

Kommissionierung

Michael ten Hompel • Volker Sadowsky
Maria Beck

Kommissionierung

Materialflusssysteme 2 – Planung und
Berechnung der Kommissionierung in der
Logistik



Springer

Prof. Dr. Michael ten Hompel
Fraunhofer-Institut für Materialfluss
und Logistik (IML)
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4
44227 Dortmund
Deutschland
M.tenHompel@iml.fraunhofer.de

Maria Beck
Technische Universität Dortmund
Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen
Emil-Figge-Straße 73
44221 Dortmund
Deutschland
maria.beck@flw.mb.tu-dortmund.de

Dr.-Ing. Volker Sadowsky
Technische Universität Dortmund
Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen
Emil-Figge-Straße 73
44221 Dortmund
Deutschland
volker.sadowsky@flw.mb.tu-dortmund.de

ISBN 978-3-540-29622-5 e-ISBN 978-3-540-29940-0
DOI 10.1007/978-3-540-29940-0
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zu widerhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Geleitwort

Dieses Buch ist Bestandteil der Reihe „Intralogistik“ , die in systematischer Herangehensweise das gesamte Feld der Intralogistik zwischen Informationstechnologie, Technik, Steuerung und Systemgestaltung aufarbeitet.

Die Kommissionierung als eine Komponente der Intralogistik ist einer der komplexesten und personalintensivsten Bereiche der logistischen Kette. Die Planung und Optimierung von Kommissioniersystemen stellt aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen immer wieder eine große Herausforderung dar. Als Einstieg in diesen Themenkomplex werden in diesem Buch die vielfältigen Aspekte dieses Teilbereichs erstmals zusammenfassend dargestellt.

Herzlich gedankt für ihre Mitwirkung bei der Gestaltung von Beiträgen sei Frau Kauke, Herrn Jung, Herrn Pelka, Herrn Prasse und Herrn Zellerhoff.

Für die Erstellung von Abbildungen und Tabellen gilt der Dank Herrn Breukmann und Herrn Heinzelmann, für die Recherche und Formatierung Herrn Kinkel und Herrn Splettstößer. Gedankt wird abschließend den Vertretern der Unternehmen für die Bereitstellung von Fotomaterial und darüber hinaus den Firmen Pharmlog, Vanderlande Industries, LSCC und Beumer Maschinenfabrik für die Bereitstellung von Unterlagen zur Erstellung der Beispiele für Materialflusssysteme.

Dortmund, Winter 2010

*Michael ten Hompel
Volker Sadowsky
Maria Beck*

Die Intralogistik als identitätsstiftende und inhaltliche Klammer dieser Buchreihe spannt das Feld von der Organisation, Durchführung und Optimierung innerbetrieblicher Materialflüsse, die zwischen den unterschiedlichen Logistikknoten stattfinden, über die dazugehörigen Informationsströme bis hin zum Warenaumschlag in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen auf. Dabei steuert sie im Rahmen des Supply Chain Managements den gesamten Materialfluss entlang der Wertschöpfungskette. Innerhalb dieses Spektrums präsentieren und bearbeiten die Buchtitel der Reihe Intralogistik als eigenständige Grundlagenwerke thematisch fokussiert und eng verzahnt die zahlreichen Facetten dieser eigenständigen Disziplin und technischen Seite der Logistik.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Kommissionieren als Teilfunktion in Materialflusssystemen	3
2.1	Begriffsbestimmung	3
2.1.1	Kommissionieren	3
2.1.2	System	4
2.1.3	Kommissioniersystem	6
2.1.4	Kundenaufträge und Kommissionieraufträge	8
2.2	Integration der Kommissionierung in Materialflusssystemen	9
2.2.1	Abgrenzung und Schnittstellen	9
2.2.2	Horizontale Einordnung der Kommissionierung	11
2.2.3	Vertikale Einordnung der Kommissionierung	13
2.3	Einflussgrößen auf die Kommissionierung	13
2.4	Existierende Richtlinien und deren Anwendung	16
3	Grundlagen der Kommissionierung	19
3.1	Materialfluss	19
3.1.1	Transport der Güter zur Bereitstellung	21
3.1.2	Bereitstellung	22
3.1.3	Fortbewegung des Kommissionierers zur Bereitstellung	24
3.1.4	Entnahme der Güter durch den Kommissionierer	25
3.1.5	Abgabe der Entnahm- bzw. Kommissioniereinheit	26
3.1.6	Transport der Entnahm- bzw. Kommissioniereinheit zur Abgabe	27
3.1.7	Rücktransport der angebrochenen Lagereinheiten	27
3.2	Informationsfluss	28
3.2.1	Erfassung der Kundenaufträge	29
3.2.2	Auftragsaufbereitung	29
3.2.3	Weitergabe des Kommissionierauftrags	32
3.2.4	Quittierung der Kommissionierung	32
3.3	Organisation	32

3.3.1	Aufbauorganisation	33
3.3.2	Ablauforganisation	34
3.3.3	Betriebsorganisation	40
3.4	Grundprinzipien der Kommissionierung	41
4	Technische Komponenten von Kommissioniersystemen	43
4.1	Technische Funktionselemente	43
4.1.1	Lagermittel	43
4.1.2	Fördermittel	45
4.1.3	Handhabungsmittel	50
4.1.4	Ladehilfsmittel	51
4.2	Informationstechnische Kommissioniererführung	52
4.2.1	Pickliste	52
4.2.2	Stationäre Terminals	53
4.2.3	Pick-by-light	54
4.2.4	Put-to-light	55
4.2.5	Mobile Terminals	55
4.2.6	Pick-by-voice	57
4.3	Neue Ansätze	59
4.3.1	Visionäre Systeme – Augmented Reality	59
4.3.2	Regalpicker	63
5	Systemtypen in der Kommissionierung	65
5.1	Person-zur-Ware-Systemtypen	66
5.1.1	Konventionelles Kommissionieren	66
5.1.2	Kommissioniernest	68
5.1.3	Kommissionertunnel	69
5.1.4	Manuelle Kommissionierung mit FTF	70
5.1.5	Kommissionieren im Hochregal	71
5.1.6	Manuelle Kommissionierung mit Bahnhöfen	72
5.1.7	Manuelle Kommissionierung – Kombination aus Durchlauf- und Fachbodenregalen	73
5.1.8	Verfahrbarer Kommissionierroboter	74
5.2	Ware-zur-Person-Systemtypen	76
5.2.1	Kommissionierstation mit Behälterregalanbindung	76
5.2.2	Kommissionierstation mit Shuttlesystemanbindung	78
5.2.3	Kommissionierstation mit Horizontal-Umlaufregalanbindung	79
5.2.4	Vertikal-Umlaufregale und Liftsysteme	80
5.2.5	Stationärer Kommissionierroboter mit Palettenregalanbindung	82
5.2.6	Schachtkommissionierer	83
5.2.7	Automatisches Kollipicken	85
5.3	Kombinierte Systemtypen	86
5.3.1	Zweistufige Kommissionierung mit Pick-to-belt	86
5.3.2	Kommissionieren entlang einer Regalfront am AKL	87

5.3.3	Inverses Kommissionieren	89
6	Optimierung von Kommissioniersystemen	91
6.1	Strategien zur Produktivitätssteigerung	91
6.1.1	Lagerplatzvergabestrategien	92
6.1.2	Wegstrategien	95
6.1.3	Einlastungsreihenfolge von Kommissionieraufträgen	100
6.1.4	Optimierungspotenziale in zweistufigen Kommissioniersystemen	103
6.2	Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung	110
6.3	Ergonomische Gestaltung	111
6.3.1	Grundlagen der Ergonomie	112
6.3.2	Arbeitsplätze im Kommissionierbereich	117
6.3.3	Richtlinien und Normen	123
7	Leistungsermittlung von Kommissioniersystemen	127
7.1	Allgemeiner Berechnungsansatz	127
7.2	Ermittlung von Bearbeitungszeiten	132
7.3	Ermittlung der Zusammenführungszeit – Person-zur-Ware	138
7.3.1	Gassengebundene Betrachtung	140
7.3.2	Gassenungebundene Betrachtung	154
7.4	Ermittlung der Zusammenführungszeit – Ware-zur-Person	171
7.4.1	Zwischenankunftszeit des Bereitstellsystems	171
7.4.2	Zwischenankunftszeit der Fördertechnik	184
7.5	Berechnungsbeispiel	200
8	Planung von Kommissioniersystemen	207
8.1	Basisdatenermittlung und Datenanalyse	207
8.2	Kenngrößen zur Planung von Kommissioniersystemen	210
8.2.1	Quantitative Kenngrößen	211
8.2.2	Qualitative Kriterien	216
8.3	Entscheidungsfindung in der Kommissionierung	217
8.4	Dimensionierung typischer Arbeitsmittelvarianten	221
8.5	Simulation von Materialflusssystemen	233
8.5.1	Einsatzfelder der diskreten Simulation	236
8.5.2	Vorgehensweise bei Simulation von Intralogistiksystemen	238
8.5.3	Anwendung der Simulation in der Kommissionierung	244
8.6	Benchmarking	247
9	Systembeispiele	251
9.1	Person-zur-Ware-Kommissioniersystem	251
9.1.1	Ausgangssituation	251
9.1.2	Systembeschreibung	252
9.2	Mehrzoniges Kommissioniersystem	257
9.2.1	Ausgangssituation	257
9.2.2	Systembeschreibung	259

9.3 Zweistufiges Kommissioniersystem	262
9.3.1 Ausgangssituation	262
9.3.2 Systembeschreibung.....	262
Zentrale Formeln im Überblick	267
Formelzeichen	280
Literaturverzeichnis	287
Sachverzeichnis	293

Kapitel 1

Einleitung

In dem umfassenden Gebiet der Materialflusssysteme bilden die Kommissioniersysteme eine herausragende Gruppe. Nicht selten erzielen Unternehmen durch anforderungsgerechte Kommissioniersysteme einen wesentlichen Wettbewerbsvorteil in Bezug auf Leistung und Servicequalität gegenüber ihren Mitbewerbern.

Die Anforderungen, die seitens des Kunden an ein Unternehmen in Bezug auf die Leistungserfüllung gestellt werden, haben in den letzten Jahren stark zugenommen. Speziell im Segment der Belieferung des Endkunden ist eine Reduzierung der Auftragsgröße und ein erhöhtes Aufkommen von kleinteiligen Sendungen zu beobachten. Dieser als „Atomisierung der Sendungsgröße“ bezeichnete Umstand führt zu hohen Anforderungen an die Warendistribution in Bezug auf Lieferzeit, Durchsatz und Flexibilität. Auch in der Zukunft wird die Erfüllung dieser Kundenanforderungen ein entscheidender Wettbewerbsfaktor sein. Eine wesentliche Komponente zur Umsetzung dieser Unternehmensaufgabe ist ein funktionierendes Kommissioniersystem.

Um allen Anforderungen gerecht zu werden, wurden zahlreiche Variationsmöglichkeiten zur Gestaltung des Kommissionierbereichs entwickelt. In den letzten Jahren wurden immer wieder neue hochautomatisierte Lösungen oder intelligente Konzepte für die manuelle Kommissionierung geschaffen.

Es ist nur schwer möglich, alle Variationsmöglichkeiten vollständig abzubilden, da durch die spezifischen Gegebenheiten eines jeden Unternehmens verschiedene Aspekte wichtig sind und sich immer wieder neue Varianten ergeben. Bei der Planung eines Kommissioniersystems muss die Entscheidung für die am besten geeignete Systemvariante deshalb im Einzelfall getroffen werden.

Die Kommissionierung ist ein wesentlicher Bestandteil eines logistischen Gesamtsystems und Gegenstand zahlreicher Publikationen und Forschungsarbeiten im Bereich der Intralogistik. Trotz der großen Präsenz dieses Themengebietes ist die Bündelung und Aufbereitung all seiner Aspekte nur in seltenen Fällen gelungen. Dieses Buch stellt sich dieser Herausforderung und versucht einen umfassenden Überblick über die Belange der Kommissionierung zu geben.

Kommissioniersysteme sind Subsysteme eines komplexen Materialflusssystems und gehören in den Bereich der Intralogistik. In den einzelnen Kapiteln dieses Bu-

ches werden zunächst die relevanten Begriffe und Parameter und die Einordnung in den gesamtlogistischen Kontext vorgenommen. Im Anschluss daran erfolgt die Aufbereitung verschiedener Grundlagen in Bezug auf materialflussbezogene, informationsflussbezogene und organisatorische Aspekte der Kommissionierung. Darauf aufbauend werden elementare technische und informationstechnische Arbeitsmittel vorgestellt. Die in der Praxis vorherrschenden Systemtypen werden im Anschluss präsentiert. Nach den grundlegenden Bestandteilen von Kommissioniersystemen werden Möglichkeiten zur Systemoptimierung und -gestaltung aufgezeigt. Dieses Buch widmet sich im Anschluss ausführlich den analytischen Berechnungsmethoden zur Leistungsermittlung. Alle vorgenannten Teilaufgaben bilden die Grundlage für eine zielführende Planung von Kommissioniersystemen, die in den folgenden Kapiteln als Teil einer strukturierten Materialflussgestaltung behandelt wird. Abgerundet wird das Gesamtbild der Kommissioniersysteme mit einer Darstellung verschiedener bereits realisierter Systembeispiele, die noch einmal die Komplexität des Gesamtsystems verdeutlichen.

Kapitel 2

Kommissionieren als Teilfunktion in Materialflusssystemen

2.1 Begriffsbestimmung

Die Kommissionierung ist ein Kernelement der Intralogistik und trägt wesentlich zum wirtschaftlichen Erfolg eines logistischen Unternehmens bei. Die hohe Bedeutung der Kommissionierung zeigt sich in zwei Aspekten. Zum einen ist die Kommissionierung der personalintensivste Bereich innerhalb des Distributionssystems und verursacht einen Großteil der Kosten. Zum anderen beeinflussen die Kommissionierabläufe unmittelbar den Servicegrad für den Kunden und somit die Wettbewerbsfähigkeit. Nur weitgehend fehlerfreie Kommissioniersysteme mit hoher Effizienz können den hohen Anforderungen des Marktes gerecht werden.

Bevor in den folgenden Kapiteln ein detaillierter Überblick über die unterschiedlichen Kommissioniermethoden, Systemtypen und dazugehörigen Berechnungsverfahren gegeben wird, soll in diesem Kapitel eine einheitliche Begriffswelt geschaffen werden. Neben der Erläuterung der grundlegenden Begriffe erfolgt eine Abgrenzung der Kommissionierung durch die Definition der Schnittstellen zu den angrenzenden Bereichen sowie eine Einordnung in innerbetriebliche Materialflusssysteme. Hieraus abgeleitet werden die verschiedenen Größen dargestellt, durch die ein Kommissioniersystem beeinflusst wird. Dabei wird die Kommissionierung als Black-Box betrachtet, d. h. es werden in diesem Kapitel zunächst nur diejenigen Einflüsse und Anforderungen dargestellt, die von außen auf das Kommissioniersystem einwirken. Am Ende des Kapitels erfolgt eine kurze Darstellung der existierenden Richtlinien.

2.1.1 Kommissionieren

An Unternehmen werden Anforderungen in Form von Kundenbestellungen gestellt. Die Bestellung ist eine Willenserklärung des Kunden, die angeforderte Ware zu den definierten Konditionen vom Lieferanten zu erwerben. Zu diesen Konditio-

nen gehören Art, Beschaffenheit, Menge, Preis und Lieferbedingungen. Ein Lieferant ist der Betreiber eines Lager- und Distributionssystems, als Kunde wird die zu versorgende Person oder Gruppe bezeichnet [OTS97]. Entspricht die vom Kunden angeforderte Menge einer Lagereinheit, so kann unmittelbar eine Auslagerung veranlasst werden, die wegen der Gleichheit von bestellter zu auszulagernder Einheiten zumeist leicht automatisiert werden kann. Da aber die Warenanforderungen des Kundenmarkts nur selten mit den artikelreinen Lagereinheiten übereinstimmen, wird es notwendig, diese in bedarfsorientierte Transporteinheiten für die Kunden umzuwandeln. Dieser Vereinzelungsvorgang zur Änderung der Zusammensetzung, bei dem jeweils die für einen Auftrag erforderliche Stückzahl eines Artikels entnommen wird, heißt Kommissionierung. In der VDI-Richtlinie 3590, Blatt 1 wird der Vorgang des Kommissionierens wie folgt definiert [VDI 3590a]:

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

Dabei findet eine Umformung der Güter von einem lagerspezifischen in einen verbrauchsspezifischen Zustand statt [JÜN89]. Die Aufgabe der Kommissionierung besteht somit darin, interne oder externe Warenanforderungen, die in Form von Aufträgen (vgl. Kap. 2.1.4) eingehen, zufrieden zu stellen. Der Vorgang der Kommissionierung umfasst dabei alle Vorgänge, die zur Zusammenstellung der im Kommissionierauftrag angeforderten Waren erforderlich sind [GUD73]. Bevor nun der Begriff Kommissioniersystem eingeführt wird, muss zunächst der Systembegriff näher erläutert werden.

2.1.2 System

Der Begriff *System* hat seinen Ursprung im Griechischen. Er leitet sich von *systema* ab und kann mit „Zusammenstellung“ oder „geordnetes Ganzes“ übersetzt werden. Ein System beschreibt eine gegenüber der Systemumgebung abgegrenzte Menge von Elementen mit deren spezifischen Eigenschaften, die durch bestimmte Relationen miteinander in Beziehung stehen (Abb. 2.1). Dies spiegelt sich auch in folgender Definition wider [VDI 3633b]:

Ein System ist eine abgegrenzte Anordnung von Komponenten, die miteinander in Beziehung stehen.

