik	203
9.28	Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik . . .	203
9.29	Gassenwechselweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit	204
9.30	Prozentuale Abweichung der berechneten Gassenwechselwege von der Simulation; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit	204
9.31	Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen .	205
9.32	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs von der Simulation; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen	205
9.33	Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung	206
9.34	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung	206
9.35	Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung	207
9.36	Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung	207

- 9.37 Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik 208
- 9.38 Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs von der Simulation; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik 208
- 9.39 Gassenwechselweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit 209
- 9.40 Prozentuale Abweichung der berechneten Gassenwechselwege von der Simulation; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit 209

Tabellenverzeichnis

5.1	Untersuchte Kommissioniersysteme	123
5.2	Anzahl Positionen pro Auftrag n , bei der die angegebene Abweichung unterschritten wird; System 1, links: Gleichverteilung, rechts: Exponentialverteilung	138
5.3	Anzahl Positionen pro Auftrag n , bei der die angegebene Abweichung unterschritten wird; System 2, links: Gleichverteilung, rechts: Exponentialverteilung	139
5.4	Anzahl Positionen pro Auftrag n , bei der die angegebene Abweichung unterschritten wird; System 3, links: Gleichverteilung, rechts: Exponentialverteilung	139
6.1	Parameter des zweistufigen Kommissioniersystems	153
6.2	Gassenwege bei unterschiedlichen Werten für die Zugriffshäufigkeitsverteilung und die Anzahl der Positionen pro Auftrag	159
9.1	Gassen- und Gassenwechselwege bei unterschiedlichen Randomstreams, System 2, zehn Positionen pro Auftrag	189

Abkürzungsverzeichnis

A	Auslagerung
AKL	Automatisches Kleinteilelager
COI	Cube per Order Index
DIN	Deutsches Institut für Normung
DS	Doppelspiel
E/A-Punkt	Ein- und Auslagerpunkt
E	Einlagerung
ES	Einzelspiel
FEM	Fédération Européenne de la manutention
FIFO	First in First out
GW	Gassenweg
GWW	Gassenwechselweg
Int	Integerwert
KEP	Kurier- Express- und Paketdienste
KFZ	kürzeste Fahrzeit
LG	Largest-Gap-Heuristik
LVS	Lagerverwaltungssystem
MH	Mittelpunkt-Heuristik
MTM	Methods-Time Measurement
MzW	Mann-zur-Ware
NB	Nebenbedingung
RBG	Regalbediengerät
REFA	Verband für Arbeitstudien und Betriebsorganisation e.V.
RFID	Radio Frequency Identification
SchMÜ	Schleifenstrategie mit Überspringen von Gassen
SchOÜ	Schleifenstrategie ohne Überspringen von Gassen
StMW	Stichgangstrategie mit Wiederholung
StOW	Stichgangstrategie ohne Wiederholung
SvZ	Systeme vorbestimmter Zeiten
TMU	Time Measurement Unit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WF	Work-Factor
WzM	Ware-zum-Mann
ZE	Zeiteinheiten

Formelzeichen

a	Beschleunigung
B	Abstand zwischen der ersten und letzten Gasse eines konventionellen Kommissioniersystems
B_G	Breite einer Kommissioniergasse
B_F	Breite eines Lagerfaches
B_1	Lage der Auftragsannahme bei einer dezentralen Basis
B_2	Lage der Behälterbereitstellung bei einer dezentralen Basis
B_3	Lage der Abgabe für kommissionierte Aufträge bei einer dezentralen Basis
B_F	Breite eines Lagerfaches
B_a	Breite einer Lagergasse
c	Kapazität eines un stetigen Transportknotens
$E(s_{ij})$	Erwartungswert der Wegstrecke vom Punkt i zu Punkt j ;
e_A	Länge eines Elementes bei fester Teilung des Fördermittels bei technisch bedingtem Mindestabstand
e_s	Abstand zweier Elemente eines Fördermittels mit fester Teilung
A_o	Fläche oberhalb der Geschwindigkeitsgeraden des RBG
A_u	Fläche unterhalb der Geschwindigkeitsgeraden des RBG
f_R	Rezirkulationsverlustfaktor
f_S	Synchronisationsverlustfaktor
H_B	Höhe der Lagerfächer
\bar{k}	mittlere Anzahl Nebenstromobjekte, die zwischen zwei Objekten des Hauptstroms einen Konfliktbereich durchlaufen können
L	Länge einer Gasse
L_B	Länge eines Fachs
L_C	Anfahrmaß
$l_{Gut,m}$	mittlere Gutlänge
M	Anzahl Artikel
M_G	Anzahl Artikel in einer Gasse
m	Anzahl Lagerfächer
m_u	Anzahl Lagerfächer unterhalb der Geschwindigkeitsgeraden

m_o	Anzahl Lagerfächer oberhalb der Geschwindigkeitsgeraden
N_G	Anzahl Gassen im Lager
n	Anzahl Positionen pro Auftrag
n_R	mittlere Anzahl Rezirkulierender Objekte
n_S	Anzahl Elemente eines Verteilförderers
n_T	Anzahl Elemente eines Verteilförderers, die zwischen zwei Objekten unbelegt bleiben
P_K	Kommissionierleistung in Positionen pro Zeiteinheit
$P_{K,max}$	maximal erzielbare Kommissionierleistung
P_{sort}	Sortierleistung
P_{real}	real erzielbare Kommissionierleistung
p	Wahrscheinlichkeit
p_{ds}	Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Doppelspieles
p_o	Wahrscheinlichkeit, einen Lagerplatz oberhalb der Geschwindigkeitsgeraden anzufahren
p_r	Wahrscheinlichkeit, r Positionen in einer Gasse anzufahren
p_u	Wahrscheinlichkeit, einen Lagerplatz unterhalb der Geschwindigkeitsgeraden anzufahren
p_{es}	Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Einzelspieles
r	Anzahl Positionen, die in einer Gasse gepickt werden
s	Abstand zwischen zwei Objekten
s_{pos}	mittlere Wegstrecke, die pro Position eines Kommissionierauftrags zurückgelegt werden muss
s_{GW}	mittlerer Gassenweg pro Position
s_{GWW}	mittlerer Gassenwechselweg;
s_n	mittlere Wegstrecke beim Picken von n Positionen
s_r	mittlere Wegstrecke, die in einer Gasse beim Picken von r Positionen zurückgelegt wird
s_B	mittlerer Basisweg
$s_{sort,min}$	minimaler Abstand der Sortiergüter
s_o	minimaler Abstand zwischen zwei Objekten
T_{BT}	Batchtakt
T_i	konstanter Zeitanteil der Stromrichtung i
T_{sync}	Synchronisationszeit
T_Z	Zykluszeit
t	mittlere Fahrzeit pro Position
t_a	Beschleunigungszeitanteil
$t_A(c)$	Ausfahrzeit für c Objekten
t_B	mittlere Bearbeitungszeit

t_{basis}	mittlere Basiszeit pro Position
$t_{basis,n}$	mittlere Basiszeit pro Auftrag
t_d	mittlerer Wegzeitanteil für das Picken einer Position
t_{ds}	mittlere Doppelspielzeit
t_{es}	mittlere Einzelspielzeit
$t_E(c)$	Einfahrzeit für c Objekten
$t_{E,P1}$	mittlere Fahrzeit vom Einlagerpunkt zu einem Lagerfach
$t_{F,es}$	mittlere Fahrzeit eines Regalbediengerätes für ein Einzelspiel
$t_{F,ds}$	mittlere Fahrzeit eines Regalbediengerätes für ein Doppelspiel
t_{gab}	Gabelspielzeit
t_{greif}	mittlere Greifzeit
t_{HN}^{ums}	Umschaltzeit von der Hauptstromrichtung auf die Nebenstromrichtung und zurück
t_{ij}^{ver}	Verlustzeit, die bei einer Umschaltung von der Betriebsart i zur Betriebsart j entsteht
t_{ij}^{ums}	Umschaltzeit von Betriebsart i auf Betriebsart j
t_j^{bel}	Fahrzeit durch einen Konfliktbereich eines Objektes der Richtung j
t_K	mittlere Kommissionierzeit pro Position
$t_{K,k}$	mittlere Kommissionierleistung der k -ten Kommissionierstufe
$t_{K,system}$	mittlere Kommissionierleistung eines k -stufigen Kommissioniersystems
t_n	mittlere Wegzeit zur Kommissionierung von Aufträgen mit n Positionen
t_0	konstanter Zeitanteil für Positionieren, Schalten und prüfen ob Fach belegt ist
t_o	mittlere Fahrzeit zu Lagerplätzen oberhalb der Geschwindigkeitsgeraden
$t_{P1,P2}$	mittlere Fahrzeit zwischen zwei beliebigen Punkten in einem Lagerregal
$t_{P2,A}$	mittlere Fahrzeit von einem Lagerfach zum Auslagerpunkt
t_{prod}	produktive Zeit eines Kommissionierers
t_s	mittlere Wegzeit pro Position eine Kommissionierauftrags
t_{sort}	mittlere Sortierzeit pro Position
t_{sp}	mittlere Spielzeit
t_u	mittlere Fahrzeit zu Lagerplätzen unterhalb der Geschwindigkeitsgeraden

t_{ums}	Umschaltzeit
t_{unprod}	unproduktive Zeit eines Kommissionierers
t_{tot}	Totzeit
t_{wart}	stochastisch bedingte Mittlere Wartezeit
t_Z	mittlere Zusammenführungszeit
t_{ZAZ-B}	mittlere Zwischenankunftszeit des Bereitstellsystems
t_{ZAZ-FT}	mittlere Zwischenankunftszeit des Fördersystems
$t_{ZAZ,TK}$	mittlere Zwischenankunftszeit eines Transportknotens
v	Geschwindigkeit
x_u	mittlere Wegstrecke zu einem Lagerplatz unterhalb der Geschwindigkeitsgeraden
$x_{u,ges}$	Summe aller Wegstrecken zu Lagerplätzen unterhalb der Geschwindigkeitsgeraden
y_u	mittlere Wegstrecke zu einem Lagerplatz oberhalb der Geschwindigkeitsgeraden
$y_{u,ges}$	Summe aller Wegstrecken zu Lagerplätzen oberhalb der Geschwindigkeitsgeraden
z_o	konstanter Abstand zwischen zwei Objekten
η_{ver}	Verfügbarkeit eines Kommissionierers
η_{aus}	Auslastbarkeit eines Kommissionierers
λ	Durchsatz/Stromstärke
λ_H	Durchsatz/Stromstärke des Hauptstroms
λ_N	Durchsatz/Stromstärke des Nebenstroms
λ_i	Durchsatz/Stromstärke der Stromrichtung i
$\lambda_{sort,max}$	maximaler Durchsatz einer Sortieranlage
μ_i	partielle Grenzleistung
μ_H	partielle Grenzleistung des Hauptstroms
μ_N	partielle Grenzleistung des Nebenstroms
ν_{ij}	Schaltfrequenz von Richtung i nach Richtung j [1/h]
ω	Regalwandparameter
ρ_i	Verkehrswert
τ_B	Bruttozeitlücke
τ_i	mittlere Zwischenankunftszeit des Stroms i
τ_H	minimale Durchlaufzeit eines Objektes der Hauptstromrichtung
τ_N	minimale Durchlaufzeit eines Objektes der Nebenstromrichtung