Die wesentlichen Merkmale eines Systems sind in Anlehnung an [KRA96]:

- die Systemgrenzen,
- die Systemkomponenten,
- die Systemstruktur,
- der Systeminput und -output,
- das Systemverhalten und der Systemzweck.

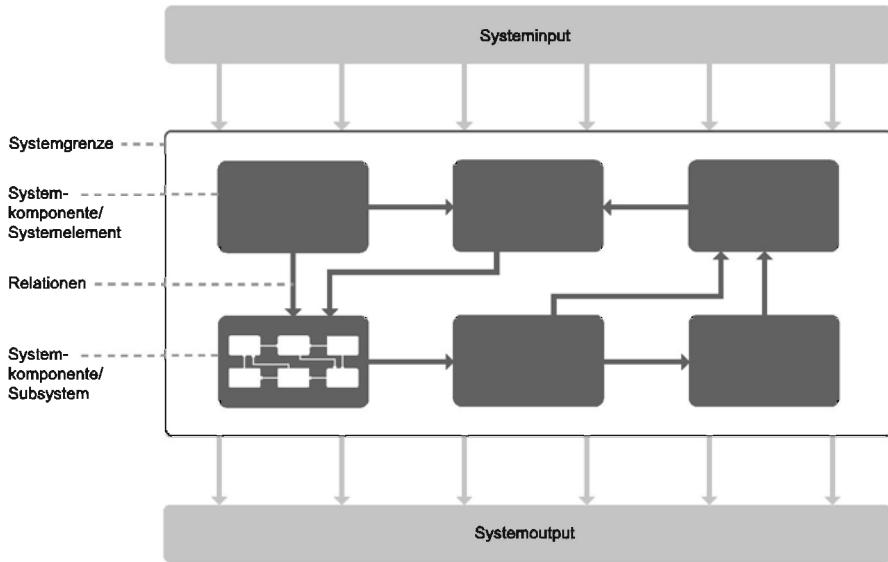


Abb. 2.1 Aufbau und Merkmale eines Systems

Der Bereich, in dem sich das System und seine Umgebung berühren, wird als *Systemgrenze* bezeichnet. Durch sie werden alle zum System gehörenden Bestandteile gegenüber der Umwelt abgegrenzt. Sie bilden somit die Trennung zwischen dem betrachteten und dem nicht betrachteten Teil eines umfassenden Gesamtsystems [KRA96]. Die innerhalb der Systemgrenzen liegenden Bausteine werden als *Systemkomponenten* bezeichnet. Diese stellen bei einer genaueren Betrachtung wiederum Systeme, sogenannte *Subsysteme*, dar oder werden als nicht weiter zerlegbare *Systemelemente* angesehen. Die Anordnung der Systemelemente zueinander sowie die Relationen und Wechselwirkungen der Elemente untereinander werden durch die *Systemstruktur* beschrieben. Über die Systemgrenzen hinweg stehen Systeme mit ihrer Umwelt in Verbindung. Die auf das System einwirkenden exogenen Einflüsse bilden den *Systeminput*, die Auswirkungen des Systems auf seine Umwelt den *Systemoutput*. Die Art und Weise, in der ein bestimmtes System auf eine Veränderung seiner Umwelt reagiert, charakterisiert das *Systemverhalten*, das als eine im Zeitverlauf stattfindende Entwicklung des Systems unmittelbar beobachtet werden kann und bestimmten Regeln folgt. Der *Systemzweck* beschreibt die Funktion und das Ziel der Systemfunktion.

Ein wichtiges Merkmal eines Systems ist dessen Komplexität. Diese nimmt mit steigender Anzahl an Systemelementen und zunehmender Intensität der Wechselbeziehungen zwischen diesen zu. Das Systemverhalten komplexer Systeme wird nicht mehr nur durch die äußeren Einflüsse bestimmt, sondern vielmehr auch durch seine Eigendynamik und kann so häufig nicht mehr auf eine einzelne Ursache zurückgeführt werden. Die zielgerichtete Steuerung komplexer Systeme erfordert eine genaue Kenntnis der zugrunde liegenden Zusammenhänge und Mechanismen.

Da komplexe Systeme oft nur schwer zu überschauen sind, wird in der Praxis meist versucht die Systemkomplexität zu verringern. Hierbei bestehen im Wesentlichen zwei Möglichkeiten. Dies sind einerseits die Unterteilung des Gesamtsystems in Teilbereiche, sogenannte Subsysteme, und andererseits die Überführung des Systems in ein abstrahiertes, stark vereinfachtes Modell. Der hierbei stattfindende Vorgang der Erstellung eines Modells wird als Modellbildung bezeichnet.

Durch die Aufteilung eines Systems in seine Subsysteme wird die Komplexität reduziert, da die Einflüsse der anderen Subsysteme zunächst unberücksichtigt bleiben. Die einzelnen Subsysteme werden analysiert und Strategien für deren Steuerung ermittelt. Anschließend werden die Subsysteme in vereinfachter Form zum Gesamtsystem zusammengesetzt, so dass sich deren Komplexität nicht zwingend im Gesamtsystem wiederfindet. Durch das Verständnis der Funktionsweisen der Subsysteme und deren Wechselwirkungen kann anschließend auch das Verhalten des Gesamtsystems analysiert und verstanden werden, um hierdurch dessen Steuerbarkeit zu verbessern.

2.1.3 Kommissioniersystem

Der Vorgang der Kommissionierung setzt sich mit dem Ziel der Auftragszusammensetzung aus einer Reihe von Einzeltätigkeiten zusammen, für deren Realisierung heute unterschiedlichste Techniken und Strategien zur Verfügung stehen (vgl. Kap. 3). Durch deren Kombination ergibt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Kommissioniersysteme.

Diese lassen sich anhand der in Kap. 2.1.2 definierten Systemmerkmale beschreiben. Die Menge aller von außen auf das Kommissioniersystem wirkenden Einflussgrößen und die durch die Systemgrenzen von der Betrachtung ausgeschlossenen neben- und untergeordneten Systeme stellen die Systemumwelt dar. Eine Systemkomponente bezeichnet ein Teilsystem oder Gewerk des Kommissioniersystems, das durch gegenseitige Abhängigkeiten mit den anderen Teilsystemen in Wechselwirkung steht. Der Aufbau und die innerhalb des Kommissioniersystems stattfindenden Abläufe kennzeichnen die Systemstruktur. Der Austausch von Informationen, Materialien oder Energie über die Grenzen des Kommissioniersystems hinweg bilden den Systemin- und -output. Im Falle des Kommissioniersystems zählen beispielsweise die eingehenden Kundenaufträge zum Input und die Lieferung der bestellten Artikel zum Output. Das Verhalten des Kommissioniersystems wird durch die hinterlegten Regeln und Strategien bestimmt.

Die Aufgabe eines Kommissioniersystems ist die bedarfsgerechte Zusammensetzung unterschiedlicher Artikel zu einem Kundenauftrag. Dies kann durch Bildung von kleineren oder größeren Einheiten, durch Reihenfolgeänderung einer Einheit im Artikelstrom oder durch die Lagerung einer Einheit über eine bestimmte Zeitspanne geschehen [SCH96].

Hierzu werden heute unterschiedlichste technische Systeme eingesetzt. Die enge Verflechtung von technischen Gewerken, Informationsmanagement sowie Ablauf-

und Organisationsstruktur machen die Gestaltung und den Betrieb von Kommissioniersystemen zu einer sehr komplexen Aufgabe [tHS08].

Bevor die einzelnen Elemente eines Kommissioniersystems vorgestellt werden, ist es erforderlich, die im Zuge des Materialflusses bewegten Einheiten in Kommissioniersystemen zu beschreiben bzw. zu definieren.

- *Lagereinheit*: Alle im Kommissioniersystem bevorrateten Güter werden als Lagereinheiten bezeichnet. Sie ergeben in Summe den Bestand des Lagers.
- *Transporteinheit*: Die Artikel, die zur Bereitstellung befördert werden, entsprechen einer Transporteinheit.
- *Bereitstelleinheit*: Als Bereitstelleinheit werden diejenigen Einheiten bezeichnet, die dem Kommissionierer zur Entnahme angeboten werden.
- *Entnahmeeinheit*: Eine Entnahmeeinheit beschreibt die Menge eines Artikels, die bei einem Zugriff des Kommissionierers aus der Bereitstelleinheit entnommen wird.
- *Kommissioniereinheit*: Durch die Bearbeitung der Positionen eines Kommissionierauftrags entsteht die Kommissionier- bzw. Sammeleinheit.
- *Versandeinheit*: Besteht ein Kundenauftrag aus mehreren Kommissioniereinheiten, so werden diese abschließend zu einer Versandeinheit zusammengefasst.

Zur Erfüllung der in einem Kommissioniersystem eingehenden Aufträge ist es erforderlich, die richtigen Informationen weiterzugeben und bestimmte Waren physisch zu bewegen. Sämtliche hierzu erforderlichen Vorgänge werden durch eine überlagerte Organisation koordiniert. Erst durch diese entsteht ein funktions- und leistungsstarkes Kommissioniersystem [SCH93b]. Ein Kommissioniersystem besteht daher aus den drei Teilbereichen [VDI 3590a]

- Materialfluss,
- Informationsfluss und
- Organisation.

Unter *Materialfluss* wird eine Verkettung von Vorgängen verstanden, bei denen ein Transformationsprozess stattfindet, der eine Veränderung des Systemzustands von Gütern (Material, Stoffen) hinsichtlich Zeit, Ort, Menge, Zusammensetzung und Qualität bewirkt. Der Vorgang des Kommissionierens setzt sich materialflusstechnisch aus mehreren Grundfunktionen zusammen. Die elementaren Funktionen sind die Bereitstellung, die Entnahme und die Abgabe von Artikeln.

Wesentlichen Einfluss auf die Funktionalität und Effizienz eines Kommissioniersystems besitzt der *Informationsfluss*. Nur wenn die erforderlichen Informationen rechtzeitig, fehlerfrei, vollständig und bedarfsgerecht zur Verfügung stehen, kann ein Kommissioniersystem die geforderte Leistung realisieren [JÜS99]. Als Informationen werden Wissensinhalte bezeichnet, die für ein zweckgerichtetes Handeln erforderlich sind.

Der Informationsfluss beinhaltet sämtliche informationstechnischen Vorgänge. Diese werden in Kap. 3.2 detailliert betrachtet. Er setzt sich aus mehreren Informationselementen zusammen, die zur Auslösung der materialflusstechnischen Abläufe

erforderlich sind. Grundsätzlich notwendige Elemente sind hierbei der Kundenauftrag, der Kommissionierauftrag und die darin enthaltenen Positionen [VDI 3590a]. Die genaue Abgrenzung der Begriffe erfolgt in Kap. 2.1.4.

Die *Organisation* regelt die Funktionen des Material- und Informationsflusses so, dass ein funktionsfähiges Gesamtsystem entsteht. Sie verfolgt dabei einerseits das Ziel, die Leistung eines Kommissioniersystems zu optimieren, andererseits aber auch die Qualität der Kommissionierung (z. B. Verminderung von Fehlern) zu steigern. Eine detaillierte Beschreibung der Zusammenhänge sowie der unterschiedlichen Realisierungsmöglichkeiten erfolgt in Kap. 3.3.

2.1.4 Kundenaufträge und Kommissionieraufträge

Alle im Rahmen der Kommissionierung durchzuführenden Vorgänge und Prozesse werden durch das Informationselement Auftrag ausgelöst. Aus der Anzahl und dem Inhalt der eingehenden Aufträge geht die durch das Kommissioniersystem zu erbringende Leistung hervor. Wichtig ist hierbei die Unterscheidung in Kundenaufträge und Kommissionieraufträge.

Kundenauftrag Die unternehmensinterne oder -externe Bestellung eines Kunden bei einem Lieferanten wird als Kundenauftrag bezeichnet. Jeder Auftrag besteht hierbei aus n Positionen, wobei jede Position genau einem Artikel in einer definierten Menge M entspricht und durch eine Zeile des Auftrags repräsentiert wird. Je Position muss somit eine bestimmte Teilmenge (Anzahl Entnahmeeinheiten) aus der Bereitstelleinheit des Artikels vereinzelt werden. Die im Unternehmen eingehenden Kundenaufträge sind zur Durchführung einer effizienten Kommissionierung meist ungeeignet und erfordern eine entsprechende Auftragsaufbereitung [tHS08]. Durch diese Aufbereitung wird der Kundenauftrag in einen internen Kommissionierauftrag umgewandelt. In Abhängigkeit vom Organisationstyp des Kommissioniersystems existieren hierbei unterschiedliche Vorgehensweisen, die in Kap. 3.2 eingehend beschrieben werden.

Kommissionierauftrag Durch die Anpassung des Kundenauftrags an die jeweiligen Belange der Kommissionierung wird dieser in einen Kommissionierauftrag überführt. Dies geschieht durch die Verknüpfung des Kundenauftrags mit den kommissionierspezifischen Daten, wie z.B. der Angabe des Entnahmearmtes und der Entnahmemenge [OTS97]. Ein Kommissionierauftrag stellt im Gegensatz zum Kundenauftrag eine an den Kommissionierer zu einem definierten Zeitpunkt zur Bearbeitung freigegebene Teilmenge aller noch nicht bearbeiteten Kundenaufträge dar [SCH96].

Um im weiteren Verlauf ein einheitliches Begriffsverständnis zu erzeugen, werden an dieser Stelle die Begriffe Position und Pick eindeutig voneinander abgegrenzt. Nach [VDI 3590a] entspricht eine *Position* einer Zeile in einem Kommissionier-

auftrag, die alle relevanten Informationen für die Kommissionierung eines Artikels enthält. Der Begriff Pick stammt aus dem englischsprachigen Raum und bedeutet übersetzt „aufsammeln“. Er ist ein international verwendeter Begriff im Zusammenhang mit dem Kommissionierungsvorgang. Ein *Pick* bezeichnet den Zugriff auf einen Artikel und dessen Entnahme. Demnach entspricht ein *Pick* einem Greifvorgang. Diese Unterscheidung ist wichtig, da die von einer Position angeforderte Menge nicht zwangsläufig der Menge, die bei einem *Pick* auf einen Artikel entnommen wird, entspricht. Eine Position kann aus mehreren *Picks* bestehen.

2.2 Integration der Kommissionierung in Materialflusssystemen

Materialflusssysteme bestehen aus einem Netzwerk von Organisationseinheiten, die in beiden Richtungen, horizontal und vertikal miteinander verknüpft sind und zu einem Leistungsergebnis führen. Dabei wurde im Laufe der Jahre das Blickfeld von der Betrachtung und Optimierung einzelner Bereiche immer mehr auf eine ganzheitliche Leistungsbetrachtung ausgeweitet. Innerhalb von Materialflusssystemen kommen Kommissioniersysteme an unterschiedlichen Stellen zum Einsatz. Bevor jedoch die Einordnung der Kommissionierung erfolgen kann, muss zunächst eine eindeutige Festlegung der Grenzen der Kommissionierung gegenüber angrenzenden Bereichen erfolgen.

2.2.1 Abgrenzung und Schnittstellen

Die Kommissionierung umfasst alle vom Kundenauftrag angestoßenen Tätigkeiten von der Bereitstellung der Ware im Kommissioniersystem über die anschließende Entnahme durch den Kommissionierer bis hin zur Zuordnung der entnommenen Artikel zu einem Kundenauftrag. In Abhängigkeit von den spezifischen Anwendungsfällen existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Realisierungen von Kommissioniersystemen, die sich u. a. durch die im System integrierten Prozesse unterscheiden. Für die weiteren Betrachtungen ist eine eindeutige Abgrenzung der Kommissionierung gegenüber den umgebenden Systemen erforderlich. Hierbei ist zwischen materialfluss- und informationsflussbezogenen Schnittstellen zu unterscheiden.

Aus Materialflusssicht liegt die Systemgrenze eingangsseitig vor der Bereitstellung der Artikeleinheiten zur Entnahme. Der Nachschub wird hierbei als unendliche Quelle angesehen. Die Kommissionierung beginnt nach dem Nachschub aus dem Reservelager mit der Bereitstellung von Waren (Abb. 2.2). Ausgangsseitig wird die Schnittstelle durch die Zuordnung der Entnahmeeinheiten zu den Kundenaufträgen markiert. Hier liegt die Senke des Systems. Die Zuordnung kann direkt nach der Entnahme oder zu einem späteren Zeitpunkt bei der Zusammenfassung von Kundenaufträgen zu Versandeinheiten erfolgen. Die Bildung von Sendungen oder Touren erfolgt in nachgeschalteten Bereichen und ist nicht Bestandteil des Kommissionier-

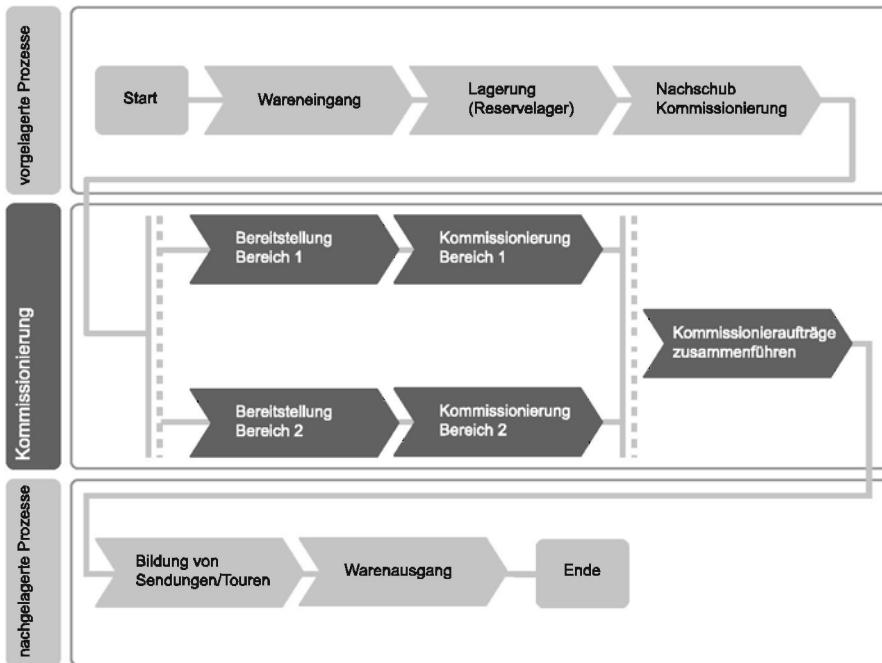


Abb. 2.2 Materialflussbezogene Schnittstellen des Kommissioniersystems

systems. In der Regel sind damit auch weiterführende Prozesse verbunden, wie z. B. kundenspezifische Verpackungen, Ladeeinheitenbildung oder Rechnungsdruck, die nicht dem Kommissioniersystem zuzuordnen sind.

Die Systemgrenze auf den Informationsfluss bezogen ist der eingehende Kommissionierauftrag. Die vorgeschalteten informationstechnischen Prozesse des Generierens von Lieferaufträgen aus den Bestellungen, wie z. B. Aufteilen der Bestellung auf Teillieferungen aufgrund mangelnder Warenverfügbarkeit oder das Zusammenfassen mehrerer Bestellungen des gleichen Kunden zu einer Lieferung, werden in diesem Zusammenhang nicht weiter betrachtet. Erst die Generierung von Kommissionieraufträgen aus den eingehenden Bestellungen bildet die eingangsseitige Systemschnittstelle (Abb. 2.3). Die Rückmeldung des Kommissionierers nach Auftragsfertigstellung bildet die ausgangsseitige Schnittstelle. Die nachgeschalteten informationstechnischen Prozesse, wie z. B. das Bilden von Sendungen und Touren aus den Lieferungen und ggf. damit verbundene „Value-added Services“, wie kundenspezifische Verpackungen, Preisauszeichnung und Konfektionierung, sind mit weiteren wertschöpfenden Prozessen verbunden und nicht Bestandteil des Kommissioniersystems.

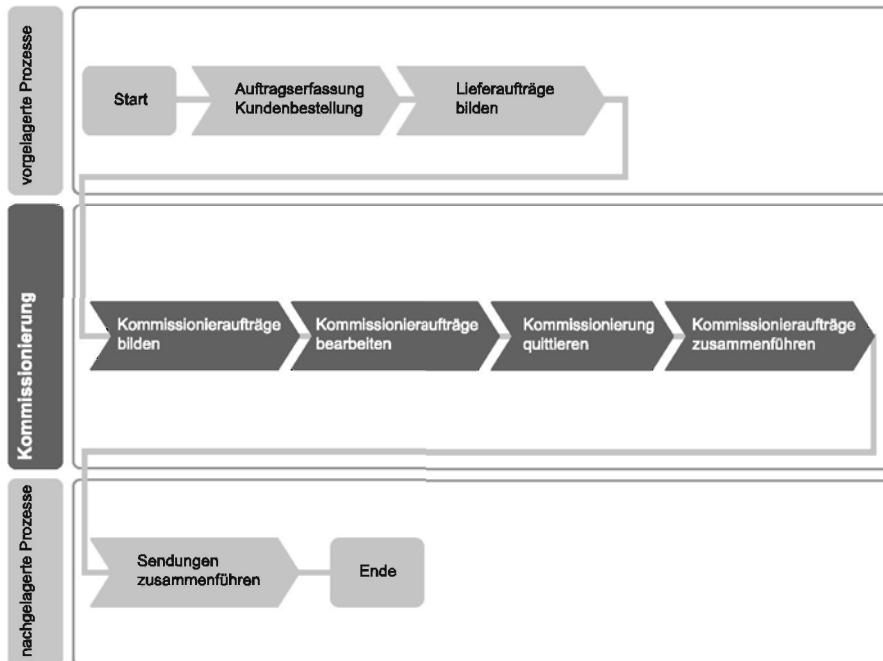


Abb. 2.3 Informationsflussbezogene Schnittstellen des Kommissioniersystems

2.2.2 Horizontale Einordnung der Kommissionierung

Der Vorgang des Kommissionierens, dessen entscheidendes Kennzeichen die auftragsgerechte Vereinzelung von Waren ist, tritt in der Praxis an unterschiedlichen Stellen von innerbetrieblichen Materialflusssystemen auf, z. B. vor der Bereitstellung für die Produktion und hauptsächlich im Warenausgang für Fertigwaren. Hierbei ist die Kommissionierung in der Regel das Bindeglied zwischen einer Lagerfunktion und einer Verbrauchsfunktion (Produktion, Montage, Versand).

Wird die gesamte Wertschöpfungskette von der Beschaffung über die Produktion bis hin zur Distribution von Waren betrachtet, ergibt sich eine unterschiedliche horizontale Einordnung von Kommissioniersystemen in intralogistischen Materialflusssystemen in Abhängigkeit von der Position und dem damit verbundenen logistischen Schwerpunkt des Unternehmens in dieser Kette. Im Folgenden werden einige Beispiele für typische Einordnungen der Kommissionierung in Materialflusssystemen dargestellt und die hierbei differierenden Ziele erläutert.

Einordnung des Kommissioniersystems am Beispiel Produktionslogistik

Aufgabe der Produktionslogistik ist es, die Versorgung des Produktionsprozesses sicherzustellen. In produzierenden Unternehmen ist in vielen Fällen ein Kommissioniersystem nach dem Lager und vor der Produktion eingegliedert. Ziel der Kommissionierung ist es in diesem Fall, eine losgrößengerechte Materialbereitstellung für die Produktion zu sichern und dadurch Unterbrechungen im Fertigungsablauf zu vermeiden.



Abb. 2.4 Horizontale Einordnung am Beispiel Produktionslogistik

Einordnung des Kommissioniersystems am Beispiel Distributionslogistik

Im Bereich der Distributionslogistik ist die Kommissionierung nach dem Lager und vor dem Versand angesiedelt. Ein typisches Beispiel hierfür ist der Versandhandel. In Warenverteilzentren verfolgt die Kommissionierung das Ziel, die Positionen der Kundenaufträge aus dem Sortiment zusammenzustellen und durch eine möglichst schnelle Bearbeitung dem Kunden einen hohen Servicegrad zu garantieren.



Abb. 2.5 Horizontale Einordnung am Beispiel Distributionslogistik

Einordnung des Kommissioniersystems am Beispiel Cross Docking

Eine weitere Möglichkeit der Einordnung des Kommissioniersystems in der Supply Chain ist das sogenannte Cross Docking. Dabei werden die Waren von verschiedenen Zulieferern in einer Cross Docking Station angeliefert und ohne Zwischenlagerung direkt auftragsgemäß kommissioniert und an die Kunden ausgeliefert. Diese Vorgehensweise wird in vielen Fällen dort eingesetzt, wo verderbliche Güter in kurzer Zeit umgeschlagen werden sollen. Ziel hierbei ist, neben der Erreichung kurzer Durchlaufzeiten und einer geringen Kapitalbindung, durch eine filialgerechte Anlieferung der Waren unnötige Prozesse in den meist kleinen Geschäftsfilialen zu vermeiden.



Abb. 2.6 Horizontale Einordnung am Beispiel Cross Docking

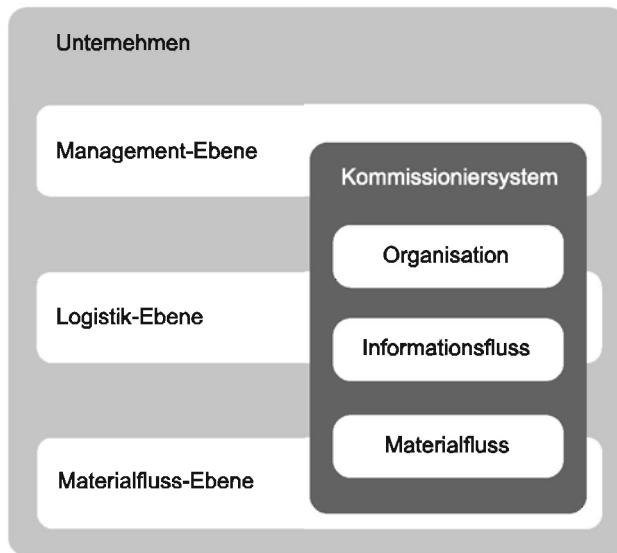


Abb. 2.7 Vertikale Einordnung der Kommissionierung

2.2.3 Vertikale Einordnung der Kommissionierung

Unter der vertikalen Einordnung der Kommissionierung wird die Implementierung innerhalb der Hierarchieebenen des Unternehmens verstanden. Aus logistischer Sicht können vertikal drei Ebenen im Unternehmen unterschieden werden [JÜS99]:

- Management-Ebene
- Logistik-Ebene
- Materialfluss-Ebene

Das Kommissioniersystem, bestehend aus den Teilbereichen Materialfluss, Informationsfluss und Organisation, findet sich in allen drei Ebenen dieser Unternehmenshierarchie wieder. Eine eindeutige Zuordnung zu einer dieser Ebenen ist nicht möglich. Der physische Vorgang der Kommissionierung ist prinzipiell in der Materialfluss-Ebene angesiedelt. Der Informationsfluss wird in der Logistik-Ebene koordiniert, während die organisatorischen, strategischen Belange durch die Management-Ebene erfüllt werden. Somit nimmt ein Kommissioniersystem eine Querschnittsfunktion über alle Hierarchieebenen des Unternehmens ein (Abb. 2.7).

2.3 Einflussgrößen auf die Kommissionierung

Die Auswahl und die Dimensionierung eines Kommissioniersystems werden stark von äußeren Einflussfaktoren geprägt, die die von der Umwelt an das System ge-

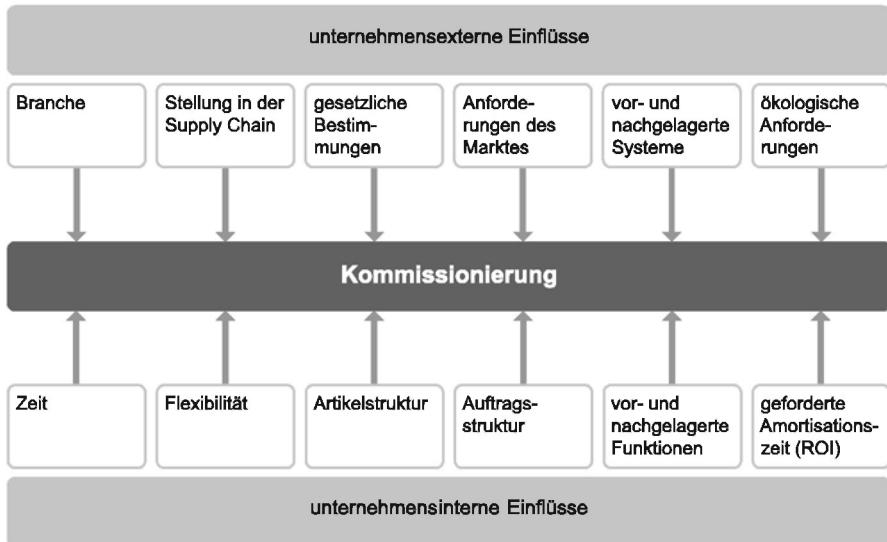


Abb. 2.8 Einflussgrößen auf Kommissioniersysteme

stellten Anforderungen widerspiegeln. Diese qualitativen und quantitativen Kriterien geben Rahmenbedingungen für die Systemgestaltung vor und müssen bereits bei der Planung eines Kommissioniersystems berücksichtigt werden. In diesem Kapitel sollen mögliche externe Einflüsse auf die Kommissionierung erläutert werden, das Kommissioniersystem selbst wird dabei als Black Box betrachtet. Eine detaillierte Darstellung der unternehmensinternen Einflüsse erfolgt in Kap. 3.

Da sich die Einflussfaktoren von Fall zu Fall ändern, kann es keine Verallgemeinerung bei der Auswahl von Kommissioniersystemen geben [SCH93b]. Erst unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen und Einflussgrößen kann das passende Kommissioniersystem ausgewählt werden. Bleiben die von Außen an das Kommissioniersystem gestellten Anforderungen unberücksichtigt, kann es leicht zu einer falschen Systemauslegung kommen. Das Risiko von Fehlinvestitionen ist dann sehr hoch.

Zu den externen Faktoren, die auf die Kommissionierung wirken, zählen u. a. die Anforderungen des Marktes, die Anforderungen von vor- und nachgelagerten Systemen, die Stellung des Unternehmens in der Supply Chain, gesetzliche Bestimmungen, ein begrenztes Investitionsvolumen und die Branche, in der ein Unternehmen tätig ist (Abb. 2.8).

Die *Anforderungen des Marktes* an ein Kommissioniersystem werden durch den Wettbewerb zwischen den Unternehmen und das Kaufverhalten der Kunden geprägt. Dies führt zu unterschiedlichen Erwartungen hinsichtlich Servicegrad, Leistung, Kosten, Qualität und Reaktionszeit an das System. Bei Änderungen des Marktes und demzufolge Änderungen der Unternehmensstruktur spielt die Flexibilität eines Kommissioniersystems eine wichtige Rolle. In den letzten Jahren hat sich ein Wandel vom Anbietermarkt zum Käufermarkt vollzogen, durch den der Kun-

de zum zentralen Element wurde. Der Anbietermarkt war durch eine Verknappung des Angebots und einen hohen Bedarf geprägt. Der wesentliche Erfolgsfaktor war dabei der Produktnutzen. Im Gegensatz zum Anbietermarkt ist der Käufermarkt durch eine Bedarfssättigung und eine Globalisierung der Märkte geprägt. Hier steht der Käufernutzen im Mittelpunkt [POT95]. Dies führt zu kundenangepassten Produktions- und Vertriebsmethoden.

Des Weiteren hat die *Stellung des Unternehmens in der Supply Chain* Einfluss auf die Anforderungen, die an das System gestellt werden. Wie bereits in Kap. 2.2 erläutert, kann ein Kommissioniersystem an unterschiedlichen Stellen in der Wertschöpfungskette angesiedelt sein, wodurch sich starke Unterschiede bei der Art der Aufträge und den durchschnittlichen Bestellmengen ergeben. Wird durch das Kommissioniersystem unmittelbar der Endkunde beliefert, so sind meist kurze Lieferzeiten, große Artikelsortimente und kleine Auftragsmengen die Folge. Es zeigt sich, dass auch bei gleichmäßiger Nachfrage des Endkunden in Richtung der Zulieferer immer stärkere Nachfrageschwankungen mit gleichzeitig immer größeren Auftragsmengen auftreten. Aus diesen wiederum ergeben sich vollständig andere Anforderungen an das Kommissioniersystem. Es wird deutlich, dass neben der Stellung der Kommissionierung innerhalb der Wertschöpfungskette auch die unterschiedlichen *vor- und nachgelagerten Systeme* einen Einfluss auf die Gestaltung eines Kommissioniersystems ausüben.

Auch die *Branche*, in der ein Unternehmen tätig ist, hat Einfluss auf die Gestaltung des Kommissioniersystems. Jede Branche stellt andere Anforderungen hinsichtlich zu erbringender Leistung, Automatisierungsgrad, Auftragsdurchlaufzeiten, Reaktionszeit, Flexibilität, Qualität und sonstiger Serviceleistungen gegenüber dem Kunden. Diese unterschiedlichen Anforderungen der Branchen an ein Kommissioniersystem werden u. a. begründet durch unterschiedliche Artikelspektren, die sich in ihrer Größenordnung erheblich unterscheiden. Im Buchhandel spricht man erst ab einer Anzahl von 50.000 Artikeln von einem großen Sortiment, im Fachhandel bereits bei einigen hundert Artikeln [POT95]. Auch die geforderten Auftragsdurchlaufzeiten unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Branche. Im Bereich des Pharmahandels werden heute Durchlaufzeiten von unter einer Stunde realisiert, in der Automobilbranche kommt es bei Ersatzteillieferungen zu Zeitspannen von bis zu mehreren Tagen aufgrund von Überseetransporten.

Der Faktor *Zeit* spielt eine immer größer werdende Rolle. Kurze Auftragsdurchlaufzeiten, schnelle Transportzeiten, eine geringe Datenübertragungszeit, die Einhaltung der Termintreue sowie eine kurze Lagerdauer sind Forderungen, die den Aufbau des Kommissioniersystems beeinflussen.

Gesetzliche Bestimmungen, ein eingeschränktes Investitionsvolumen und ökologische Anforderungen begrenzen möglicherweise die Freiheit bei der Auswahl eines geeigneten Kommissioniersystems und sollten schon zu Beginn des Planungsprozesses mit berücksichtigt werden.

2.4 Existierende Richtlinien und deren Anwendung

Es existieren verschiedene Richtlinien und Normen, die sich mit dem Themenbereich der Kommissionierung befassen. Die allgemeinen Grundlagen der Kommissionierung werden in der VDI 3590 Blatt 1–3 behandelt [VDI 3590a], [VDI 3590b] und [VDI 3590c]. Blatt 1 [VDI 3590a] beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen des Kommissionierens. Es wird eine ausführliche Definition der Begriffe Kommissionievorgang und Kommissioniersystem, mit den Elementen Materialflusssystem, Informationssystem und Organisationssystem, vorgenommen. Die Richtlinie orientiert sich hierbei an den technischen Ausprägungen von Kommissioniersystemen und differenziert diese in einem hohen Detaillierungsgrad. Hierbei werden die verschiedenen technischen Realisierungsmöglichkeiten der einzelnen Teifunktionen Informationsfluss-, Materialfluss- und Organisationssystem systematisch in Form von morphologischen Kästen vorgestellt. Diese bieten eine Entscheidungshilfe bei der Planung von Kommissioniersystemen. Sie zeigen die unterschiedlichen Entscheidungsalternativen für die während des Kommissionierens stattfindenden Grundfunktionen auf. Die vertikale Kombination dieser Realisierungsmöglichkeiten gestattet die Ableitung spezifischer Lösungsansätze für die Gestaltung eines Kommissioniersystems.