Literaturverzeichnis

- [Arn05] ARNOLD, DIETER; FURMANS, KAI: *Materialfluss in Logistiksystemen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2005.
- [Ble00] BLEYMÜLLER, JOSEF; GEHLERT, GÜNTHER; GÜLICHER HERBERT: *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler*. Verlag Vahlen, München, 2000.
- [Blo97] BLOECH, JÜRGEN: *Logistik Total, Vahdens Großes Logistiklexikon*. Vahlen, München, 1997.
- [Car98] CARON, F.; MARCHET, G.; PEREGO A.: *Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems*. International Journal of Production Research, 36, 1998.
- [Car00] CARON, F.; MARCHET, G.; PEREGO A.: *Optimal layout in low-level picker-to-part systems*. International Journal of Production Research, 38, 2000.
- [DIN81] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 15201 Teil 2 – Stetigförderer; Zubehörgeräte*. Beuth-Verlag, Berlin, 1981.
- [FEM03] *FEM 9.851 – Leistungsnachweis für Regalbediengeräte: Spielzeiten*. VDMA Fachgemeinschaft Fördertechnik, Frankfurt, 2003.
- [Fis97] FISCHER, WOLFRAM; DITTRICH, LOTHAR: *Materialfluß und Logistik – Optimierungspotentiale im Transport- und Lagerwesen*. Springer Verlag, Berlin, 1997.
- [Für74] FÜRWENTSCHE, WOLFGANG: *Verfahren zur Planung und Bewertung von Kommissioniersystemen in Stückgut-Warenverteilanlagen des Handels und der Industrie*. Dissertation, TU Berlin, 1974.
- [Gen04] GENSCHER, ULRIKE; BECKER, CLAUDIA: *Schließende Statistik*. Springer Verlag, Berlin, 2004.
- [Goe88] GOETSCHALCKX, MARC; RATLIFF, H. DONALD: *Order Picking In An Aisle*. IIE Transactions, 20, 1988.

- [Gro84] GROSSESCHALLAU, WERNER: *Materialflussrechnung*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1984.
- [Gud73] GUDEHUS, TIMM: *Grundlagen der Kommissioniertechnik – Dynamik der Warenverteil- und Lagersysteme*. Verlag W. Gidaret, Essen, 1973.
- [Gud75] GUDEHUS, TIMM: *Grenzleistungsgesetze für Verzweigungs- und Zusammenführungselemente*. Zeitschrift für Operations Research, (Band 20):B37–B61, 1975.
- [Gud76] GUDEHUS, TIMM: *Grenzleistungsgesetze bei Vorfahrt*. Zeitschrift für Operations Research, 1976.
- [Gud78] GUDEHUS, TIMM: *Die mittlere Zeilenzahl von Sammelaufträgen*. Zeitschrift für Operations Research, (Band 22):B71–B78, 1978.
- [Gud04] GUDEHUS, TIMM: *Logistik – Grundlagen, Strategien, Anwendungen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004.
- [Hal93] HALL, RANDOLPH W.: *Distance Approximation for Routing Manual Pickers in a Warehouse*. IIE Transactions, 25, 1993.
- [Hei98] HEINZ, K.: *Fertigungsvorbereitung I*. Lehrstuhl für Fertigungsvorbereitung, Fakultät Maschinenbau, Dortmund, 1998.
- [Hwa04] HWANG, H.; OH, Y. H.; LEE Y. K.: *An evaluation of routing policies for order-picking operations in low-level picker-to-part system*. International Journal of Production Research, 42, 2004.
- [Jün99] JÜNEMANN, REINHARDT; SCHMIDT, THORSTEN: *Materialfluß und Logistik – Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong, 1999.
- [Jod06] JODIN, DIRK; TEN HOMPEL, MICHAEL: *Sortier- und Verteilsysteme – Grundlagen, Aufbau, Berechnung und Realisierung*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [Kun75] KUNDER, RICHARD; GUDEHUS, TIMM: *Mittlere Wegzeiten beim eindimensionalen Kommissionieren*. Zeitschrift für Operations Research, 1975.
- [Law91] LAW, AVERILL M.; KELTON, DAVID W.: *Simulation Modeling and Analysis 2nd edition*. McGraw-Hill Inc., New York, St. Louis, San Francisco u. a., 1991.
- [Law03] LAW, AVERILL M.: *ExpertFit Version 6 – User’s Guide*. Averill M. Law Associates, 2003.

- [Lip03] LIPPOLT, CHRISTIAN R.: *Spielzeiten in Hochregallagern mit doppelttiefer Lagerung*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2003.
- [Mar04a] MARTIN, HEINRICH: *Materialflusstechnik*. Vieweg-Verlag, 2004.
- [Mar04b] MARTIN, HEINRICH: *Transport und Lagerlogistik*. Vieweg-Verlag, 2004.
- [Mod73] MODD, ; GRAYBILL, ; BOES: *Introduction to the theory of statistics*. McGraw-Hill Education, 1973.
- [Pet99] PETERSEN, CHARLES G.; SCHMENNER, ROGER W.: *An evaluation of Routing and Volume-based Storage Policies in an Order Picking Operation*. Decision Sciences, 30, 1999.
- [Pfo00] PFOHL, H.-CHR.: *Logistiksysteme – Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. Springer-Verlag, 2000.
- [Rad00] RADTKE, AXEL: *Beitrag zur Entwicklung optimierter Betriebsstrategien für Sortiersysteme*. Dissertation, Universität Dortmund, 2000.
- [RAL00] DEUTSCHES INSTITUT FÜR GÜTESICHERUNG UND KENNZEICHNUNG: *RAL-RG614/2 – Güte- und Prüfbestimmungen für Palettenregale*. Beuth-Verlag, Berlin, August 2000.
- [Ran90] RANA, KRISHAN: *Order Picking in Narrow-aisle Warehouses*. International Journal of Physical Distribution and Logistics Management, 1990.
- [Rat83] RATLIFF, H. DONALD; ROSENTHAL, ARNON S.: *Order-Picking in a rectangular Warehouse: A solvable Case of the Traveling Salesman Problem*. Operations Research, 31, 1983.
- [REF97] REFA, VERBAND FÜR ARBEITSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V.: *Methodenlehre der Betriebsorganisation – Datenermittlung*. Carl Hanser Verlag, München, 1997.
- [Sch96] SCHULTE, JOACHIM: *Berechnungsgrundlagen konventioneller Kommissioniersysteme*. Dissertation, Universität Dortmund, Praxiswissen, 1996.
- [tH03] TEN HOMPEL, MICHAEL; SCHMIDT, THORSTEN: *Warehouse Management*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokio, 2003.
- [tH06] TEN HOMPEL, MICHAEL; HEIDENBLUT, VOLKER: *Taschenlexikon Logistik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokio, 2006.
- [VDI70] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2411 – Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen*. Beuth-Verlag, Berlin, Juni 1970.

- [VDI73] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 3590 – Testspiel zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen*. Beuth-Verlag, Berlin, Juli 1973.
- [VDI83] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 3619 – Sortiersysteme für Stückgut*. Beuth-Verlag, Berlin, März 1983.
- [VDI93] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 3657 – Ergonomische Gestaltung von Kommissionierarbeitsplätzen*. Beuth-Verlag, Berlin, Juli 1993.
- [VDI94a] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 3590 Blatt 1 – Kommissioniersysteme – Grundlagen*. Beuth-Verlag, Berlin, März 1994.
- [VDI94b] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 3646 – Spielzeitermittlung von Fördermitteln der Stetigfördertechnik in automatisierten Lagersystemen*. Beuth-Verlag, Berlin, November 1994.
- [VDI95] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 3561 Blatt 2 – Spielzeitermittlung von regalonabhängigen Regalbediengeräten, Entwurf*. Beuth-Verlag, Berlin, Juni 1995.
- [VDI96] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 3561 Blatt 4 – Spielzeitermittlung von automatischen Kanallager-Systemen*. Beuth-Verlag, Berlin, Dezember 1996.
- [VDI97] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2340 – Ein- und Ausschleusungen von Stückgütern, Übersicht, Aufbau und Arbeitsweise*. Beuth-Verlag, Berlin, März 1997.
- [VDI98a] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 3311 Entwurf – Beleglose Kommissioniersysteme*. Beuth-Verlag, Berlin, November 1998.
- [VDI98b] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 3312 Entwurf – Sortieren im logistischen Prozeß*. Beuth-Verlag, Berlin, Dezember 1998.
- [VDI98c] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 3978 – Durchsatz und Spielzeit in Fördersystemen*. Beuth-Verlag, Berlin, August 1998.
- [VDI99] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 4415 – Automatisierte Kommissionierung*. Beuth-Verlag, Berlin, Oktober 1999.
- [VDI02a] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 3590 Blatt 2 – Kommissioniersysteme – Systemfindung*. Beuth-Verlag, Berlin, Juli 2002.
- [VDI02b] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 3590 Blatt 3 – Kommissioniersysteme – Praxisbeispiele*. Beuth-Verlag, Berlin, August 2002.

- [ZH103] ZENTRALSTELLE FÜR UNFALLVERHÜTUNG UND ARBEITSMEDIZIN –
HAUPTVERBAND DER GEWERBLICHEN BG: *ZH 1/428 – Richtlinien für La-
gereinrichtungen und -geräte*. Carl Heymanns Verlag, Köln, Januar 2003.