Blatt 2 [VDI 3590b] bietet Hilfestellung bei der Systemfindung. Hierzu werden verschiedene für die Auslegung und Auswahl von Kommissioniersystemen erforderliche Basisdaten und Kennzahlen vorgestellt sowie hierbei zu berücksichtigende Nebenbedingungen und Zielvorgaben aufgezeigt. Eine genaue Beschreibung zur Berechnung, Anwendung und Auswertung der aufgezeigten Kennzahlen ist nicht Bestandteil der Richtlinie. Aufbauend hierauf liefert die Richtlinie einen Vorschlag zur Vorgehensweise bei der Planung von Kommissioniersystemen anhand von Planungshinweisen und Planungshilfen. Diese liefern Entscheidungskriterien, die ergänzend zu den Kostengrößen als Entscheidungshilfe bei der Gestaltung von Kommissioniersystemen dienen sollen. Dabei erfolgt eine Unterteilung in qualitative und quantitative Kriterien. Eine ausführliche und strukturierte Anleitung zur Vorgehensweise bei der Systemauswahl wird nicht gegeben.

In Blatt 3 der Richtlinie [VDI 3590c] wird anhand von Praxisbeispielen die Anwendung der morphologischen Kästen erläutert. Es werden Beispiele aus den Bereichen technischer Großhandel, Pharmagroßhandel, Versandhandel und Montage vorgestellt. Die dargestellten Beispiele sollen hierbei Anregungen zur Lösung eigener Problemstellungen liefern. Es werden jedoch keine äußeren Einflüsse, die sich in Abhängigkeit von der Branche des jeweils dargestellten Beispiels deutlich unterscheiden, aufgezeigt.

Die durch die Richtlinie verfolgten Ziele eine einheitliche Begriffswelt zu schaffen, einen detaillierten Überblick über die verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten der Teifunktionen des Kommissionierens zu geben und Hilfestellung bei der Planung zu leisten, werden erfüllt. Sie kann jedoch dem Planer die Entscheidung, wann welches Kommissioniersystem zu wählen ist, nicht abnehmen und auch keine detaillierte Anleitung zur Dimensionierung von Kommissioniersystemen liefern.

Ergänzungen zur VDI-Richtlinie 3590 bieten die VDI-Richtlinien [VDI 3311], [VDI 3657] und [VDI 4415], die jeweils auf spezielle Themenbereiche der Kommissionierung eingehen. Dazu zählen die beleglose Kommissionierung, die automatisierte Kommissionierung und die Gestaltung der Kommissionierarbeitsplätze.

Die [VDI 3311] geht im Speziellen auf die beleglose Kommissionierung ein. Zunächst erfolgen eine kurze Vorstellung möglicher Ausprägungsstufen und eine Einordnung der beleglosen Kommissionierung. Ein Vergleich der belegorientierten mit der beleglosen Kommissionierung soll deren Unterschiede verdeutlichen. Des Weiteren beschreibt die Richtlinie die Vorteile der beleglosen Kommissionierung und gibt Hinweise zur Systemgestaltung hinsichtlich technischer Komponenten und möglicher Systemalternativen.

Die [VDI 3657] gibt Hilfestellung zur Planung eines Kommissionierarbeitsplatzes unter ergonomischen Gesichtspunkten. Dabei werden der Wirkraum, der Sehbereich und andere Umweltbedingungen, die Einfluss auf die Gestaltung eines Kommissionierarbeitsplatzes haben, näher betrachtet. Es wird auf weitere Vorschriften und technische Regelwerke verwiesen, die hilfreich bei der Anwendung dieser Richtlinie sind.

Die automatisierte Kommissionierung wird in der [VDI 4415] betrachtet. Der Zweck dieser Richtlinie ist es, Hilfsmittel und empfehlenswerte Systeme aufzuzeigen sowie Denkanstöße zu geben. Es werden verschiedene Kommissioniersysteme in einer tabellarischen Übersicht betrachtet, die durch mehrfachen Einsatz in der Praxis Bedeutung erlangt haben. Zudem werden im Vorfeld wichtige zu beachtende Parameter aufgezeigt, z. B. eine Definition der zu entnehmenden Güter, das einzusetzende Fachpersonal und wichtige Auftrags- und Lagerkennzahlen.

Die aufgelisteten VDI-Richtlinien geben gute Anregungen zur Systemplanung, können und sollen jedoch kein umfassendes Regelwerk zur strukturierten Planung von Kommissioniersystemen darstellen. Die Leistungsberechnung und die verschiedenen Ausprägungsformen von Kommissioniersystemen stehen nicht im Fokus der Richtlinien. Sie sind aber bei der Planung von Kommissioniersystemen hilfreiche Methoden und Informationen, die wesentlich zur Entscheidungsfindung beitragen. Dieses Buch versucht, diese Aspekte in den folgenden Kapiteln aufzugreifen und einen umfassenden Überblick zu geben.

Kapitel 3

Grundlagen der Kommissionierung

Um die komplexe Aufgabe der Planung und Auslegung von Kommissioniersystemen zu vereinfachen und zu strukturieren, werden in diesem Kapitel Grundfunktionen und Standardabläufe definiert. Dies erfolgt anhand der bereits in Kap. 2 vorgestellten Gliederung eines Kommissioniersystems nach [VDI 3590a] in die drei Bereiche

- Materialfluss,
- Informationsfluss und
- Organisation.

Diese Teilbereiche sind Bestandteil eines jeden Kommissioniersystems und lassen sich weiter spezifizieren. Im Anschluss an die detaillierte Erläuterung der drei Teilbereiche werden die zwei Grundprinzipien der Kommissionierung *Person-zur-Ware* und *Ware-zur-Person* explizit hervorgehoben.

3.1 Materialfluss

Innerhalb des Materialflusssystems wird der physische Transport der Güter realisiert. Die Kommissionierung kann nach [VDI 3590a] in folgende Grundfunktionen aufgegliedert werden:

- Transport der Güter zur Bereitstellung
- Bereitstellung
- Fortbewegung des Kommissionierers
- Entnahme
- Transport der Entnahmeeinheit zur Abgabe
- Abgabe der Entnahmeeinheit
- Transport der Kommissioniereinheit zur Abgabe
- Abgabe der Kommissioniereinheit
- Rücktransport angebrochener Einheiten

Tabelle 3.1 Grundfunktionen des Materialflusssystems nach [JÜS99]

Grundfunktionen Materialfluss	Realisierungsmöglichkeiten		
Transport der Güter zur Bereitstellung	keine Bewegung	Bewegung	
		1-dimensional	2-dimensional
		manuell	mechanisiert
		3-dimensional	automatisiert
Bereitstellung	statisch	dynamisch	
	zentral	dezentral	
	geordnet	teilgeordnet	ungeordnet
Fortbewegung des Kommissionierers zur Bereitstellung	keine Fortbewegung	Fortbewegung	
		1-dimensional	2-dimensional
		manuell	mechanisiert
		3-dimensional	automatisiert
Entnahme	manuell	mechanisiert	automatisiert
	Einzelstückgut	Sammelstückgut	
Transport der Entnahmeeinheit zur Abgabe	kein Transport	Transport	
	Kommissionierer	Fördermittel	
	1-dimensional	2-dimensional	3-dimensional
	manuell	mechanisiert	automatisiert
Abgabe der Entnahmeeinheit	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 Lagereinheiten	keine Bewegung	Rücktransport ins Lager	Rücktransport ins Anbruchlager
		1-dimensional	2-dimensional
		manuell	mechanisiert
		3-dimensional	automatisiert



Abb. 3.1 Transport der Güter zur Bereitstellung [Foto: viastore]

Nicht in jedem Kommissioniersystem werden alle diese Funktionen ausgeführt. Im Gegensatz zu den Grundfunktionen Bereitstellung, Entnahme und Abgabe können einige übergeordnete Funktionen entfallen. Anhand des in Tabelle 3.1 dargestellten morphologischen Kastens lassen sich durch vertikale Kombination der einzelnen Elemente Strukturen für Kommissioniersysteme erarbeiten. Im Folgenden werden die jeweiligen Teilfunktionen einzeln vorgestellt und mit Beispielen erläutert.

3.1.1 *Transport der Güter zur Bereitstellung*

Diese erste Grundfunktion umfasst alle Transporte, die durchgeführt werden müssen, um die Güter für den Kommissionierer zugriffsbereit zu machen [VDI 3590a]. Die Bewegung der Güter zur Bereitstellung ist nicht mit der Nachschubversorgung der Lagerplätze zu verwechseln, sondern bezieht sich speziell auf einen Kommissionierauftrag. Dies ist nur dann erforderlich, wenn der Bereitstellplatz nicht dem Lagerplatz entspricht. Die Realisierungsalternativen sind also die Bereitstellung der Güter mit Bewegung oder ohne Bewegung (vgl. Tabelle 3.1). Ein Transport der Güter ist beispielsweise nicht erforderlich, wenn die Artikel aus einem Fachbodenregal entnommen werden. Dies heißt aber im Umkehrschluss, dass sich der Kommissionierer zum Artikel bewegt. Denn für die Zusammenstellung einer kundengerechten Bedarfsmenge muss entweder der Kommissionierer oder die Bereitstelleinheit bewegt werden. Einige wenige Fälle existieren, in denen gar keine Bewegung ausgeführt wird (z. B. Schachtkommissionierer).

Der Transport der Güter kann in Bezug auf die Orientierung der Bewegung alternativ in ein-, zwei- oder dreidimensional unterteilt werden. Eine eindimensionale Fortbewegung kann beispielsweise über eine Rollenbahn oder eine Elektrohängebahn (EHB) erfolgen. Beispielhaft für die zweidimensionale Bewegung ist

ein Regalbediengerät, welches sich sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung bewegt. Dreidimensionale Bewegungen können durch Krane realisiert werden.

Die dritte Ausprägung dieser Grundfunktion ist die Automatisierungsstufe. Hier wird zwischen manuell, mechanisch oder automatisch unterschieden. Ein manueller Transport der Güter findet statt, wenn dieser durch den Menschen ohne Hilfsmittel ausgeführt wird. Wird die Bewegung mittels durch den Menschen gesteuerter Geräte ausgeführt, so wird von einer mechanischen Gubewegung gesprochen (z. B. Paternoster-Regal). Eine Bewegung gänzlich ohne Beteiligung des Menschen wird automatisch ausgeführt (z. B. ein automatisches Regalbediengerät). In der Praxis gibt es sowohl für die Automatisierungsstufe als auch für die Orientierung der Bewegung zahlreiche unterschiedliche Lösungen [VDI 3590b].

3.1.2 Bereitstellung

Die Bereitstellung charakterisiert die Art, wie der Kommissionierer die Güter zur Durchführung des Entnahmeprozesses vorfindet [VDI 3590a]. Dabei kann die Bereitstellung statisch oder dynamisch erfolgen. Die Bedeutung einer Reihe von Klassifizierungen erfordert dabei besondere Betrachtung. Insbesondere die Anwendung der Bezeichnung „statisch“ und „dynamisch“ erfolgt in der Praxis und der Literatur uneinheitlich. Die klassische und auch in der Lagertechnik verwendete Definition sieht vor, dass bei statischer Bereitstellung eine Einheit zwischen Ein- und Auslagerung am selben Ort verbleibt (vgl. z. B. [GUD73]), d. h. der Artikel stationär, beispielsweise in einem Regalfach, zur Entnahme bereitsteht. Analog muss bei dynamischer Bereitstellung die Bereitstelleinheit des gewünschten Artikels zum Entnahmestandort befördert und gegebenenfalls nach erfolgter Entnahme zurückgelagert werden. In jüngeren Publikationen wird dagegen die Bezeichnung auf den Entnahmevergang konzentriert. Nach dieser Definition befinden sich bei statischer Bereitstellung die zu greifenden Artikel in Ruhe, während bei dynamischer Bereitstellung der Entnahmevergang auf das *bewegte* Teil erfolgt.

Eng mit dieser Problematik ist die Differenzierung in *zentrale* und *dezentrale* Bereitstellung verknüpft. Unter *zentraler Bereitstellung* wird dabei die Bereitstellung und Entnahme an einem örtlich festen Punkt verstanden oder zumindest an räumlich stark begrenzten Punkten (z. B. zwei bis drei nebeneinander liegende Palettenübergabeplätze oder Kommissionierung aus mehreren Horizontal-Umlaufregalen). Die Bereitstelleinheiten werden sequenziell an diesem zentralen Punkt bereitgestellt. Nur auf diese bereitgestellten Einheiten kann zugegriffen werden. Demgegenüber erfolgt bei *dezentraler Bereitstellung* die Entnahme an unterschiedlichen Punkten, zu denen sich der Kommissionierer bewegen muss.

Angesichts der Tatsache, dass die Unterscheidung „zentral–dezentral“ jedoch nicht alle Gestaltungsformen abdecken kann und Kommissionierverfahren, bei denen eine Entnahme eines in Bewegung befindlichen Gutes erfolgt, praktisch nicht bekannt sind, wird folgende Bedeutung zugrunde gelegt:

Tabelle 3.2 Beispiele zur Bereitstellung

Bereitstellung		
	statisch	dynamisch
dezentral	Fachbodenregalanlage	Regalfront an AKL
	<p>Die Bereitstellung erfolgt in einem Fachbodenregal; der Kommissionierer bewegt sich entlang der Regalfront und entnimmt entsprechend den Bedarfseinheiten einzelne Einheiten. Es werden nur die Bereitstelleneinheiten angesprochen, für die Bedarf vorliegt. Dieser Ablauf wird auch als das Prinzip „Person-zur-Ware“ verstanden.</p>	<p>Die Bereitstelleneinheiten befinden sich beispielsweise in einem automatischen Kleinteilelager (AKL). Die Kommissionierung erfolgt an der bodenebenen Regalebene, seitlich des AKL. Die Bereitstelleneinheiten werden in unterster Regalhöhe dynamisch bereitgestellt, allerdings werden verschiedene Plätze angefahren, so dass sich der Kommissionierer wie im Fall des Fachbodenregals vor der Regalzeile bewegen muss.</p>
zentral	Kommissioniernest	Hochregallagervorzone
	<p>Es wird eine Regalanordnung geschaffen (zumeist U-förmige Anordnung), in deren Mitte der Kommissionierer steht und alle Artikel in Reichweite hat. Der Kommissionierer erreicht durch Wegfall sämtlicher Weganteile sehr hohe Kommissionierleistungen (bis zu 1000 Teile/h). Die Anwendung ist auf die Kommissionierung einer begrenzten Anzahl kleinvolumiger Artikel beschränkt.</p>	<p>Die Bereitstelleneinheiten befinden sich in einem automatischen Hochregal oder Kleinteilelager und müssen zur Entnahme an einen zentralen Übergabepunkt befördert werden. Die Lagereinheiten werden nach Auslagerung aus dem Regalfach zumeist über Stetigfördertechnik zum Kommissionierplatz gefördert und anschließend wieder eingelagert. Eine Anordnung dieser Art wird auch als „Kommissionier-U“ bezeichnet und der Ablauf als das Prinzip „Ware-zur-Person“ verstanden.</p>

Die Differenzierung in *statische* und *dynamische* Bereitstellung klärt, ob die Bereitstelleneinheit zur Bereitstellung und nachfolgenden Entnahme bewegt werden muss.

Und:

Die Differenzierung in *zentrale* und *dezentrale* Bereitstellung definiert den Ort der Durchführung der Entnahme. Bei der zentralen Bereitstellung findet die Entnahme an einem festem Ort, bei der dezentralen Entnahme an verschiedenen Orten statt.

Als drittes Unterscheidungsmerkmal kann die Bereitstellung geordnet, teilgeordnet oder ungeordnet erfolgen. Dieses Kriterium bezieht sich auf die Lage und die Orientierung der zu kommissionierenden Güter. In manuellen Systemen sind dabei, abhängig vom Gut, meist mehrere Ordnungszustände vorzufinden. Mit steigendem Automatisierungsgrad gewinnt die Art der Bereitstellung (Ordnungszustand) an Wichtigkeit, da sie den sensorischen Aufwand zur Lageerkennung bestimmt bzw. eine geordnete Bereitstellung Grundvoraussetzung zur wirtschaftlichen Automatisierung ist.

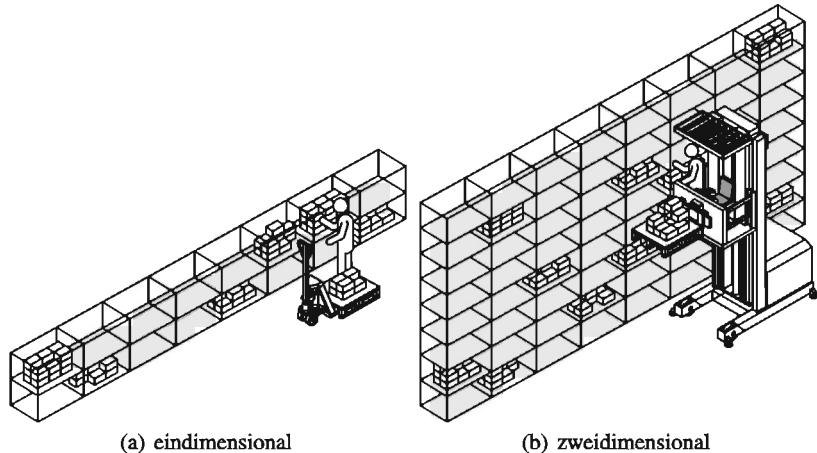


Abb. 3.2 Ein- und zweidimensionale Bewegung eines Kommissionierers innerhalb einer Gasse

3.1.3 Fortbewegung des Kommissionierers zur Bereitstellung

Hier wird die Art der Bewegung des Kommissionierers zum Bereitstellort der zu entnehmenden Güter betrachtet [VDI 3590a], d. h. in welcher Weise Kommissionierer und Artikel zusammenkommen. Je nachdem, ob die Bereitstellung zentral oder dezentral ausgeführt ist, gestaltet sich auch die Fortbewegung des Kommissionierers zur Bereitstellung unterschiedlich [JÜS99]. Findet keine Bewegung statt, verweilt der Kommissionierer an einem festen Standpunkt. Sofern eine Bewegung des Kommissionierers zu den zu entnehmenden Gütern erfolgt, kann diese ein-, zwei- oder dreidimensional und manuell, mechanisiert oder automatisch durchgeführt werden. Bewegt sich der Kommissionierer ebenerdig entlang einer Regalfront, so wird von einer eindimensionalen Fortbewegung gesprochen (Abb. 3.2(a)). Die zweidimensionale Fortbewegung kann beispielsweise mittels Regalbediengerät oder Kommissionierstapler in einer Hochregallagergasse (Abb. 3.2(b)) und die dreidimensionale mittels Kran erfolgen.

In diesem Bereich der Kommissionierung wurden sehr viele technische Hilfsmittel entwickelt, um den Menschen bei seiner Tätigkeit und der Durchführung einer Bewegung zu unterstützen. Die Entwicklung reicht von Handwagen, Handgabelhubwagen, sowohl angetrieben als auch nicht angetrieben, über Kommissionierwagen, Kommissionierstapler bis hin zu automatisch verfahrbaren, bemannten Regalbediengeräten. In Kap. 4.1.2 werden die verschiedenen Fördermittel vorgestellt.



Abb. 3.3 Manuelle Entnahme in der Kommissionierung [Foto: ELV-Elektronik AG]

3.1.4 Entnahme der Güter durch den Kommissionierer

Im Mittelpunkt steht hierbei die Durchführung der Entnahmeprozesse, also der Zugriff des Kommissionierers auf die bereitgestellten Güter [VDI 3590a]. Die Entnahme der Güter durch den Kommissionierer, also die Vereinzelung von Bereitstelleinheiten zur Entnahme, kann manuell, mechanisiert und automatisiert erfolgen. Manuelle Entnahmen werden durch den Menschen durchgeführt (Abb. 3.3). Bei der mechanischen Entnahme werden vom Menschen gesteuerte Hilfsmittel (sogenannte Manipulatoren), wie z. B. Greifer und Hebemittel, verwendet. Die automatische Entnahme erfolgt selbstständig ohne Einwirkung des Menschen. Ein Beispiel für eine technische Entwicklung in diesem Bereich ist ein an einem Roboter installierter Greifer [JÜS99].

Eine spezieller Fall der Gutentnahme ist das Prinzip der *negativen Kommissionierung*. Ein Kommissionievorgang wird als negativ bezeichnet, wenn die Bestellmenge nahezu der kompletten Bereitstelleinheit entspricht (z. B. Palette oder Behälter). Um ein umständliches Abpacken der Bestellmenge zu vermeiden, wird die Bereitstelleinheit zur Liefereinheit, und die überschüssige Restmenge wird abkommissioniert und im Kommissionierbereich belassen oder wieder eingelagert. Dieses Prinzip ist nicht zu verwechseln mit der inversen Kommissionierung (vgl. Kap. 5.3.3).

Tabelle 3.3 Beispiele zur Abgabe der Entnahmeeinheit

Abgabe der Entnahmeeinheit			
	statisch	dynamisch	
dezentral	Pick-to-Box	Pick-to-Belt	
	<p>Der Kommissionierer legt die Einheiten in einen mitgeführten Behälter („Kommissionierwanne“) ab. Dabei bewegt er sich mit dem Behälter zwischen den Entnahmestellen.</p> <p>Stellt der Behälter gleichzeitig die zum Kunden gehende Versandeinheit dar, wird das Prinzip als „Pick&Pack“ bezeichnet.</p>	<p>Der Kommissionierer legt die Entnahmeeinheiten direkt nach der Entnahme auf ein parallel zur Regalfront angeordnetes, zumeist angetriebenes Förderband ab. Anschließend bewegt er sich zum nächsten Entnahmehort.</p>	
zentral	Ware-zur-Person / Kommissionier-U	Ware-zur-Person / Paternosterregal mit Rollenbahn	
	<p>Die an der Entnahmestelle entnommenen Einheiten werden auf eine bereitgestellte Sammeleinheit (Palette oder Behälter) abgegeben und ggf. dort gestapelt.</p>	<p>Die dem Paternosterregal entnommenen Einheiten werden auf einen davor installierten Bandförderer abgegeben. Der Kommissionierer legt keine Wege zurück.</p>	

3.1.5 Abgabe der Entnahme- bzw. Kommissioniereinheit

Nachdem die angeforderten Artikel aus den Bereitstelleinheiten entnommen wurden, müssen diese in eine Sammeleinrichtung oder auf ein Förderband abgelegt werden. Dieser Vorgang wird als Abgabe bezeichnet. Neben der zuvor beschriebenen Differenzierung der Begriffe statisch-dynamisch und zentral-dezentral im Rahmen der Bereitstellung ist auch bei der Abgabe der kommissionierten Einheiten eine Unterscheidung dieser Begriffe erforderlich, da die Unterscheidungsmerkmale dort zum Teil eine andere Bedeutung erfahren. Im Fall der Abgabe der Entnahmeeinheit oder der Kommissioniereinheit bezieht sich die Unterscheidung in *statische* oder *dynamische* Abgabe auf das Fördermittel bzw. die Sammeleinrichtung. Besteht das Fördermittel in Bewegung (Stetigförderer), liegt eine dynamische Abgabe vor. Wird dagegen auf eine unbewegte Sammeleinrichtung abgegeben, liegt eine statische Abgabe vor.

Hinsichtlich der Unterscheidung in *zentrale* und *dezentrale* Abgabe verhält sich die Unterscheidung analog zur Entnahme: Wird z. B. eine Sammeleinrichtung mitgeführt, erfolgt die Abgabe der Entnahmeeinheiten an unterschiedlichen Orten, also dezentral; eine Abgabe an einen fest installierten Abgabepunkt ist dagegen zentral. Beispiele für verschiedene Ausprägungsformen liefert Tabelle 3.3.



Abb. 3.4 Abgabe der Entnahmeeinheit [Foto: ELV-Elektronik AG]

3.1.6 Transport der Entnahme- bzw. Kommissioniereinheit zur Abgabe

Teilweise erfordert die Abgabe der Entnahmeeinheiten keinen gesonderten Transport, da der Kommissionierplatz und der Abgabeort direkt nebeneinander liegen. Dies ist z. B. der Fall, wenn der Kommissionierer keine Bewegung durchführt und alle Vorgänge an einem fixen Standort stattfinden. Grundsätzlich wird deswegen zwischen Abgabe mit und ohne Transport differenziert. Ein möglicher Transport kann dabei vom Kommissionierer selbst durchgeführt oder durch ein Fördermittel realisiert werden. Eine denkbare Realisierung für den ersten Fall ist eine nicht angetriebene Rollenbahn, auf welcher der Kommissionierer innerhalb seines Arbeitsbereichs den Sammelbehälter entlang einer Regalfront vom Übernahmepunkt bis zum Abgabeort transportiert. Beispielhaft für die zweite Möglichkeit ist eine Fördertechnik, welche die entnommenen Güter von festen Kommissionierungspunkten zu einem Konsolidierungspunkt fördert. Häufig werden zum Transport, analog der Bewegung zur Bereitstellung, Stetigförderer wie Rollenbahnen, Gurt- oder Kreisförderer verwendet. Unstetigförderer wie fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) werden heute ebenfalls zu diesem Zweck eingesetzt.

3.1.7 Rücktransport der angebrochenen Lagereinheiten

Sofern ein Transport der Güter zur Bereitstellung durchgeführt werden muss, besteht die Möglichkeit, dass nach erfolgter Entnahme eine Restmenge in der Bereitstellung verbleibt, die von dort abzutransportieren ist [VDI 3590a]. Verbleibt die La-deeinheit bis zur vollständigen Entnahme der Artikel am Bereitstellort, findet kein

Tabelle 3.4 Grundfunktionen des Informationsflusssystem nach [JÜS99]

Grundfunktion	Realisierungsmöglichkeit		
Auftragserfassung	manuell	manuell, automatisch	automatisch
Auftragsaufarbeitung	Einzelaufrag	Auftragsgruppen	Teilauftrag
	keine	manuell	manuell, automatisch
Weitergabe	ohne Beleg		mit Beleg
	Einzelposition		mehrere Positionen
Quittierung	Teilauftrag	je Position	alle Positionen
	manuell	manuell, automatisch	Auftragsgruppen

Rücktransport statt. Oftmals erfolgt aber ein Rücktransport in ein Lager oder Anbruchlager direkt nach der Entnahme. Der Rücktransport kann dabei wieder ein-, zwei- oder dreidimensional sowie manuell, mechanisiert oder automatisch erfolgen.

3.2 Informationsfluss

Wesentliche Elemente, die den Informationsfluss eines Kommissioniersystems bestimmen, sind der Kundenauftrag, der Kommissionierauftrag und die zu kommissionierende Position.

Der Informationsfluss besitzt elementaren Einfluss auf die Funktionalität und Effizienz eines Kommissioniersystems. Nur bei einer fehlerfreien, vollständigen, rechtzeitigen und bedarfsgerechten Erfassung, Verarbeitung und Bereitstellung der Informationen kann ein Kommissioniersystem die geforderte Leistung erbringen. Schlüsselemente sind dabei die Erfassung des Systemzustands und eine Bestandsfortschreibung, die für kurze Reaktionszeiten elementar sind. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Identifizierungstechnik (Identifikation der Artikel bzw. Verpackungs- oder Ladeeinheiten). Der Informationsfluss kann in vier Grundfunktionen unterteilt werden:

- Erfassung der Kundenaufträge
- Auftragsaufbereitung
- Weitergabe in den entsprechenden Kommissionierbereich
- Quittierung der Entnahme

Anhand des in Tabelle 3.4 dargestellten morphologischen Kastens lassen sich durch vertikale Kombination der einzelnen Elemente Strukturen für informationsflussbezogene Aspekte von Kommissioniersystemen erarbeiten. Im Folgenden werden die jeweiligen Teilfunktionen einzeln vorgestellt und mit Beispielen erläutert.

3.2.1 Erfassung der Kundenaufträge

Die Erfassung des Kundeauftrags beinhaltet alle Tätigkeiten und Verfahren, um die notwendigen Daten für eine Auftragsbearbeitung zu ermitteln. Dabei werden oftmals aus Servicegründen dem Kunden verschiedene Möglichkeiten der Auftragserteilung angeboten. Im einfachsten Fall wird die Information manuell erfasst, im Allgemeinen telefonisch, per Fax, per Datenübertragung oder Internetshop und in wenigen Ausnahmefällen auch per Brief oder Postkarte. Sofern eine permanente Bestandsfortschreibung durchgeführt wird und der Mitarbeiter über einen entsprechenden Zugang zum Warenwirtschaftssystem verfügt, kann der Auftrag umgehend bestätigt werden (nach der Kontrolle der Lieferfähigkeit). Dies ist eine wichtige Serviceleistung, da dem Kunden dadurch die Möglichkeit gegeben wird, den nicht verfügbaren Artikel anderweitig zu beschaffen. Bei der Übermittlung per Telefax oder per Post ist eine solche Bestätigung dagegen nur zeitverzögert möglich. Zugleich ist die Möglichkeit einer Fehlübertragung ungleich höher, da eventuelle Fehler nicht mehr unmittelbar durch den Mitarbeiter aufgezeigt werden können. Vorteilhafter gestaltet sich hier die automatische Unterstützung, bei welcher der Kunde lediglich die gewünschten Daten in eine entsprechende Vorlage rechnergestützt (Eingabemaske) eingeben muss und deren Ausgabe automatisch z. B. per E-Mail erfolgt. Bei der automatischen Auftragserfassung besteht eine Online-Verbindung zwischen Kunden und Lieferanten. Der Kunde kommuniziert dabei unmittelbar mit dem Lieferanten und erhält bei der Bestellung die Lieferbestätigung, d. h. eine Aussage über die Lieferfähigkeit des gewünschten Artikels. Heute gängige Techniken zur Online-Abwicklung von Bestellungen werden unter dem Begriff E-Commerce zusammengefasst [JÜS99].

3.2.2 Auftragsaufbereitung

Die im System eingegangenen Kundenaufträge werden systemspezifisch in interne Kommissionieraufträge umgewandelt. Hierbei werden z. B. fehlende lagerspezifische Daten ergänzt und eine Sortierung der Positionen in der Reihenfolge, in der sie im Regal angeordnet sind, vorgenommen. Die Kundenaufträge werden zunächst in einem Auftragspool gesammelt, wobei die Informationen in einer sogenannten Auftragsmatrix hinterlegt werden. Jede Spalte dieser Matrix repräsentiert einen einzelnen Kundenauftrag und jede Zeile einen Artikel des Unternehmens. In den einzelnen Zellen werden die angeforderten Mengen aus einem Kundenauftrag einge-

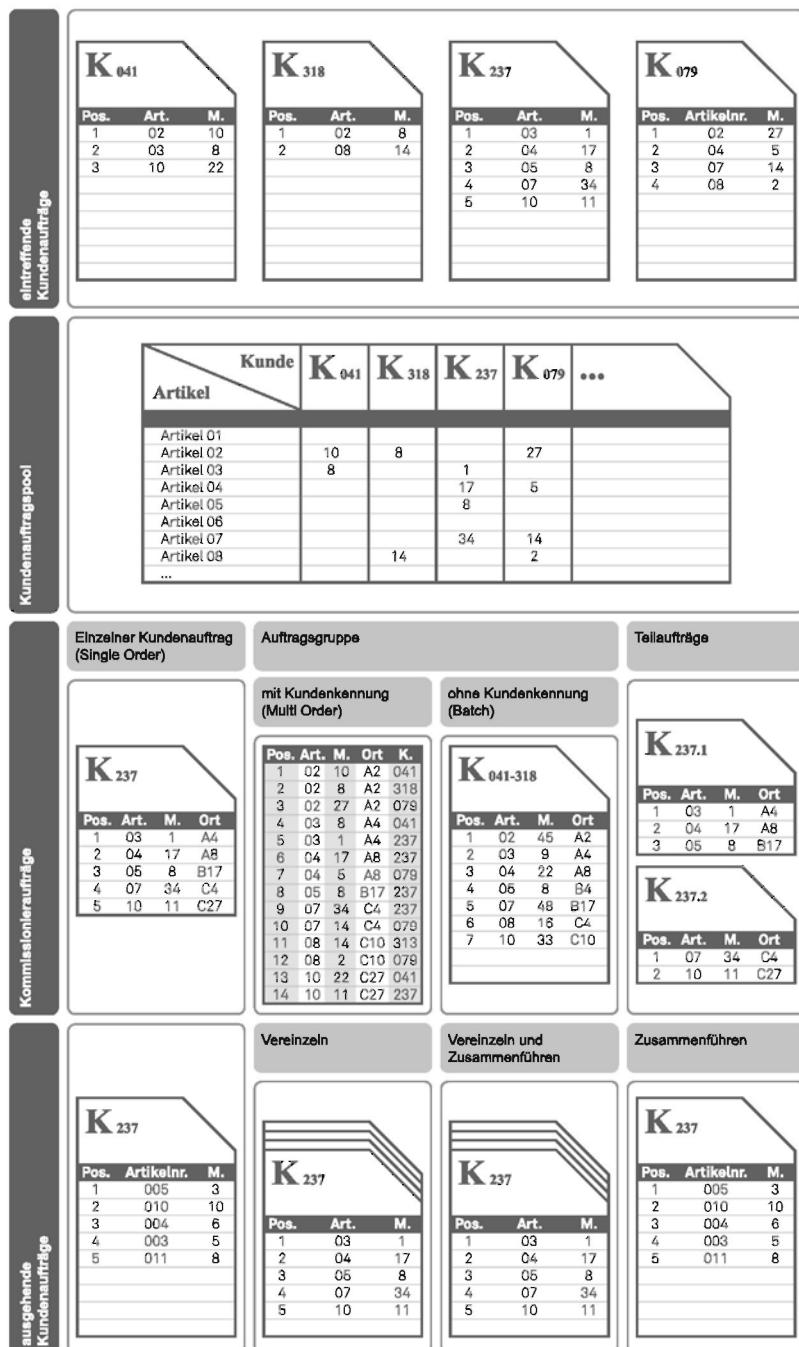


Abb. 3.5 Möglichkeiten der Auftragsaufbereitung und -bearbeitung

tragen. Wird ein Artikel von einem Kunden nicht benötigt, wird er in der Matrix folglich auch nicht eingetragen und so mit der Mengenanforderung „0“ hinterlegt. Eine eindeutige Identifizierung jedes Kundenauftrags erfolgt durch die im Spaltenkopf angegebene Kundenkennzeichnung und Auftragsnummer. Der Vorgang der Auftragsaufbereitung ist in Abb. 3.5 dargestellt.

Grundsätzlich ergeben sich, in Abhängigkeit von der organisatorischen Gestaltung des Kommissioniersystems, verschiedene Möglichkeiten für die Umwandlung der Kundenaufträge in interne Kommissionieraufträge. Zum einen kann ein Kundenauftrag als Einzelauftrag kommissioniert werden. Zum anderen können mehrere Kundenaufträge zu Auftragsgruppen zusammengefasst werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Kundenaufträge in Teilaufträge aufzusplitten.