Kapitel 9

Anhang

Randomstream	SchmÜ		StOW		StMW	
	GW	GWW	GW	GWW	GW	GWW
1	214,44	46,59	81,37	46,59	109,58	46,56
2	213,89	46,56	81,11	46,56	109,35	46,53
3	214,25	46,57	81,03	46,58	109,21	46,55
4	213,91	46,66	80,75	46,66	109,95	46,63
5	214,05	46,56	81,07	46,56	109,23	46,53
Mittelwert	214,11	46,59	81,07	46,59	109,27	46,56
Standardabweichung	0,23	0,04	0,22	0,04	0,23	0,04

Tabelle 9.1: Gassen- und Gassenwechselwege bei unterschiedlichen Randomstreams, System 2, zehn Positionen pro Auftrag

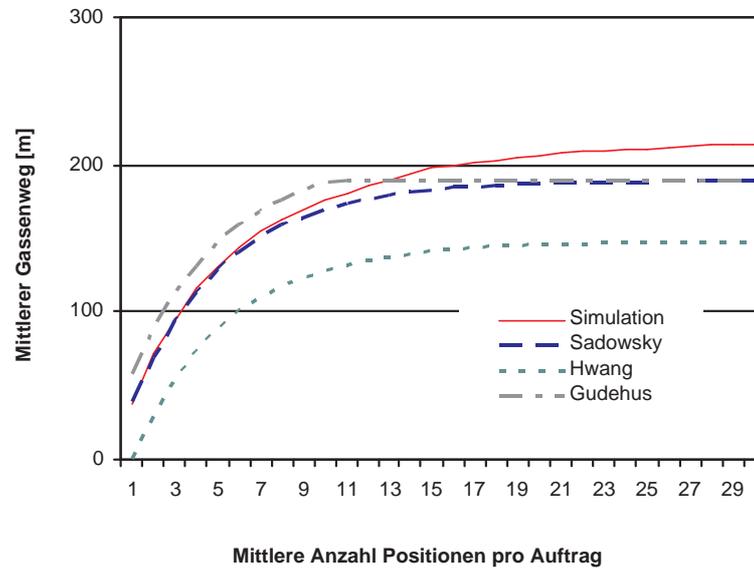


Abbildung 9.1: Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen

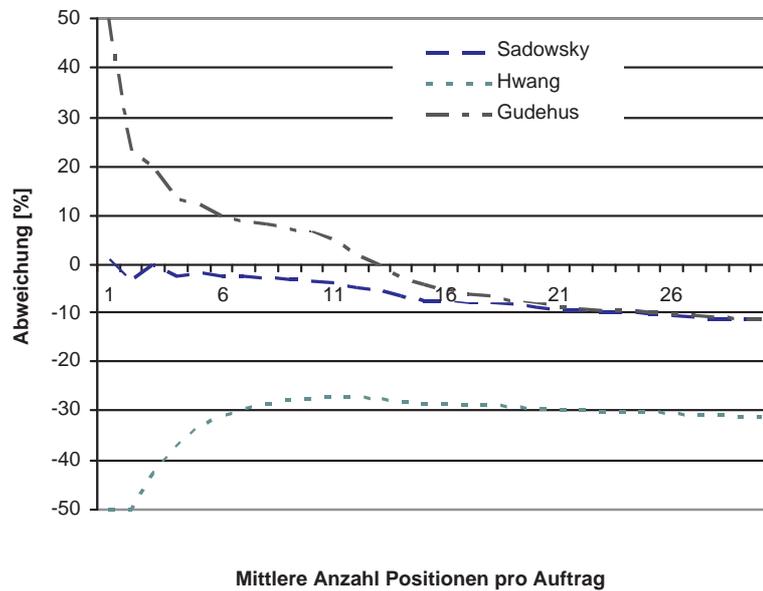


Abbildung 9.2: Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen

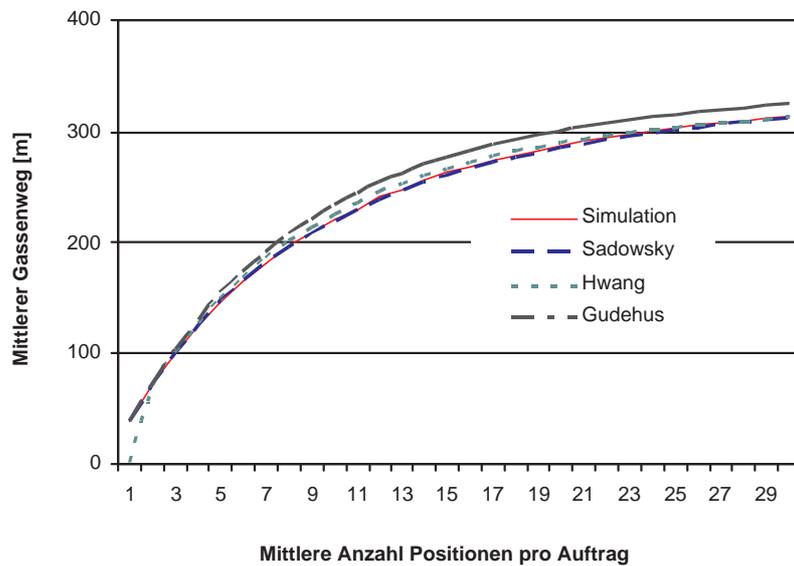


Abbildung 9.3: Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung

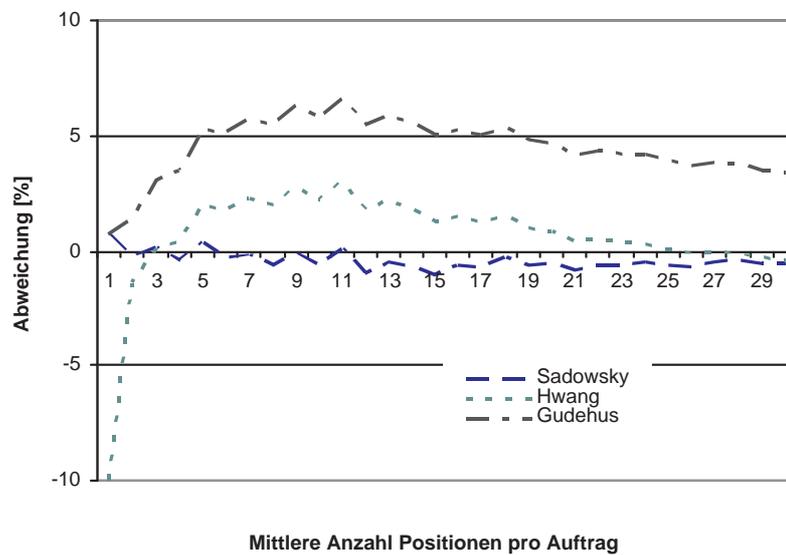


Abbildung 9.4: Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung

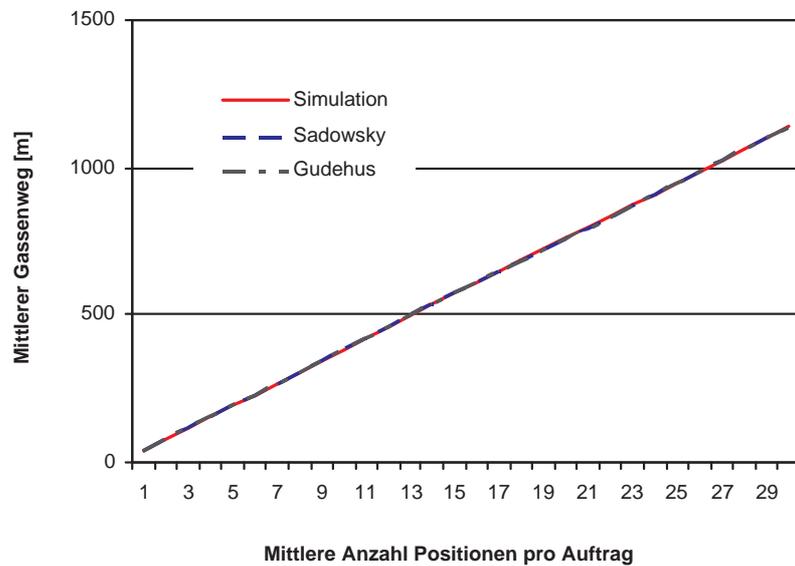