Einzelauftrag Im einfachsten Fall entspricht der Kommissionierauftrag dem Kundenauftrag. Diese Art der Auftragsaufbereitung ist bei einer Einzelbearbeitung (engl. Single Order Picking) eines Auftrags in der einstufigen (auftragsorientierten) Kommissionierung sinnvoll (vgl. Kap. 3.3.2). Der Kundenauftrag geht dabei nahezu unverändert in das Kommissioniersystem ein. Er wird nur um die zum Kommissionieren notwendigen Daten ergänzt (Abb. 3.5). Eine Vereinzelung und Zusammenführung von Kundenauftragsteilen ist hierbei nicht erforderlich.

Auftragsgruppen Der Kommissionieraufwand und die Kommissionierzeit lassen sich dadurch reduzieren, dass mehrere Aufträge zu Auftragsgruppen oder sogenannten Sammelaufträgen (engl. Multi Order Picking) zusammengefasst werden. Ein Kommissionierer bearbeitet in diesem Fall mehrere Aufträge parallel. Diese Form der Auftragsaufbereitung wird in einstufigen Kommissioniersystemen beim Sortieren während des Kommissionierens unter Beibehaltung der Kundenzuordnung angewendet. In zweistufigen Kommissioniersystemen werden ebenfalls Auftragsgruppen gebildet. Dort werden mehrere Kundenaufträge zu einem sogenannten Batch (Auftragsstapel) zusammengefasst und artikelweise kommissioniert (vgl. Ablauforganisation), d. h. die Zuordnung eines bestimmten Artikels zu einem Kundenauftrag wird in diesem Fall aufgelöst. Nach der Kommissionierung müssen die Artikel vereinzelt und zu Kundenaufträgen zusammengeführt werden (Abb. 3.5).

Teilaufträge und Konsolidierung Insbesondere in sehr großen Kommissioniersystemen ist die Auftragsdurchlaufzeit meist sehr hoch. Zur Reduzierung der Durchlaufzeit besteht die Möglichkeit, eine Aufsplittung der Kundenaufträge in sogenannte Teilaufträge vorzunehmen. Dadurch kann ein Auftrag in mehreren Kommissionierbereichen gleichzeitig bearbeitet werden. Diese Art der Auftragsaufbereitung impliziert jedoch einen Konsolidierungsprozess in der Kommissionierung, d. h. das Zusammenführen der Kundenauftragsteile (Abb. 3.5).

Das Vorgehen bei der Auftragsaufbereitung im Zusammenhang mit der ablauforganisatorischen Auftragssteuerung in einem konventionellen Kommissioniersystem wird in Kap. 3.3.2 ausführlich dargestellt.

3.2.3 Weitergabe des Kommissionierauftrags

Nach der Aufbereitung der Aufträge müssen diese Informationen in den Kommissionierbereich weitergegeben werden. Der Kommissionierer erhält die zur Entnahme notwendigen Informationen entweder mittels eines Belegs bzw. papiergebunden in Form einer Kommissionier- oder Pickliste oder ohne einen Beleg bzw. papierlos durch elektronische Medien. Die papierlose Informationsübertragung erfolgt durch mobile oder stationäre Datenterminals oder mittels visueller Fachanzeigen an den einzelnen Regalfächern. Die Eigenschaften der einzelnen Systeme und deren technische Ausführung werden im Kap. 4.2 ausführlich vorgestellt. Die Weitergabe der Information kann bei den papierlosen Kommissioniersystemen entweder nacheinander erfolgen, also jede Position einzeln, oder durch die Anzeige mehrerer Positionen gleichzeitig [JÜS99].

3.2.4 Quittierung der Kommissionierung

Nachdem der Entnahmevergang eines Artikels stattgefunden hat, muss dies in Form einer Quittierung bestätigt werden. Die Quittierung dient zum einen zur Kontrolle der durchgeführten Entnahmen, zur Vollzugsmeldung nach Abschluss eines Auftrags und zum anderen zur Erfassung eventueller Fehlmeldungen. Die Quittierung einer erfolgten Entnahme kann entweder durch Abhaken der Position auf der Pickliste oder durch entsprechende Eingabe in ein Datenterminal oder eine Fachanzeige erfolgen (manuell mit automatischer Unterstützung). Eine automatische Quittierung kann durch automatische Erfassung eines Identifizierungsmerkmals (z. B. Barcode, RFID-Tag) erfolgen. Dabei kann jede einzelne Entnahmeeinheit, jede Position einzeln oder ein gesamter Kommissionierauftrag quittiert werden [JÜS99].

3.3 Organisation

Einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz und damit auch auf die Systemwahl besitzt die Organisationsform des Kommissioniersystems, d. h. die Wahl der Struktur und Steuerung der Abläufe innerhalb des Kommissioniersystems. Gängigerweise werden dabei die *Aufbauorganisation*, d. h. die Struktur der Anordnung der Lagerbereiche, und die *Ablauforganisation*, d. h. die Abwicklung des Kommissionierprozesses, sowie die *Betriebsorganisation* unterschieden.

Anhand des in Tabelle 3.5 dargestellten morphologischen Kastens lassen sich durch vertikale Kombination der einzelnen Elemente Strukturen für organisatorische Aspekte von Kommissioniersystemen erarbeiten. Im Folgenden werden die jeweiligen Teilfunktionen einzeln vorgestellt und mit Beispielen erläutert.

Tabelle 3.5 Grundfunktionen des Organisationssystem nach [JÜS99]

Teilsystem	Realisierungsmöglichkeit		
Aufbauorganisation	einzonig	mehrzonig	Bereiche durch Technik Zonung durch Organisation
Ablauforganisation	einstufig	zweistufig	auftragsseriel auftragsparallel zonenseriel zoneparallel
Betriebsorganisation	ohne Optimierung	mit Optimierung	

3.3.1 Aufbauorganisation

Die Aufgabe der Aufbauorganisation besteht in der Festlegung einer geeigneten Struktur für ein Kommissioniersystem. Im Vordergrund steht dabei die Frage, welche Bereitstellsysteme für die verschiedenen Artikelgruppen geeignet sind und wie die Systemtypen miteinander verknüpft werden. In jedem Fall setzt dieser Schritt eine sorgfältige Analyse des Sortiments und der Auftragsstruktur voraus. Üblicherweise leiten sich daraus variierende Anforderungen an Kapazität, Leistung und Eigenschaften des Bereitstellsystems ab. Solche Anforderungen (vgl. hierzu auch Tabelle 8.2) resultieren u. a. aus

- Volumina, Gewichten und Abmessungen der Bereitstelleinheiten,
- Umschlaghäufigkeiten bzw. Zugriffshäufigkeiten pro Artikel,
- mittleren Entnahmemengen pro Artikel, pro Zeiteinheit, pro Zugriff,
- häufigen Kombinationen einzelner Artikel,
- Sicherheitsanforderungen (hochwertige Güter),
- Temperatur- und Sicherheitsanforderungen.

Da die Bereitstellsysteme sich technisch unterscheiden und dadurch besondere Eignungsschwerpunkte für bestimmte Artikelgruppen aufweisen, ist gegebenenfalls die Nutzung unterschiedlicher Systemtypen sinnvoll. Deshalb werden gängigerweise *Bereiche* für unterschiedliche Artikeltypen gebildet. Aus organisatorischer Sicht können innerhalb eines Bereitstellsystems *Zonen* eingeteilt werden. Dies kann beispielsweise durch Bereitstellung der Produkte nach einer Einteilung in ABC-Klassen erfolgen (vgl. auch Kap. 6.1.1) oder durch die Zuweisung des Personals in abgegrenzte Arbeitsbereiche. Von einem einzonigen Kommissioniersystem wird gesprochen, wenn für alle Produktgruppen die gleiche Technik und das gleiche Kommissionierprinzip angewendet werden und keine organisatorischen Zonen bestehen.

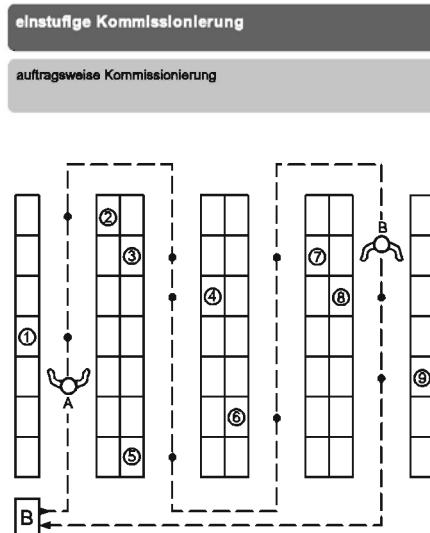


Abb. 3.6 Einstufige Kommissionierung

Mehrzonige Systeme zeichnen sich entweder durch den Einsatz verschiedener technischer Teilsysteme für unterschiedliche Produktgruppen und die sich daraus ergebenden unterschiedlichen Kommissionierprinzipien aus oder verfügen über organisatorische Zonen aufgrund von abgegrenzten Arbeitsbereichen oder einer ABC-Zonung (Tabelle 3.5).

3.3.2 Ablauforganisation

Im Rahmen der Ablauforganisation wird die operative Verfahrensweise in einem bestehenden Lager- und Kommissioniersystem festgelegt. Neben der Vorgehensweise bei der Bearbeitung von Kommissionieraufträgen wird die Bewegungsstrategie des Kommissionierers im System geregelt. Grundlegend kann hierbei eine einstufige (auftragsweise) und zweistufige (artikelweise) sowie eine serielle und parallele Kommissionierung unterschieden werden.

Einstufiges Kommissionieren

Bei der *einstufigen Kommissionierung* wird ein Kundenauftrag anhand einer Kommissionier- oder Pickliste, die in Papierform oder virtueller (papierloser) Form vorliegen kann, zusammengestellt (vgl. Kap. 4.2). Die Kommissionierung erfolgt auftragsweise, d. h. dass jederzeit der Bezug zum Kundenauftrag besteht. Bei dieser Form der Kommissionierung bestehen mehrere Möglichkeiten der Auftragsaufbereitung und daraus folgend der Steuerung des Auftrags durch das gesamte Kommissioniersystem.

Einfache, auftragsweise Kommissionierung Im einfachsten Fall wird der Kundenauftrag durch Ergänzung der kommissionierspezifischen Angaben (z. B. Lagerplatz) direkt in einen Kommissionierauftrag überführt und durch *einen* Kommissionierer *vollständig* abgearbeitet. Bei dieser Organisationsform wird der gesamte Auftrag in einer Zone abgearbeitet. Ist ein Auftrag abgeschlossen, wird der nächste begonnen. Die Bearbeitung erfolgt demnach *auftragsseriell*. Dieses Prinzip wird als *einfache, auftragsweise Kommissionierung* bezeichnet und ist bei Anwendung des Prinzips Person-zur-Ware sinnvoll, falls die durchschnittliche Auftragsgröße, d. h. die in einem Auftrag angeforderte Stückzahl, die Transportkapazität des Kommissionierers nicht überschreitet. Im englischsprachigen Raum wird in diesem Fall von *Single Order Picking* gesprochen. Vorteil dieses Prinzips ist der geringe Aufwand der Vorbereitung, da im Minimalfall der eingegangene Kundenauftrag direkt als Kommissionierliste verwendet werden kann. Da die Pickfolge im Minimalfall unmittelbar durch den Auftrag vorgegeben ist, legt der Kommissionierer u. U. lange Wege zurück.

Auftragsparallele Kommissionierung Eine weitere Form der Auftragsabwicklung ist die gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Kundenaufträge. Hierbei werden mehrere Kundenaufträge zu einer Auftragsgruppe zusammengefasst und synchron in einer Zone von einem Mitarbeiter bearbeitet. Der Mitarbeiter führt mehrere Kundenauftragsbehälter mit sich. Dieses Prinzip wird als *auftragsparalleles Kommissionieren* oder *Sortieren während der Kommissionierung* bezeichnet, da die entnommene Ware direkt bei der Abgabe einem Kundenauftragsbehälter zugeordnet wird. Im englischsprachigen Raum wird in diesem Zusammenhang auch der Begriff *Multi Order Picking* verwendet. Durch das Zusammenfassen mehrerer Einzelaufträge werden Bündelungseffekte ausgenutzt. Dazu muss die Kommissioniererführung so organisiert sein, dass der Mitarbeiter automatisch von Entnahmestelle zu Entnahmestelle geleitet wird. Der Anstieg der Entnahmepunktdichte (Pickdichte) führt zudem zu einer Reduzierung der mittleren Wegzeit pro Auftrag in einem Person-zur-Ware-System.

Zonenserielle Kommissionierung In der Praxis sind Kommissioniersysteme oft in mehrere Zonen oder Bereiche unterteilt (vgl. Aufbauorganisation). Beinhaltet ein Kommissionierauftrag Positionen aus mehreren Zonen, so kann eine zonenserielle Kommissionierung erfolgen, bei der der Auftrag sequenziell alle Zonen durchläuft. Die Bearbeitung kann entweder durch einen Kommissionierer über

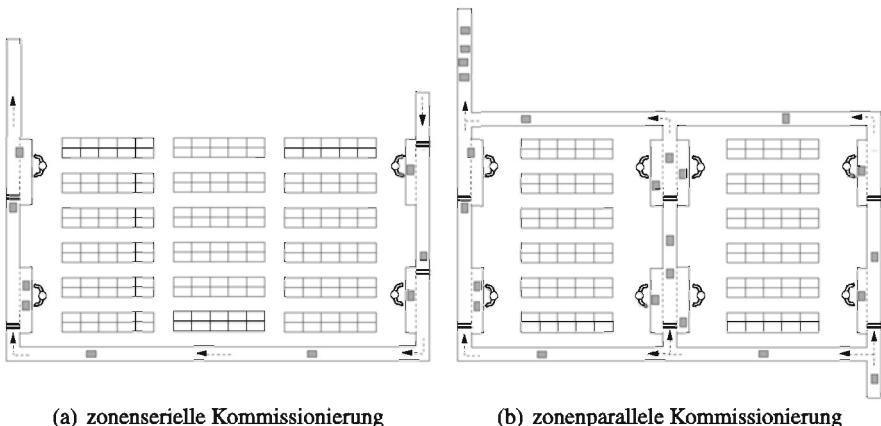


Abb. 3.7 Prinzipdarstellung der zonenseriellen und -parallelen Kommissionierung

alle Zonen erfolgen oder der Auftrag wird am Ende einer Zone an den folgenden Kommissionierer übergeben. Letzteres wird auch als Weiterreichsystem bezeichnet (Abb. 3.7(a)). Sektionen, in denen keine Artikel entnommen werden, können dabei mit Fördertechnik überbrückt werden, was einen Vorteil dieser Variante darstellt. Gleiches gilt auch, wenn das Lager in mehrere Bereiche aufgrund von unterschiedlichen Techniken eingeteilt ist. Weiterhin kann durch die serielle Bearbeitung ein hohes Verkehrsaufkommen mit nahezu unkoordinierbarem Ablauf verhindert werden. Ein Charakteristikum dieses Prinzips ist, dass der Kundenauftrag zu keinem Zeitpunkt von mehreren Kommissionierern gleichzeitig bearbeitet wird.

Zonenparallele Kommissionierung Alternativ zum zonenseriellen Kommissionieren können die Kundenaufträge auch in mehrere Teilaufträge zerlegt werden, die jeweils zeitlich parallel in den einzelnen Zonen kommissioniert werden (Abb. 3.7(b)). Dies gilt auch, wenn das Kommissioniersystem in technische Bereiche aufgeteilt ist. Dieses Verfahren wird als parallele bzw. exakter als *zonensparallele Kommissionierung* bezeichnet. Der Vorteil der zonensparallelen Kommissionierung besteht insbesondere in der Verkürzung der Auftragsdurchlaufzeit. Ein steigender Zeitbedarf für die Vorbereitung der Aufträge sowie die Konsolidierung der Teilaufträge verringern jedoch den möglichen Zeitgewinn durch die parallele Bearbeitung. In der Regel sind für die technische Umsetzung der Zusammenführung der Teilaufträge Puffer-, Sammel- oder Verteilsysteme notwendig. Ein zeitexaktes Fertigstellen der Aufträge in den verschiedenen Zonen wird dadurch jedoch erschwert.

Damit die verschiedenen Möglichkeiten der Ablauforganisation eindeutig voneinander abgegrenzt werden können, wird an dieser Stelle zunächst eine Typisierung eingeführt. Die Typen der Ablauforganisation können durch den Ausdruck $(O|M|Z)$

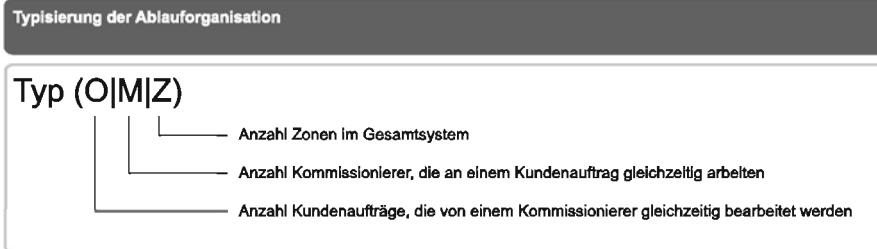


Abb. 3.8 Typisierung der Ablauforganisation

beschrieben werden (Abb. 3.8). Der Parameter (O) beschreibt die Anzahl der Kundenaufträge (Order), die gleichzeitig von einem Kommissionierer bearbeitet werden. Die einen Kundenauftrag gleichzeitig bearbeitenden Kommissionierer werden durch den Ausdruck (M) wiedergegeben (Man). Die Anzahl vorhandener Zonen im Gesamtsystem beschreibt die Angabe (Z) (Zones).

In Abb. 3.9 sind alle möglichen Typen der einstufigen Kommissionierung in einer Matrix dargestellt. Wird eine einfache, auftragsweise Kommissionierung durchgeführt und liegt keine Zonung vor, entspricht dies dem Typ (1|1|1). Die auftragsparallele Kommissionierung ohne Zonung des Lagers entspricht dem Typ (O|1|1). Das bedeutet, dass insgesamt O (mit $O > 1$) Aufträge von M = 1 Kommissionierern in Z = 1 Zonen gepickt werden. Ist das Kommissionierlager in mehrere organisatorische Zonen oder technische Bereiche unterteilt, können diese entweder hintereinander, also seriell, oder gleichzeitig, also parallel, durchlaufen werden. Die zonenserielle Kommissionierung, bei der innerhalb einer Zone eine einfache, auftragsweise Kommissionierung stattfindet, entspricht dem Ablauforganisationstyp (1|1|Z). In seltenen Fällen findet auch eine zonenserielle, auftragsparallele Kommissionierung statt, d. h. mehrere Kundenaufträge werden gleichzeitig von einem Kommissionierer in einer Zone gesammelt und danach an die nächste Zone übergeben. Dies entspricht dem Typ (O|1|Z). Bei der zonenparallelen Kommissionierung können zwei ablauforganisatorische Typen unterschieden werden. Zum einen kann ein Kundenauftrag von mehreren Kommissionierern zeitgleich in verschiedenen Zonen bearbeitet werden. Der Kundenauftrag muss dazu im Vorfeld in Teilaufträge aufgesplittet werden. Dies entspricht dem Typ (1|M|Z). Ebenfalls besteht die Möglichkeit, dass innerhalb einer Zone mehrere Teilaufträge gleichzeitig von einem Kommissionierer bearbeitet werden können. Auf das Gesamtsystem bezogen, werden dann mehrere Kundenaufträge von mehreren Kommissionierern in verschiedenen Zonen gleichzeitig bearbeitet. Nach der ablauforganisatorischen Typisierung entspricht dies dem Fall (O|M|Z).

Bei allen vorangenannten Verfahren der einstufigen auftragsweisen Kommissionierung ist die Bindung eines Artikels an den dazugehörigen Kundenauftrag jederzeit ersichtlich. Ist dies nicht der Fall, findet eine artikelweise Kommissionierung statt. Dieser Ablauforganisationstyp zählt zu den zweistufigen Kommissioniersystemen und wird im Folgenden erläutert.

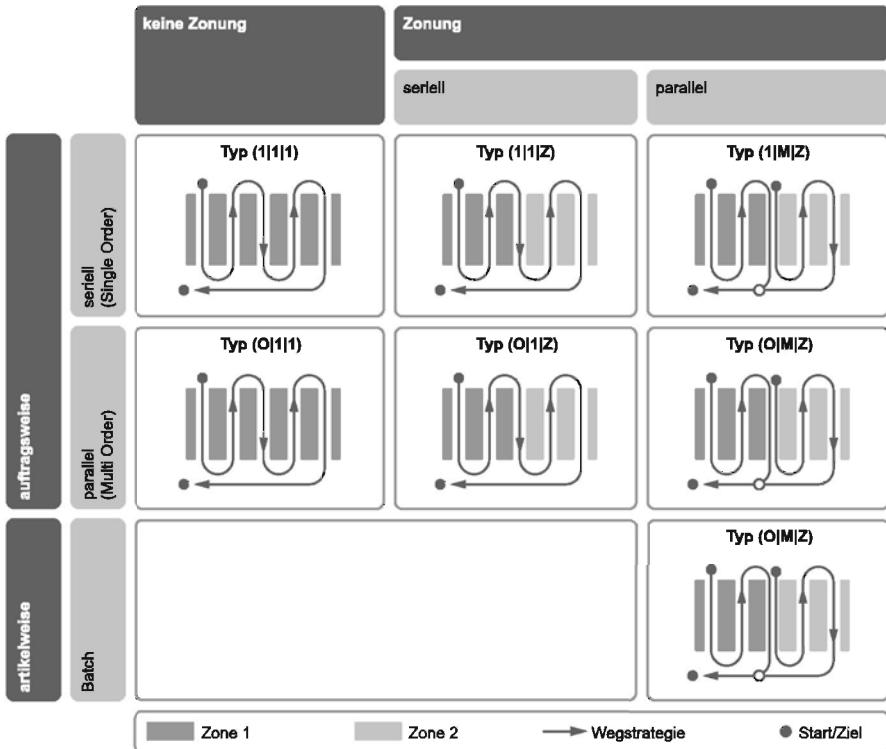


Abb. 3.9 Typen der Ablauforganisation

Zweistufiges Kommissionieren

Im Gegensatz zur einstufigen, auftragsweisen Kommissionierung werden bei der *artikelweisen Kommissionierung* die Prozesse der Entnahme und der Zusammenstellung der Kundenaufträge voneinander getrennt und in zwei Schritten oder *zweistufig* durchgeführt. Durch diese Maßnahme können alle in mehreren Aufträgen auftretenden identischen Artikel in einem Kommissionievorgang gepickt werden. Die Bereitstelleinheit ist nur einmal anzusteuern oder zum Entnahmestandort zu befördern. Dadurch können sowohl die Wegzeiten als auch die Greifzeiten erheblich reduziert werden. Hierbei können Bündlungseffekte durch das Zusammenfassen mehrerer Kundenaufträge erzielt werden. Die Entnahmepunktdichte steigt an und führt zu einer Zeilenreduktion, d. h. einer Reduzierung der Auftragspositionen [GUD78].

Um diesen Vorgang durchzuführen ist es notwendig, die Kundenaufträge zu sammeln und zu sogenannten *Batches* oder *Auftragsstapeln* zusammenzufassen, weshalb dieses Prinzip auch als *Batchkommissionierung* bezeichnet wird. Nachdem alle im Auftragsstapel enthaltenen Artikel in einer ersten Stufe kundenauftragsunabhängig kommissioniert wurden, erfolgt in einem zweiten Schritt die Vereinzelung und Zuordnung der Artikel auf die Kundenaufträge. Zur Durchführung dieses

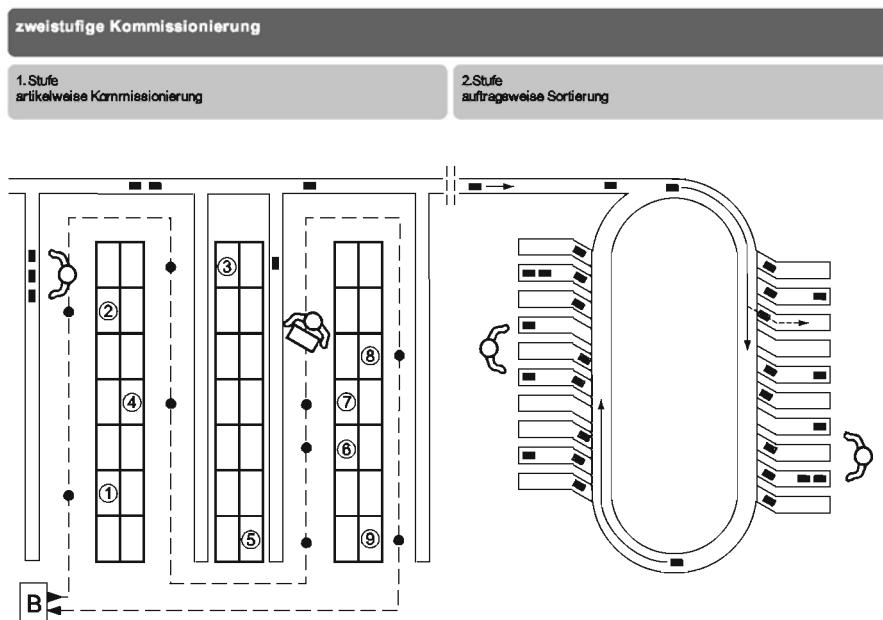


Abb. 3.10 Zweistufige Kommissionierung

zweiten Schrittes stehen verschiedene Sortier- und Verteilanlagen oder Sorter zur Verfügung. Ausprägungsformen und Eigenschaften von Sortier- und Verteilanlagen werden ausführlich in [JtH06] behandelt.

Nach der Typisierung der Ablauforganisation entspricht ein zweistufiges Kommissioniersystem dem Typ $(O|M|Z)$, denn mehrere Kundenaufträge werden von mehreren Mitarbeitern in verschiedenen Zonen gleichzeitig bearbeitet (Abb. 3.9).

Die Batchkommissionierung erfordert einen hohen Systemaufwand für die Auftragsvorbereitung, den Transport der Entnahmeeinheiten sowie der Verteilung auf Kundenaufträge, wodurch sich dieses Prinzip für Systeme mit einer geringen Auftragsanzahl weniger eignet.

Grundlegend kann also festgehalten werden, dass nicht in jedem Unternehmen der Einsatz eines zweistufigen Kommissioniersystems sinnvoll ist. Für den effizienten Betrieb eines zweistufigen Kommissioniersystem müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein. Die Artikel müssenförderfähig sein und die Auftragsaufbereitung muss rechnergestützt ablaufen. Weiterhin sollte eine ausreichend große Menge an Aufträgen mit geringer Anzahl Positionen vorhanden sein [GUD05].

Die Auftragssteuerung mittels Kommissionerbatches in zweistufigen Kommissioniersystemen und damit verbundene Optimierungspotenziale werden in Kap. 6.1.4 ausführlich erläutert.

3.3.3 Betriebsorganisation

Als Teil der Organisationsbausteine in Kommissioniersystemen verkörpert die Betriebsorganisation eine Menge unterschiedlicher Strategien zur Einlastung der Aufträge in das System. Sie bildet das dynamische Mittel, um den ständig wechselnden Anforderungen in einem Kommissioniersystem gerecht zu werden. Wechselnde Anforderungen in diesem Sinne stellen zum Beispiel saisonale Schwankungen der Auftragsmenge, Kapazitätsauslastung unter Berücksichtigung momentaner Personalstärke oder verfügbarer Systemleistungen und Priorisieren von Kunden oder Aufträgen dar [JÜS99].

Allgemein ist die Betriebsorganisation auftragsgesteuert, d. h. sie befasst sich mit der zeitlichen Reihenfolge, in der ein oder mehrere Kommissionieraufträge eingelastet werden. Grundsätzlich kann dies mit oder ohne Optimierung realisiert werden. In Systemen ohne Optimierung werden die Aufträge lediglich hintereinander, nach ihrer zeitlichen Ankunftsreihenfolge, abgearbeitet. In der Praxis wird dieses Vorgehen in Systemen mit geringer Leistungsanforderung angewandt. Hauptsächlich befasst sich die Betriebsorganisation jedoch mit der Optimierung des Gesamtsystems. Dabei wird u. a. bestimmt, in welcher Reihenfolge die Aufträge eingesteuert und bearbeitet werden, wie viel Personal in den Kommissionierzonen eingesetzt wird oder wann Nachschub bereitgestellt werden muss.

Die Steuerung der Prozesse im Rahmen der Betriebsorganisation kann prinzipiell zentral oder dezentral erfolgen. Bei zentral gesteuerten Prozessen bilden vorgeholtene Auftragsinformationen und lokal messbare Belegungsinformationen im Verwaltungssystem die Grundlage, wobei bei dezentral gesteuerten Prozessen die Entscheidung jeweils ohne Kenntnis des übergeordneten Systemzustands getroffen wird. Die Reaktion tritt somit erst auf, sobald das Objekt an der Entscheidungsschnittstelle eintrifft. Es handelt sich in diesem Fall um ein reines Push-System [ENK08].

Die Einlastung der Aufträge in das Kommissioniersystem erfolgt nach Buchung der Auftragsinformationen in einer Datenbank. Filterkriterien erlauben es, Aufträge gezielt zurückzuhalten und eine manuelle Freigabe herbeizuführen. Für einen reibungslosen Ablauf schließt sich eine Verfügbarkeitsprüfung unabdingbar an. Es wird überprüft, ob mit den vorhandenen Beständen im Kommissionierbereich eine komplette Auslieferung möglich ist. Es gelten des Weiteren verschiedene Ausführungsstrategien zur Abarbeitung der Kommissionieraufträge (vgl. auch Auftragsaufbereitung).

Die Betriebsorganisation befasst sich zudem mit der Personalplanung in den Kommissionierzonen. Dabei wird ausgehend von einem vorgegebenen Umsatzziel eine Monatsplanung oder aber eine tägliche bzw. wochenbezogene Planung erstellt. Diese orientiert sich an dem Ist-Personalstand und dem gegebenen Auftragsvorauf. Alle Personalplanungen stehen in engem Bezug zu den Auftragseinlastungen und haben als Grundlage die Kennzahlen der Auftragsstruktur, wie z. B. Anzahl der Positionen, Menge, Gewicht, die Auslastung der Kommissionierzone sowie das Verhältnis von Normal- und Eilaufträgen [GUD05].

Weiterhin regelt die Betriebsorganisation den Nachschub im Kommissioniersystem. Hier wird grundsätzlich zwischen vorsorglichem Nachschub und Bedarfsnachschub unterschieden. Der vorsorgliche Nachschub löst dann aus, wenn ein vorher eingestellter Mindestbestand nicht mehr vorhanden ist. Der Nachschub stellt sicher, dass das Regal entsprechend dem Höchstbestand aufgefüllt wird. Der Bedarfsnachschub wird erst dann aktiviert, wenn der momentane Bestand eines Artikels für den nächsten Auftrag unzureichend ist. Eine Kombination aus beiden Nachschubsystemen kann auch zu Spitzenzeiten eine gleichmäßige Systemauslastung bei maximaler Lieferbereitschaft sicherstellen [KAI08].

3.4 Grundprinzipien der Kommissionierung

Neben der Systematisierung von Kommissioniersystemen nach der VDI-Richtlinie 3590 existieren im Sprachgebrauch verschiedene Klassifizierungen, anhand derer ebenfalls eine Einordnung vorgenommen werden kann. Wie bereits einleitend in diesem Kapitel erwähnt, ist für die Zusammenstellung von kundengerechten Bedarfsmengen die Zusammenführung von Kommissionierer und Bereitstelleinheiten erforderlich. Abgeleitet aus der Abwicklung dieses Prozesses werden typischerweise die beiden Grundprinzipien Person-zur-Ware und Ware-zur-Person unterschieden.

Person-zur-Ware

Kennzeichnendes Merkmal dieses Kommissionierprinzips ist die Fortbewegung des Kommissionierers hin zu einer Bereitstelleinheit. Diese wird statisch in entsprechenden Lagermitteln bereithalten. Der Kommissionierer führt eine Bewegung durch und ist maßgeblich für die Zusammenführung beider Komponenten.

Im klassischen Fall bewegt sich der Kommissionierer bei der *Person-zur-Ware*-Methode mit einem Kommissionierwagen durch eine Regalanlage von Entnahmestelle zu Entnahmestelle. An den jeweiligen Entnahmestellen entnimmt er die angeforderten Artikel aus den Bereitstelleinheiten in den Regalen und legt diese in einen Sammelbehälter. Nach Fertigstellung des Kommissionierauftrags bewegt sich der Kommissionierer zu einer zentralen Basis, an der er den Sammelbehälter übergibt.

Ware-zur-Person

Mit *Ware-zur-Person* wird eine Methode beschrieben, bei der die zu kommissionierende Ware aus einem Lagerbereich an einen vorgegebenen Platz transportiert wird und dort vom Kommissionierer entnommen werden kann. Der Kommissionierer führt in diesem Fall keine Bewegung durch. Die angeforderte Ware wird fortbewegt.

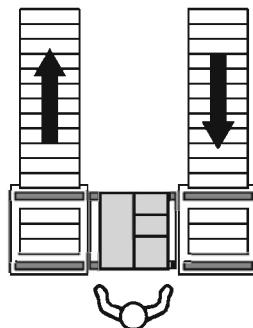


Abb. 3.11 Kommissionier-U

In einem typischen Beispiel für diese Kommissioniermethode steht der Kommissionierer an einer U-förmigen fördertechnischen Anbindung an einem automatischen Lager (Paletten- oder Behälterlager). Der Kommissionierplatz ist (in der Regel) vor Kopf des sogenannten Kommissionier-Us angeordnet (Abb. 3.11). Der Mitarbeiter entnimmt die geforderte Menge des Artikels von der bereitgestellten, artikelreinen Ladeeinheit und legt diese in den Auftragsbehälter. Die Bereitstelleinheit wird anschließend wieder zurückgelagert.

Beide Kommissioniergrundprinzipien können miteinander kombiniert werden. Ein Beispiel dafür ist die Kommissionierung entlang der Längsseite eines automatischen Kleinteilelagers. Der Mitarbeiter bewegt sich hierbei entlang einer Regalfront und entnimmt Artikel aus dynamisch bereitgestellten Behältern, die auf Arbeitshöhe platziert werden. Die Kommissioniereinheiten werden in einen Auftragsbehälter abgelegt, der nach Kommissionierung aller Positionen auf eine angetriebene Fördertechnik geschoben und zur nächsten Bearbeitungsstation transportiert wird. Nach der Entnahme werden die Bereitstelleinheiten wieder in das Regal zurückgelagert. In diesem Fall bewegt sich sowohl der Kommissionierer als auch die Ware zur Zusammenführung. Weitere Beispiele sind das zweistufige Kommissionieren mit Pick-to-belt und das sogenannte inverse Kommissionieren. Die verschiedenen Systemtypen werden in Kap. 5 näher erläutert. Das Vorgehen zur Leistungsberechnung beider Grundprinzipien wird in Kap. 7 behandelt.