Abbildung 9.5: Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung

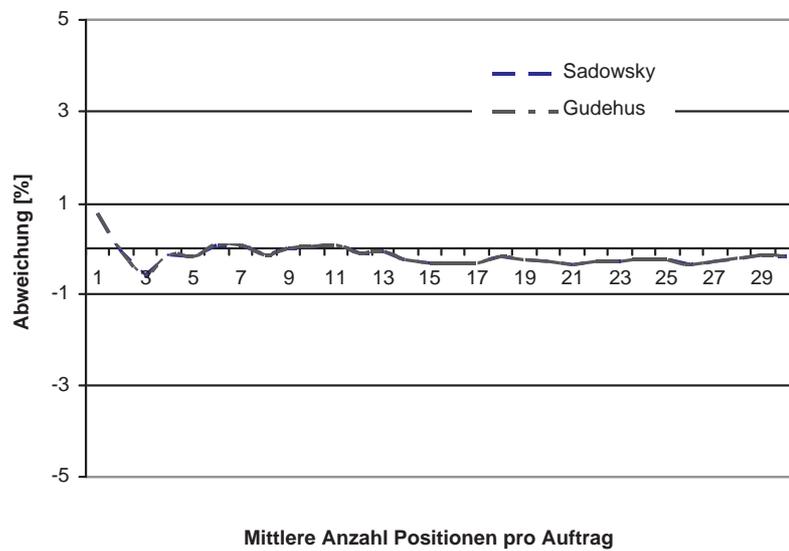


Abbildung 9.6: Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung

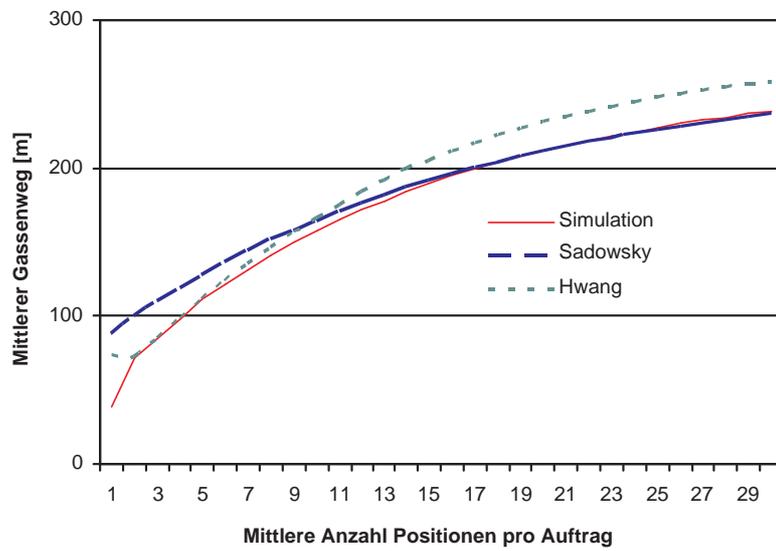


Abbildung 9.7: Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik

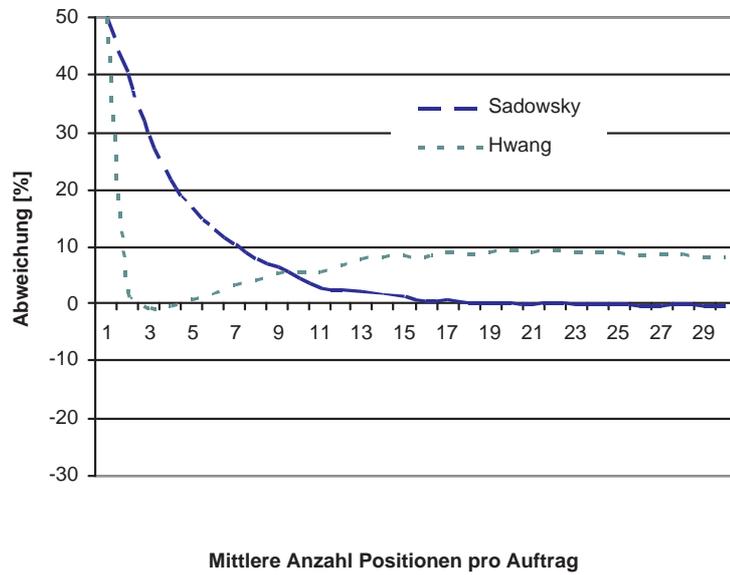


Abbildung 9.8: Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik

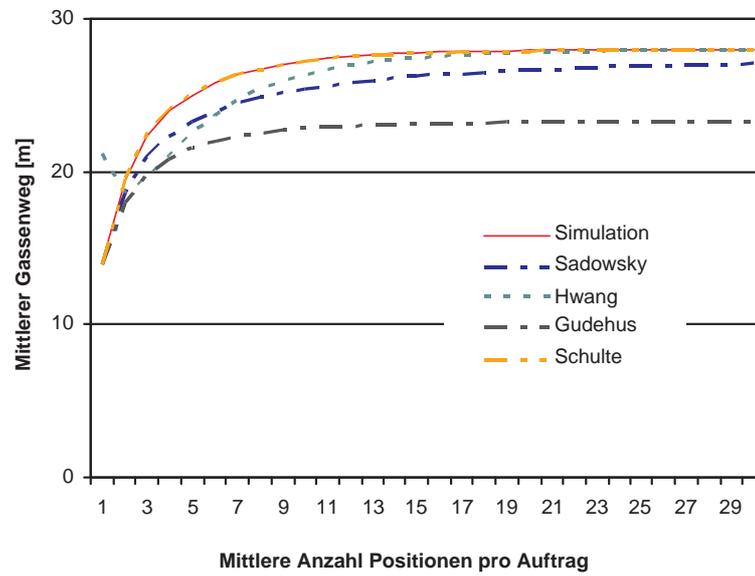


Abbildung 9.9: Gassenwechselweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit

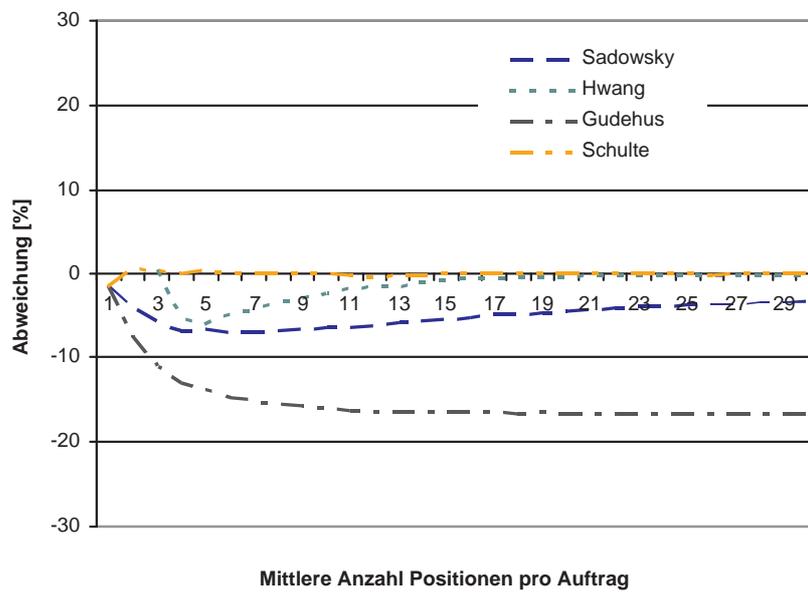


Abbildung 9.10: Prozentuale Abweichung der berechneten Gassenwechselwege von der Simulation; System 1; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit

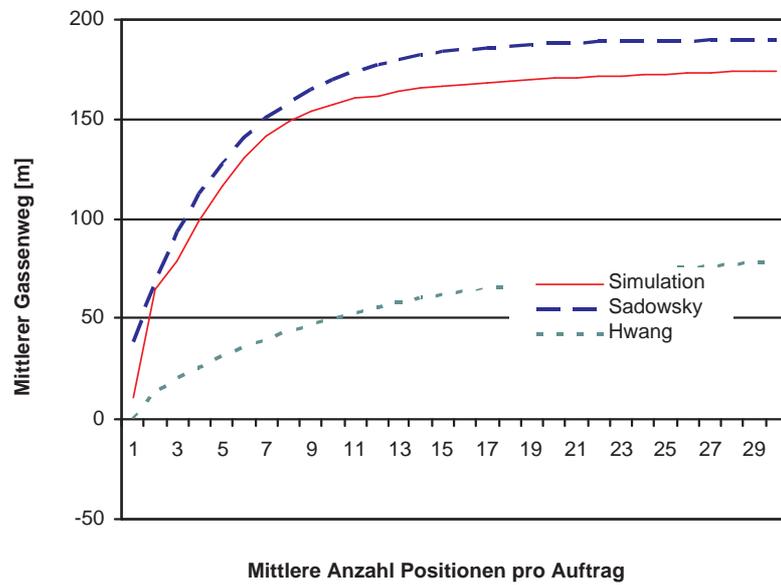


Abbildung 9.11: Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen

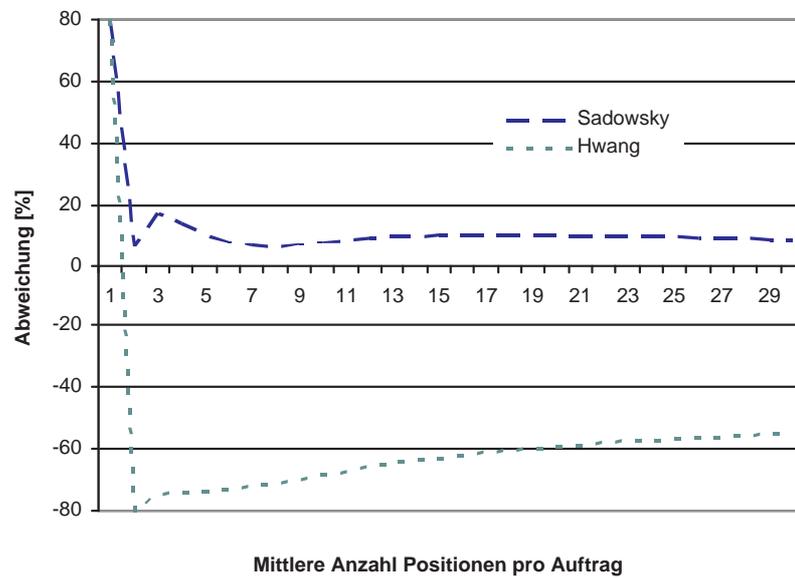


Abbildung 9.12: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs von der Simulation; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen

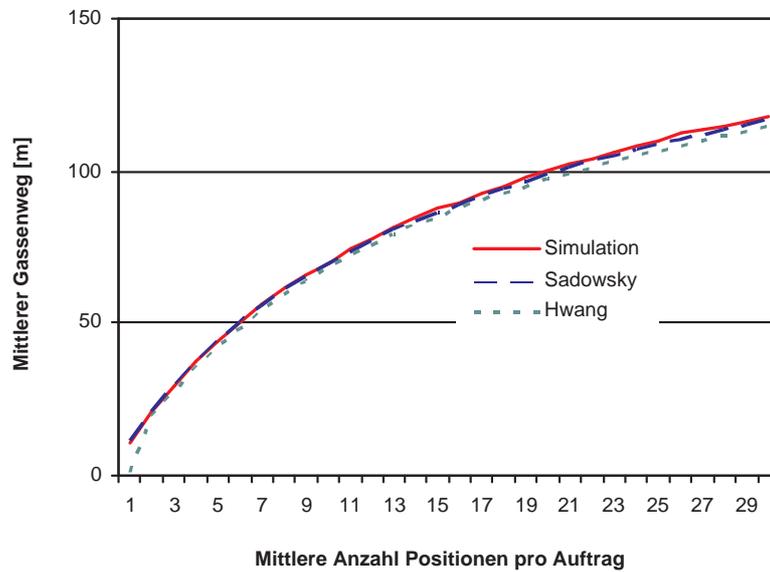


Abbildung 9.13: Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung

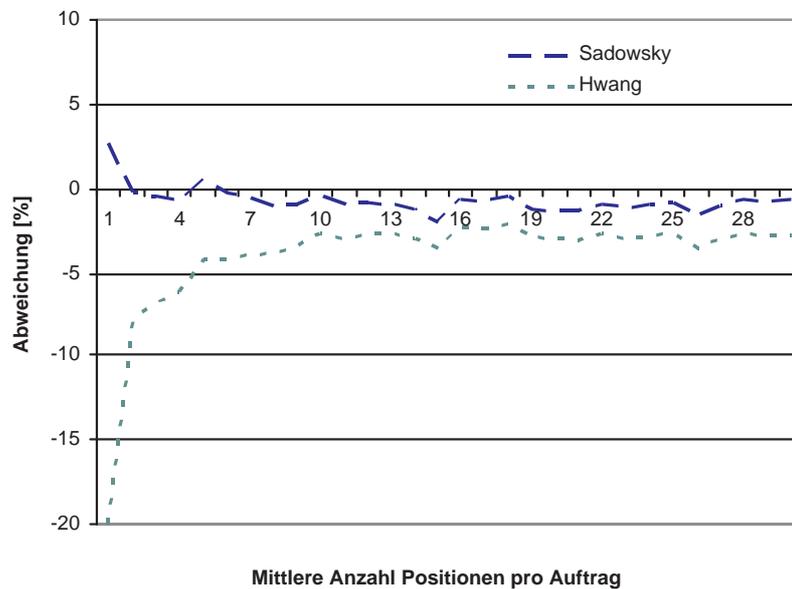


Abbildung 9.14: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung

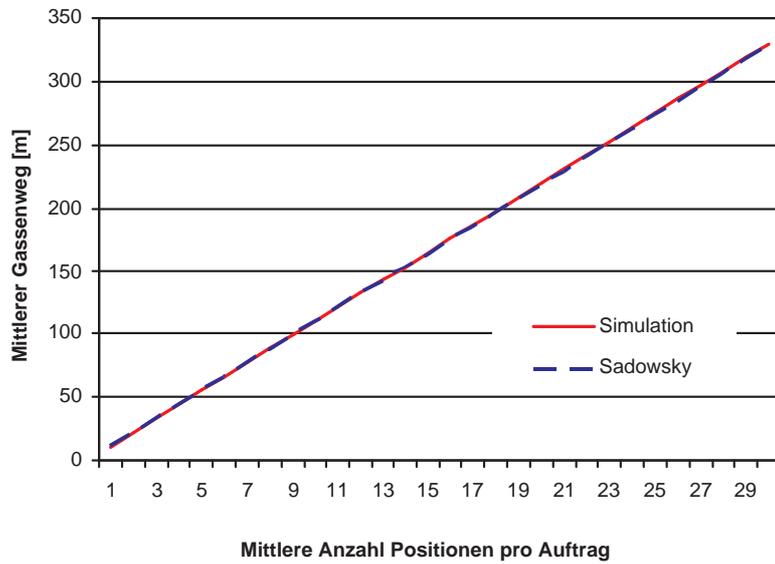


Abbildung 9.15: Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung

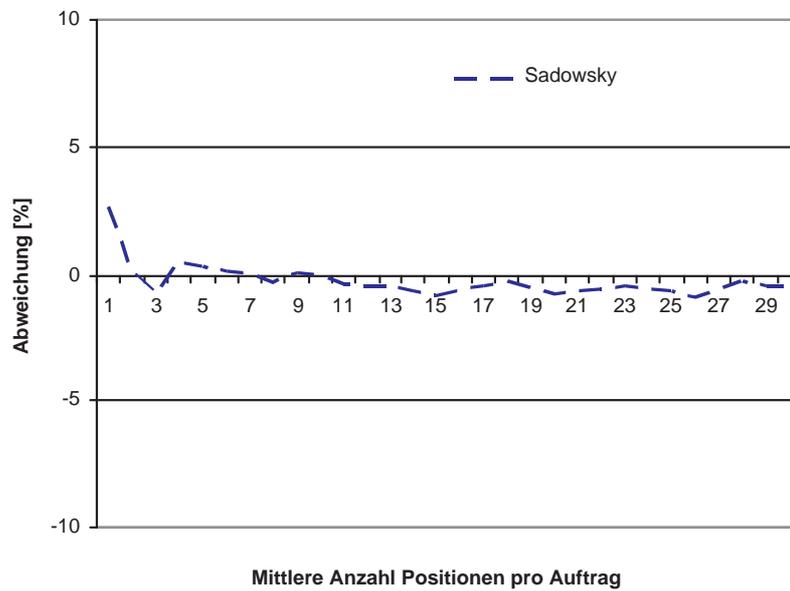


Abbildung 9.16: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs von der Simulation; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung

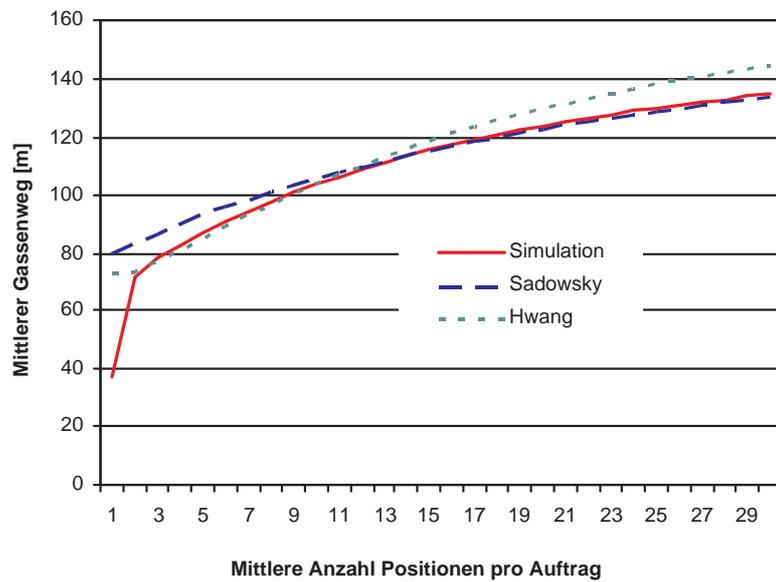


Abbildung 9.17: Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik

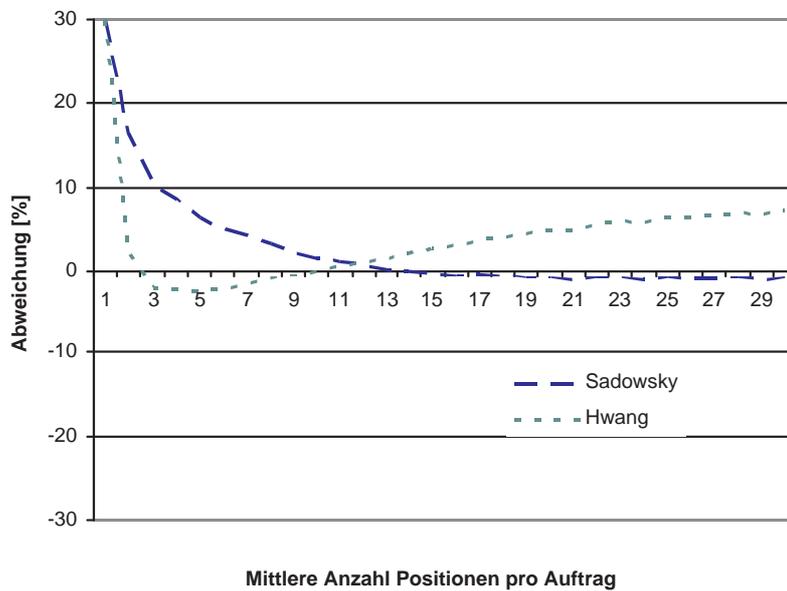


Abbildung 9.18: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs von der Simulation; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik

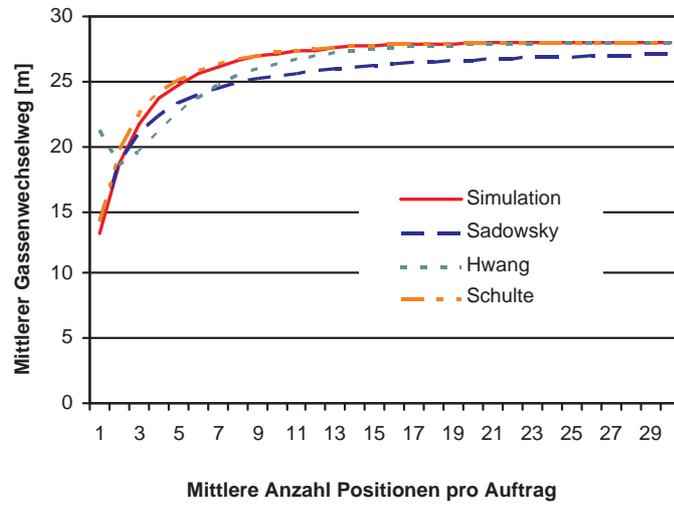


Abbildung 9.19: Gassenwechselweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit

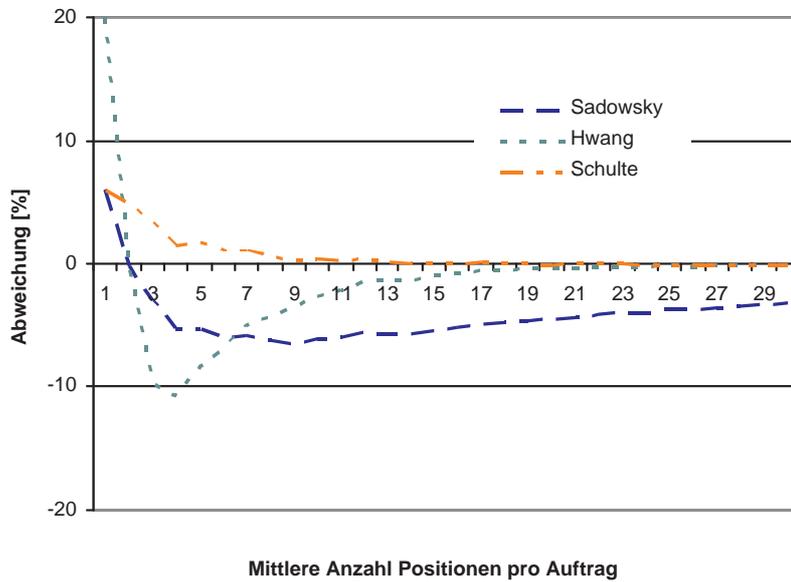


Abbildung 9.20: Prozentuale Abweichung der berechneten Gassenwechselwege von der Simulation; System 1; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit

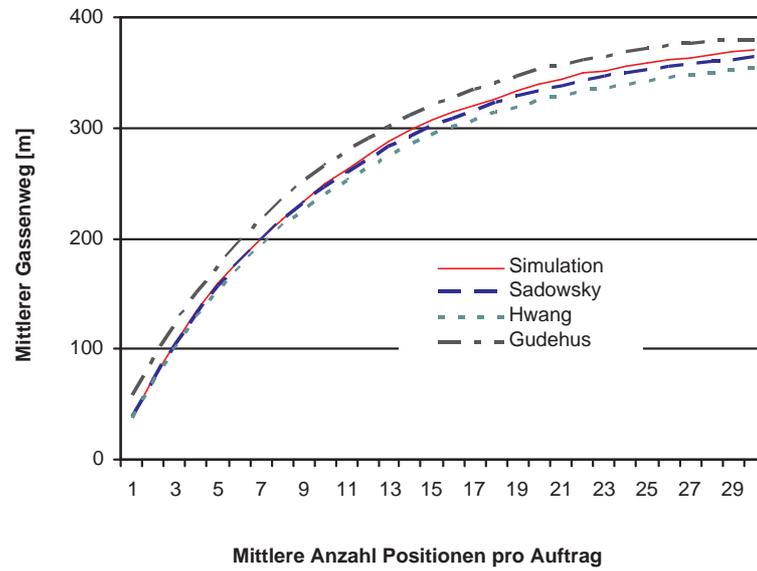


Abbildung 9.21: Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen

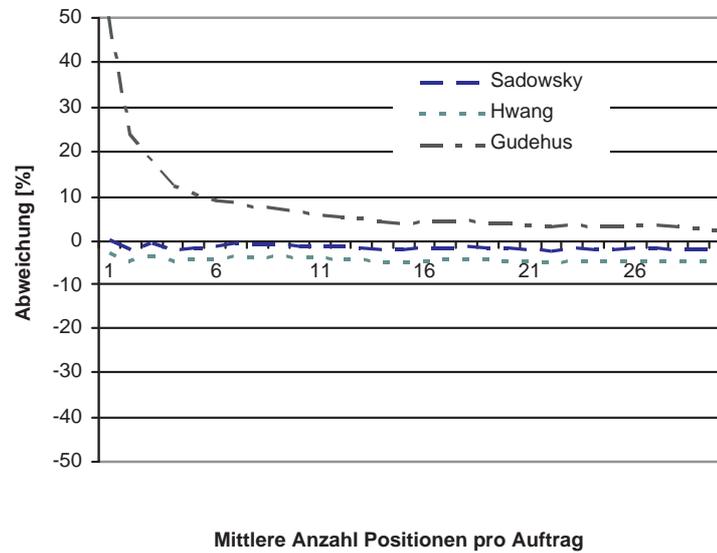


Abbildung 9.22: Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen

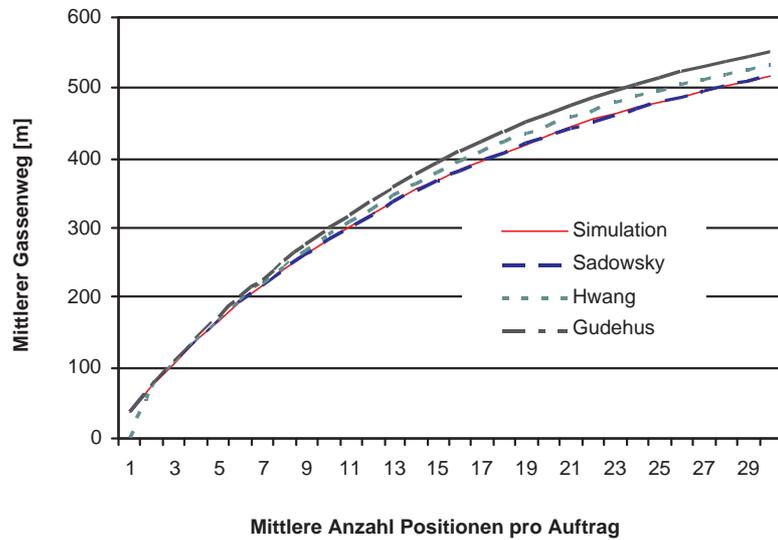


Abbildung 9.23: Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung

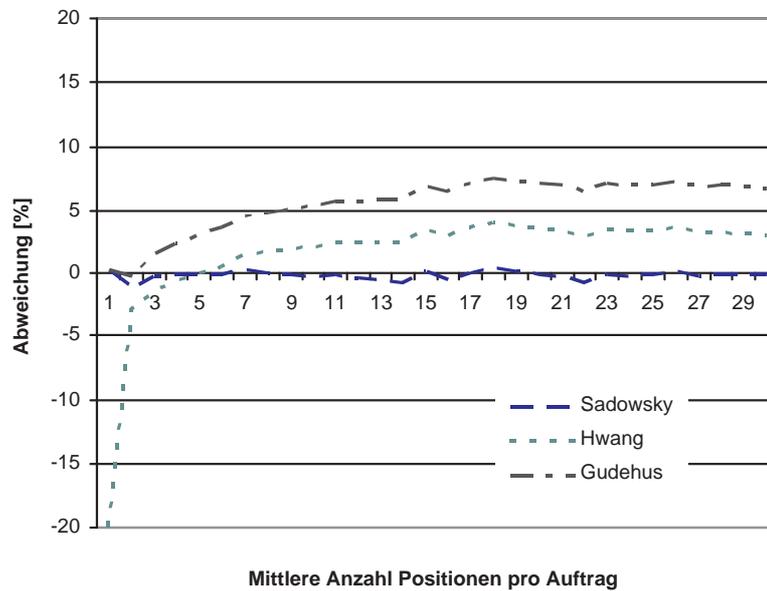


Abbildung 9.24: Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung

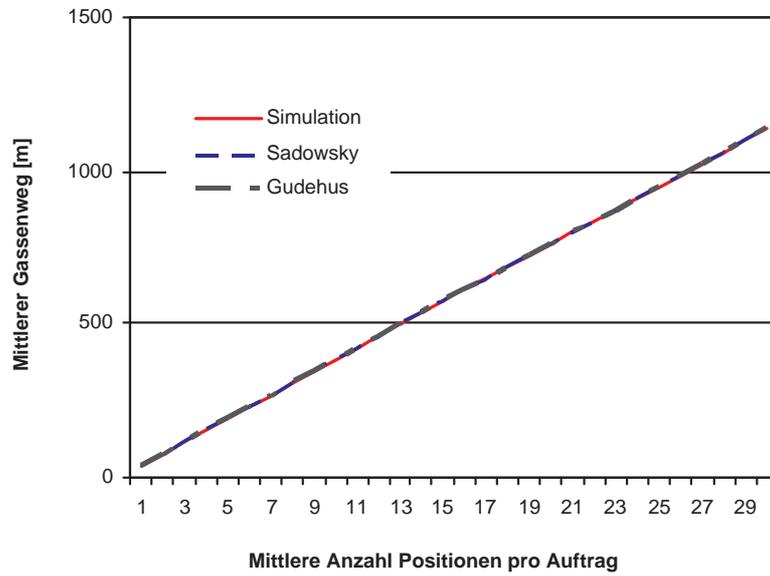


Abbildung 9.25: Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung

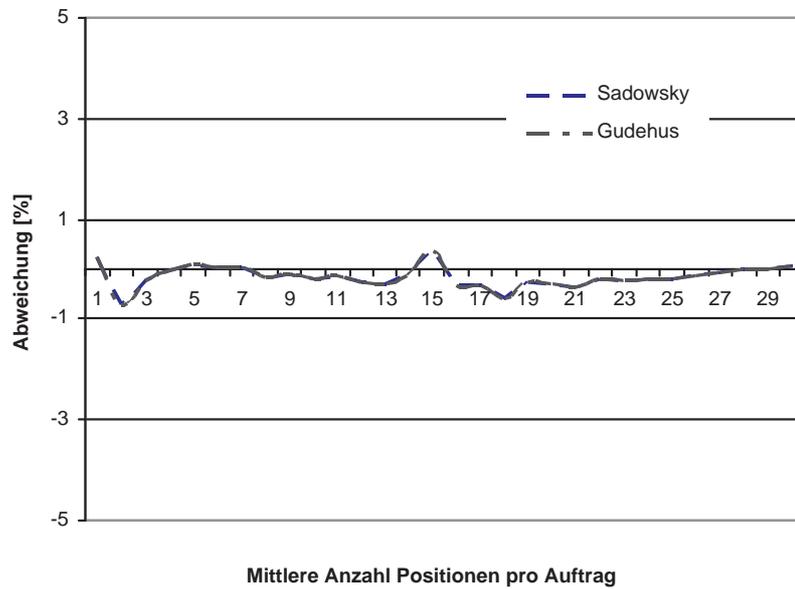


Abbildung 9.26: Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung

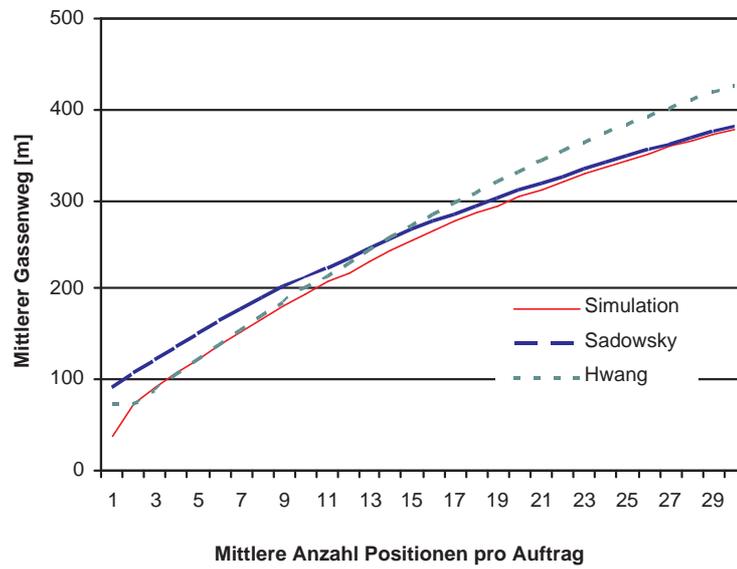


Abbildung 9.27: Wegstrecke in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik

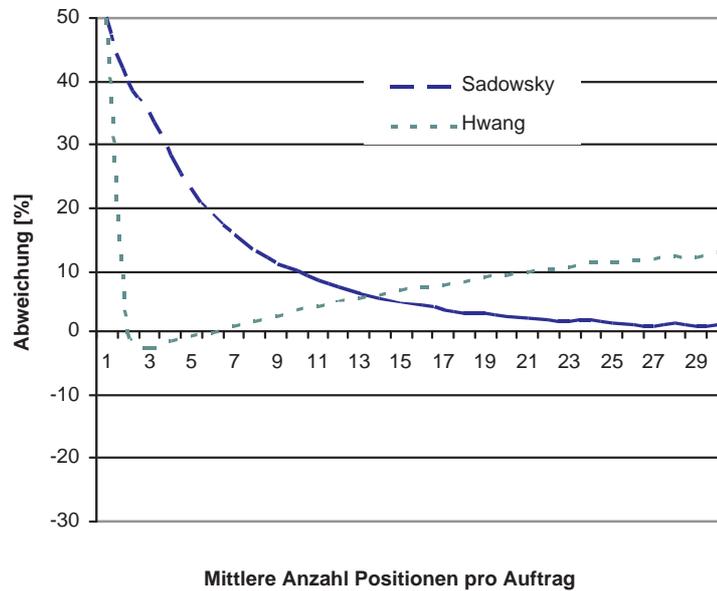


Abbildung 9.28: Prozentuale Abweichung der berechneten Wegstrecke von der Simulation; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik

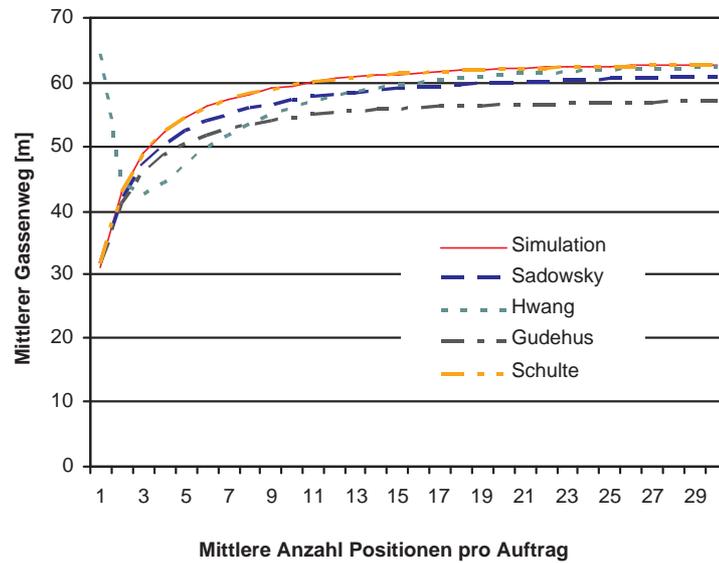


Abbildung 9.29: Gassenwechselweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit

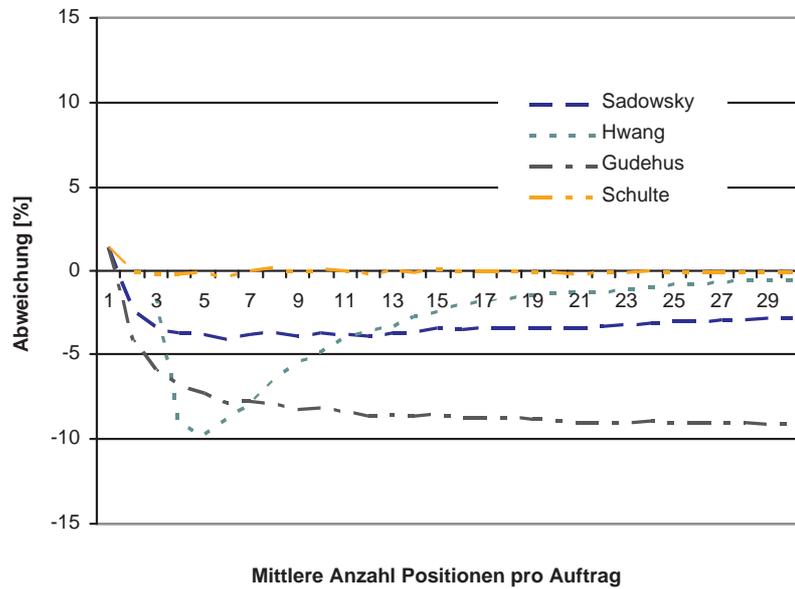


Abbildung 9.30: Prozentuale Abweichung der berechneten Gassenwechselwege von der Simulation; System 3; gleichverteilte Zugriffshäufigkeit

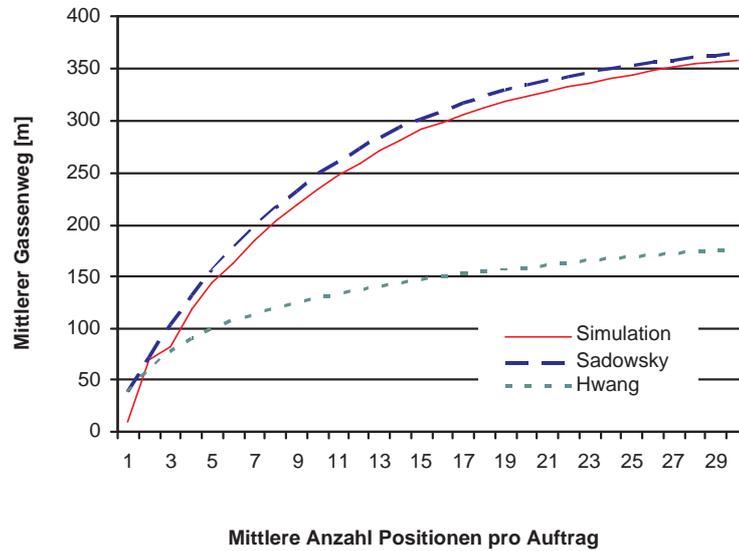


Abbildung 9.31: Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen

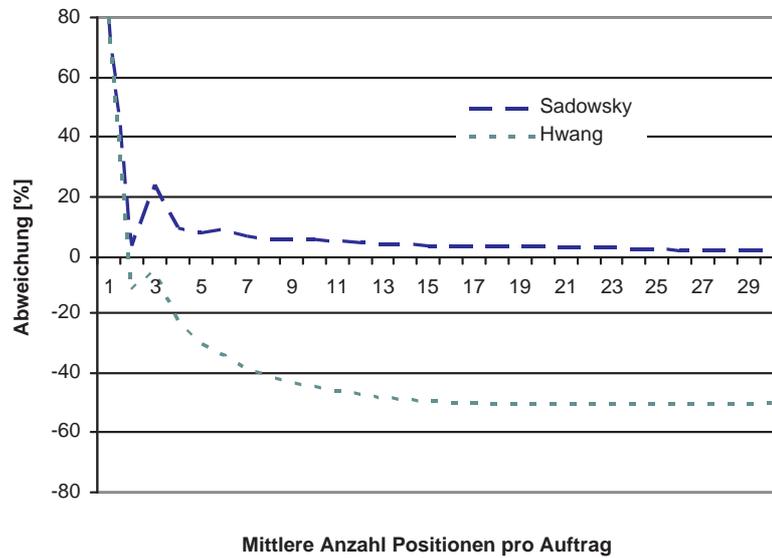


Abbildung 9.32: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs von der Simulation; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Schleifenstrategie mit Überspringen

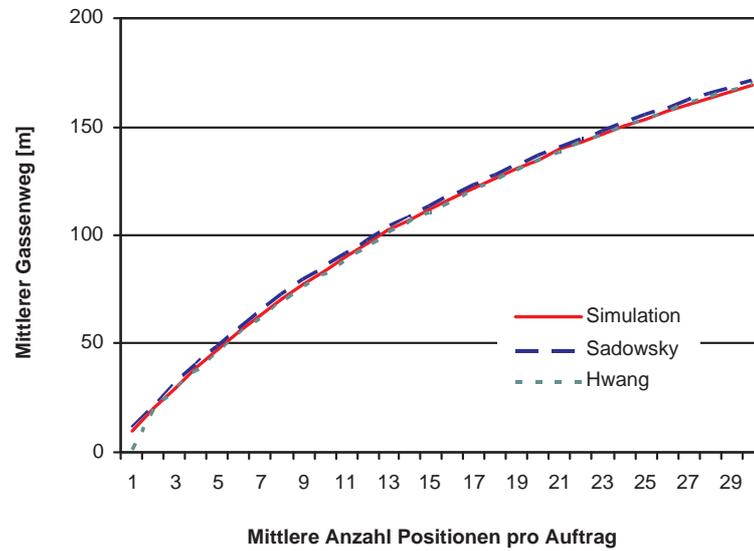


Abbildung 9.33: Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung

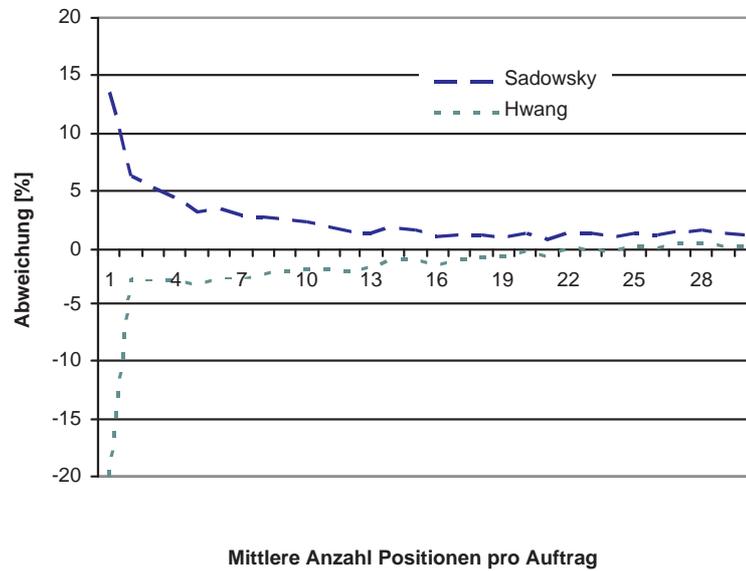


Abbildung 9.34: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie ohne Wiederholung

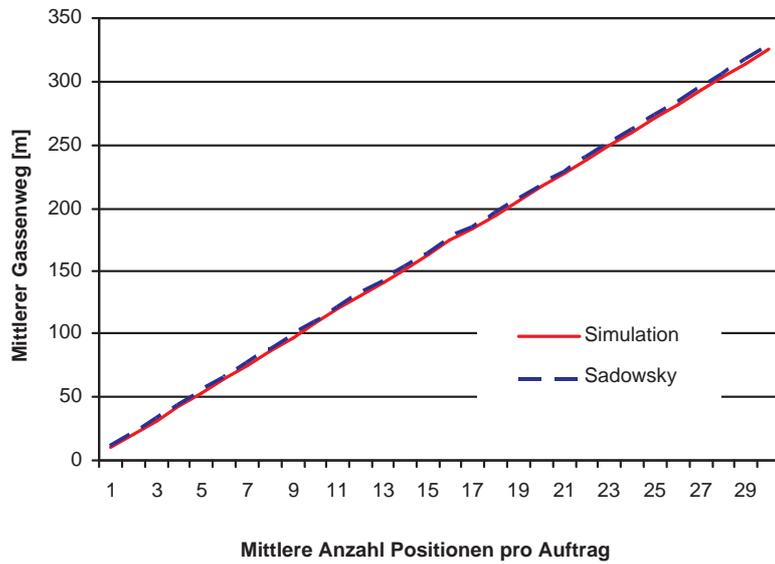


Abbildung 9.35: Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung

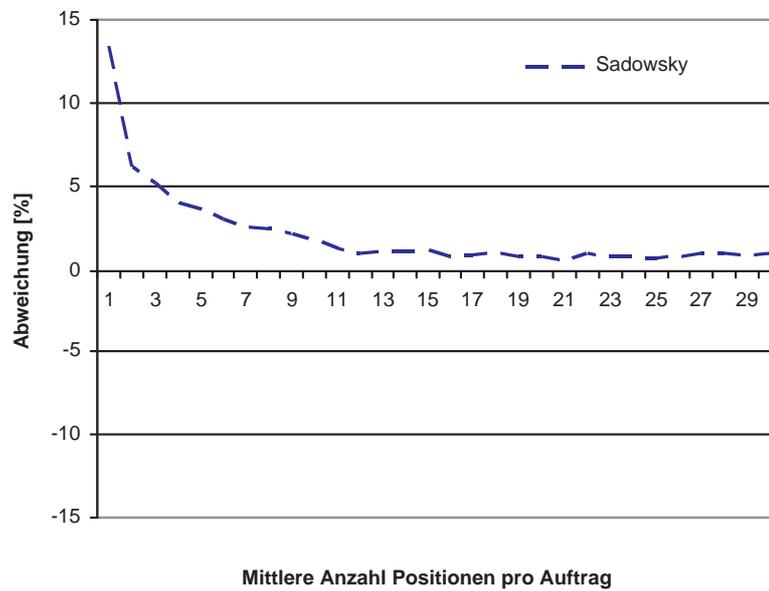


Abbildung 9.36: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Stichgangstrategie mit Wiederholung

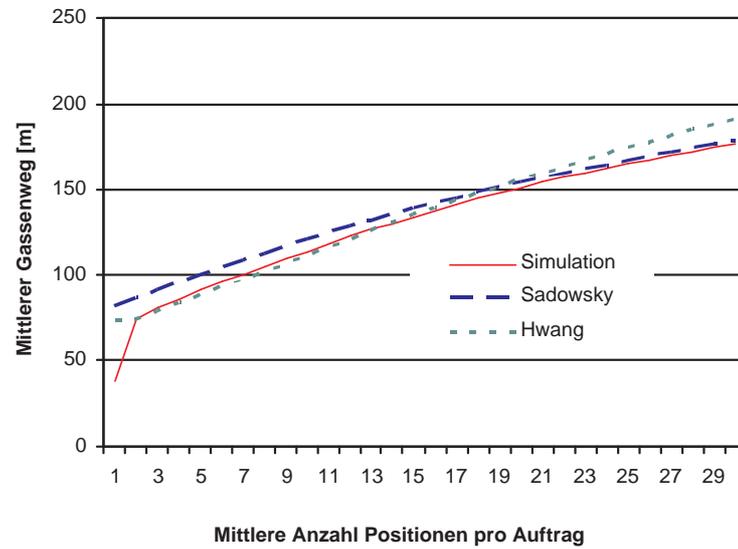


Abbildung 9.37: Gassenweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik

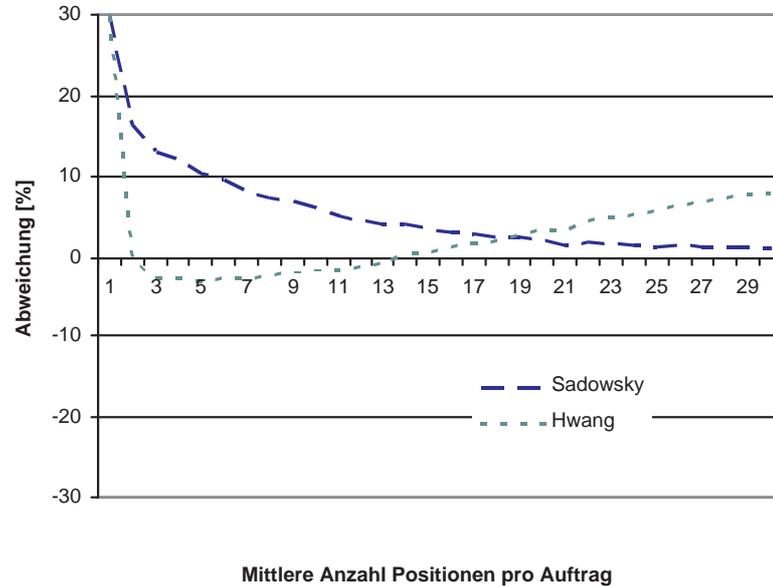


Abbildung 9.38: Prozentuale Abweichung des berechneten Gassenwegs von der Simulation; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit – Mittelpunkt-Heuristik

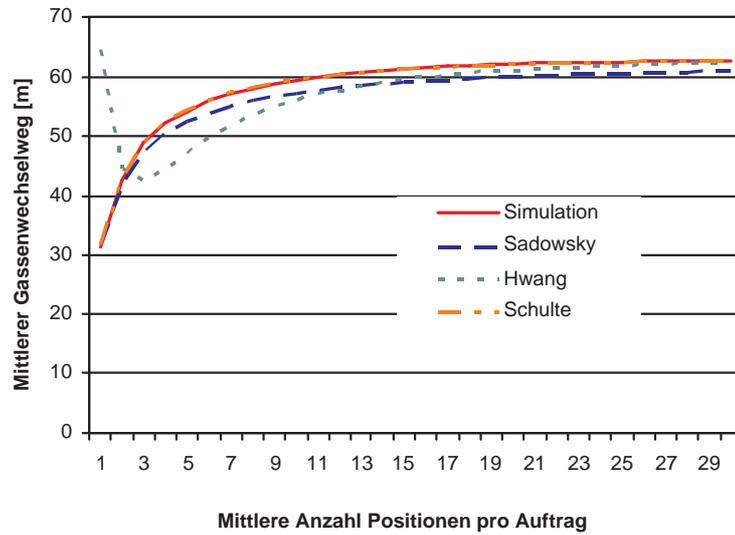


Abbildung 9.39: Gassenwechselweg in Abhängigkeit von der Positionenanzahl; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit

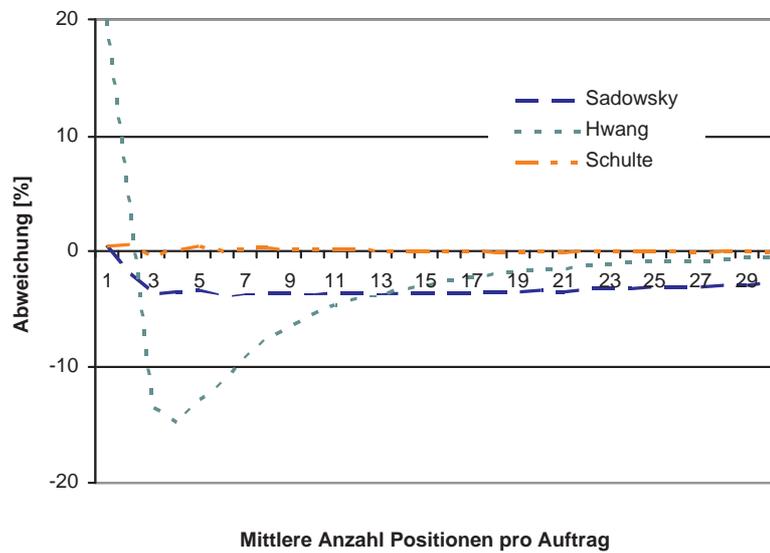


Abbildung 9.40: Prozentuale Abweichung der berechneten Gassenwechselwege von der Simulation; System 3; exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Volker Sadowsky
Geburtsdatum: 23. Februar 1972
Geburtsort: Hamm

Schulausbildung

08/1978 - 06/1982 Von-Vincke-Grundschule Hamm
08/1982 - 06/1991 Galilei-Gymnasium in Hamm
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Wehrdienst

07/1991 - 06/1992 Sanitätsbataillon 7, Hamm

Studium

10/1992 - 09/1999 Maschinenbaustudium an der
Universität Dortmund
Schwerpunkt: Materialflusstechnik
Abschluss: Dipl.-Ing. Maschinenbau

Berufstätigkeit

10/1999 - 09/2006 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am
Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen,
Universität Dortmund

seit 10/2006 BEUMER Maschinenfabrik GmbH & Co. KG
in Beckum