Kapitel 4

Technische Komponenten von Kommissioniersystemen

Jedes Kommissioniersystem ist eine Kombination aus verschiedenen technischen Teilsystemen. Für jedes dieser Teilsysteme gibt es verschiedene Detaillösungen und Ausprägungsformen. Im Folgenden werden zunächst einzelne technische Funktionselemente eines Kommissioniersystems kurz vorgestellt. Darauf aufbauend werden die verschiedenen Möglichkeiten der informationstechnischen Kommissionierung erläutert und abschließend einige neue technische und informationstechnische Ansätze vorgestellt.

4.1 Technische Funktionselemente

Grundlegend lassen sich vier verschiedene technische Funktionselemente unterscheiden: Lager-, Förder- und Handhabungsmittel sowie Ladehilfsmittel. Die Sortertechnik wird an dieser Stelle als einzelnes Funktionselement nicht näher betrachtet, da sie als eine Kombination von Förder- und Handhabungsmitteln angesehen wird. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Systembausteine findet sich in [tHSN07]. In Tabelle 4.1 sind alle gängigen technischen Funktionselemente für den Bereich der Kommissionierung aufgeführt.

4.1.1 Lagermittel

Zur Bereitstellung der zu kommissionierenden Waren werden in der Praxis verschiedene Arten von Lagermitteln eingesetzt. Die Lagermittel können dabei in statische und dynamische Lagermittel eingeteilt werden (vgl. auch [tHSN07]). Bei der statischen Lagerung sind sowohl das Lagergut als auch das Regal ortsfest. Ein Lagermittel wird hingegen als dynamisch bezeichnet, wenn die Ladeeinheit nach dem Einlagern bewegt wird. Hierbei kann weitergehend unterschieden werden in dynamische Lagermittel, bei denen die Bewegung der Ladeeinheiten in feststehenden Regalen

Tabelle 4.1 Technische Funktionselemente in Kommissioniersystemen

Technische Funktionselemente in Kommissioniersystemen		Lagermittel	Fördermittel	Handhabungsmittel	Ladehilfsmittel
		dynamisch	statisch	Stetigförderer	umschließend
Fachbodenregal	Durchlaufregal	Niederhubwagen	Kommissionierwagen	Industrieroboter	Sauger
Palettenregal	Umlaufregal (vertikal/horizontal)	Stapler	Verschiebewagen	Pusher	Greifer
Behälterregal	Verschieberegal	Staurollenbahn	Regalbediengerät	Schwingarm	Tractiongripper
Liftsystem		Kanalfahrzeug	Bandförderer	Rüllchenbahn	Einspannahmen
Shuttlesystem		Aufzug		Dreharm	
		Vertefahrzeug		C-, S-Förderer	Spanner
		Kommissionierstapler		Rutsche	Schiebeschuhsortier
					Kippschalen sortier
					Quergürtelorter

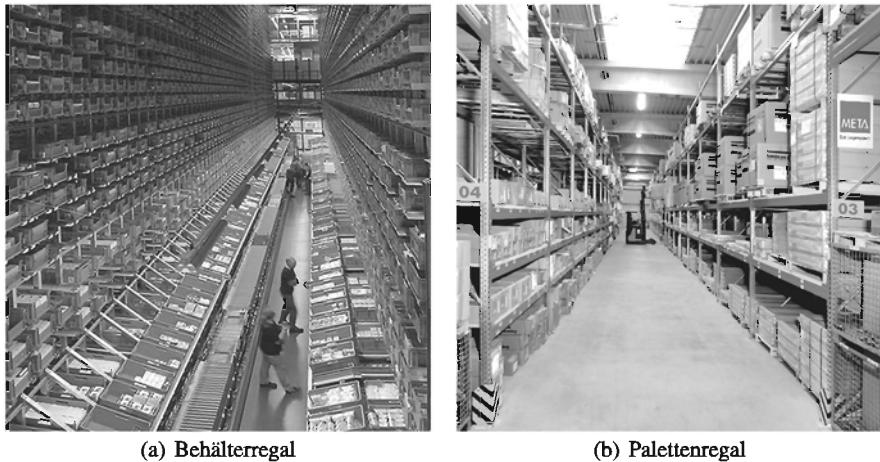


Abb. 4.1 Lagermittel [Fotos: TGW, META-Regalbau]

erfolgt, solche, bei denen die Ladeeinheit mit dem Regal bewegt wird und solche, bei denen die Bewegung der Ladeeinheit auf einem Fördermittel mit Lagerfunktion erfolgt. An dieser Stelle muss die dynamische Lagerung klar von der dynamischen Bereitstellung abgegrenzt werden. Die dynamische Bereitstellung beschreibt die Beförderung der Ladeeinheit zum Entnahmestandort (vgl. Kap. 3.1.2), während sich die dynamische Lagerung auf die Bewegung des Gutes während des Lagervorgangs bezieht.

Die verschiedenen Lagersysteme, die innerhalb eines Kommissioniersystems zum Einsatz kommen können, sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Statische Lagermittel sind u. a. Fachboden-, Behälter- und Palettenregale (Abb. 4.1). Für Langgut eignen sich Kragarm- und Wabenregale. Zu den dynamischen Lagermitteln zählen u. a. Durchlaufregale, horizontale und vertikale Umlaufregale sowie Verschieberegale.

4.1.2 Fördermittel

Im Allgemeinen wird die Fortbewegung bzw. Ortsveränderung von Gütern oder Personen mit technischen Hilfsmitteln als Transport bezeichnet. Wird dieser Transport in einem räumlich begrenzten Gebiet durchgeführt, beispielsweise innerhalb eines Betriebes oder Werkes, so wird für diesen Vorgang der Begriff Fördern verwendet. Das Fördern bzw. die Fördertechnik umfasst dabei alle notwendigen technischen, organisatorischen und personellen Mittel zur Bewegung von Gütern und Personen über relativ kurze Entfernung. Fördermittel sind dabei die Arbeitsmittel für den innerbetrieblichen Materialfluss. Neben dem reinen Güter- und Personentransport erfüllen Fördermittel jedoch noch weitere Aufgaben. Sie werden zum Verteilen, Sortieren, Puffern oder Zwischenlagern und in der Kommissionie-



Abb. 4.2 Kommissionieren mit einem Kommissionierwagen [Fotos: Bito, Vanderlande Industries]

rung zum Sammeln verwendet. Grundsätzlich lassen sich in der Kommissionierung Fördermittel zur reinen Ortsveränderung von Gütern und personengeführte Fördermittel unterscheiden. Die personengeführten Fördermittel dienen dem Transport von Personen zur Entnahme und nach erfolgter Entnahme zusätzlich der Ortsveränderung der kommissionierten Ware. Die personengeführten Fördermittel sind üblicherweise Unstetigförderer, wie Kommissionierwagen oder Kommissionierstapler. Das reine Fördern der Ware zur Bereitstellung oder zur Konsolidierung kann hingegen mittels Stetig- und Unstetigförderer durchgeführt werden. Als Stetigförderer werden dabei Fördermittel bezeichnet, die einen kontinuierlichen oder diskret kontinuierlichen Förderstrom erzeugen. Dies können z. B. Rollenbahnen, Bandförderer, Tragkettenförderer oder Rutschen sein. Eingesetzte Unstetigförderer sind üblicherweise Verschiebewagen, fahrerlose Transportfahrzeuge, Regalbediengeräte oder sogenannte Shuttlefahrzeuge. Im Folgenden werden Unstetigförderer, die speziell im Bereich der Kommissionierung zum Einsatz kommen, näher beschrieben.

Kommissionierwagen Sie dienen als Förder- und Lastaufnahmemittel während des herkömmlichen Person-zur-Ware-Kommissionievorgangs (Abb. 4.2). Stellenweise werden Sie auch als Etagenwagen bezeichnet. Im Gegensatz zu anderen Fördermitteln verfügt der Kommissionierwagen über keinen eigenständigen Antrieb. Zwar existieren Ausführungsformen, in denen zur Unterstützung ein Elektromotor implementiert ist, im üblichen Fall wird er jedoch vom Kommissionierer geschoben. Dieser bewegt sich mit dem Wagen durch die einzelnen Gassen und legt dabei die zu kommissionierenden Artikel direkt auf den Wagen oder in auf dem Wagen bereitgestellte Behälter. Der Kommissionierwagen ist in der manuellen Person-zur-Ware-Kommissionierung flexibel und in unterschiedlichen Ausführungsformen einsetzbar. Die Implementierung von Daten-Terminals, einer Put-to-light- oder Pick-by-voice-Steuerung ist problemlos möglich.



Abb. 4.3 Niederhubwagen mit Fahrerstand [Fotos: Jungheinrich]

Niederhubwagen Eine spezielle Form des herkömmlichen Gabelhubwagens sind Niederhubwagen. Ein Gabelhubwagen ist in der Lage, bestimmte Ladehilfsmittel (z. B. Europaletten, Gitterboxen, Rollcontainer) zu unterfahren und dann hydraulisch oder mechanisch anzuheben. Die Last kann demnach ausnahmslos nur vom Boden aufgenommen werden. Bei einem Niederhubwagen handelt es sich um die angetriebene Variante eines Gabelhubwagens. Dieser kann über eine Bedienerplattform verfügen, so dass neben dem zu fördernden Gut auch das Personal von Entnahmestandort zu Entnahmestandort transportiert wird. In einigen Ausführungsformen kann der Fahrerstand vertikal verfahren werden (Abb. 4.3), die Ladehilfsmittel jedoch nicht.

Der herkömmliche Gabelhubwagen und auch der Niederhubwagen mit Fahrerstand können aufgrund ihrer geringen Investitionskosten und Flexibilität in sämtlichen Verlade- und Transportaufgaben in nahezu allen Bereichen eines Betriebes eingesetzt werden. Besonders gut eignet sich die angetriebene Variante für große Kommissionierlager mit längeren Wegstrecken.

Horizontal- und Vertikal-Kommissionierfahrzeuge Sie sind angetriebene Flurförderzeuge, die zur effektiveren Gestaltung des Kommissionierungsvorgangs entwickelt wurden (Abb. 4.4). Unterschiedliche Ausführungsformen ermöglichen sowohl ein Mitfahren als auch ein Mitgehen des Kommissionierers.

Das Horizontal-Kommissionierfahrzeug kann ein bis maximal zwei Paletten hintereinander aufnehmen und erlaubt dem Kommissionierer eine Entnahme der Artikel aus den ersten beiden Palettenebenen. Durch die elektrische Motorisierung ist es in der Lage, Horizontalfahrten von Entnahmeposition zu Entnahmeposition durchzuführen. Die Implementierung eines Zusatzhubs ermöglicht die Anpassung der Ablagehöhe und dadurch eine angenehme ergonomische Arbeitshöhe. Das Horizontal-Kommissionierfahrzeug ist eine Erweiterung des Niederhubwagens.



Abb. 4.4 Horizontal- und Vertikal-Kommissionierfahrzeuge mit Fahrerstand [Fotos: Linde Material Handling]

Im Unterschied zur Horizontal-Variante verfügt das Vertikal-Kommissionierfahrzeug über einen Hubmast, der sowohl die Palette als auch den Bediener anheben kann. Durch die Installation eines Hubmastes ist ein Kommissionieren über mehrere Palettenebenen möglich. Wichtig ist, dass es sich bei der Gabel um eine starre Ausführung handelt. Das vertikale Kommissionierfahrzeug verfügt demnach über keinerlei Ein- oder Auslagerfunktion. Die Gabel dient lediglich dem Ablegen der zu kommissionierenden Artikel.

Kommissionierstapler In ihrem Grundaufbau ähneln Kommissionierstapler dem vertikalen Kommissionierfahrzeug. Beide Fördermittel unterscheiden sich jedoch in zwei wesentlichen Punkten: Der Kommissionierstapler ist in der Lage, das Ladehilfsmittel (z. B. Europlatten) eigenständig ein- und auszulagern und verfügt über eine größere Hubhöhe. Bedienerstand und Lastaufnahmemittel sind beim Kommissionierstapler an einem Hubgerüst durch den sogenannten Primärhub vertikal verfahrbar. In vielen Fällen ist das Ladehilfsmittel zusätzlich



Abb. 4.5 Kommissionierstapler [Foto: Crown-Gabelstapler]

vertikal verfahrbar, um die Ablagehöhe anzupassen und dem Kommissioner so ein ergonomisches Palettieren zu ermöglichen. Dies geschieht durch den entsprechenden Sekundärhub. Müssen neben den Teilmengen auch ganze Ladeeinheiten entnommen werden, so kommen Kommissionierstapler mit seitlichem Lastaufnahmemittel zum Einsatz. Dies kann je nach Ausführungsform eine Schwenkschubgabel oder auch Teleskopgabel sein. Das jeweilige Lastaufnahmemittel gewährt ein eigenständiges Ein- und Auslagern von Ladeeinheiten. Kommissionierstapler sind regalunabhängig und können in unterschiedlichen Gassen operieren. In der Gasse werden sie jedoch durch mechanische oder induktive Spurführung zwangsgeführt (Abb. 4.5). Sie erreichen eine Hubhöhe von bis zu 14,5 m.

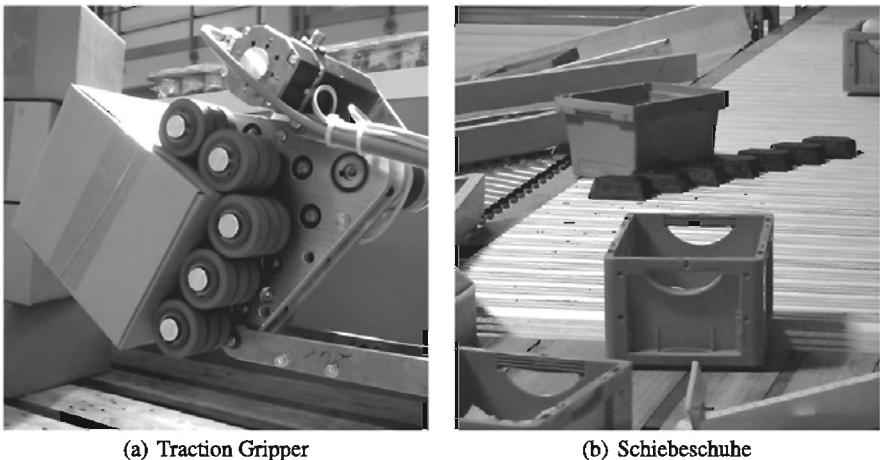


Abb. 4.6 Handhabungsmittel [Fotos: Fraunhofer IML.]

4.1.3 Handhabungsmittel

Nach der VDI-Richtlinie 2860 beschreibt der Begriff Handhaben das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung [VDI 2860]. Nicht alle Vorgänge im Verlauf des gesamten Kommissionierprozesses werden durch Personen ausgeführt. Partiell kommen auch verschiedene Handhabungstechniken zum Einsatz, die zum einen zur Bewegung von Ladeeinheiten und Kommissioniergütern dienen und zum anderen gerade bei vollautomatischen Kommissioniersystemen den Greifvorgang durchführen.

Handhabungstechniken zur Bewegung der Güter kommen häufig zur Sortierung der Güter zum Einsatz. Sorter sind eine Kombination aus Fördermitteln und Handhabungsmitteln. In der Kommissionierung werden Sorter hauptsächlich in zweistufigen Kommissioniersystemen mit Pick-to-belt und Batchbetrieb eingesetzt. Die Installation von Pushern, Schwingarmen oder Schiebeschuhen auf Fördermitteln kann bei Bedarf Richtungsänderungen, z. B. in eine vorbestimmte Endstelle, verursachen (Abb. 4.6(b)). Greifvorgänge können mittels verschiedener Einrichtungen zum Festhalten der Güter durchgeführt werden (Abb. 4.6(a)). Der Greifvorgang zur Entnahme von schweren und unhandlichen Gütern kann dabei vollautomatisch durch einen Roboter oder mechanisch gesteuert durch einen Menschen umgesetzt werden.



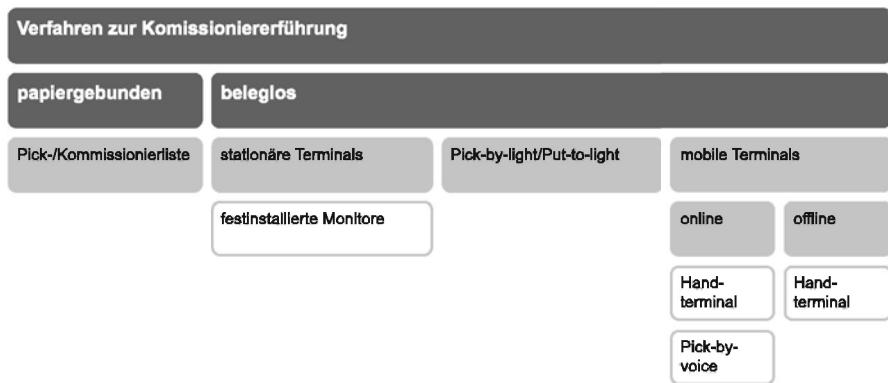
Abb. 4.7 Kommissionierbehälter [Foto: viastore]

4.1.4 Ladehilfsmittel

Ladehilfsmittel sind ein unabdingbarer Bestandteil der Kommissionierung. Mit ihrer Hilfe können Artikel zu Ladeeinheiten gebündelt werden. Weiterhin dienen sie als Hilfsmittel zur Konsolidierung von Kommissionierauftragspositionen und zum Transport der kommissionierten Artikel durch das gesamte System. Generell kann zwischen tragenden und umschließenden Ladehilfsmitteln unterschieden werden.

Zu den tragenden Ladehilfsmitteln zählt neben den Tablaren die genormte Europalette (Abmessungen: 800 mm x 1.200 mm). Zahlreiche im Materialfluss befindliche Elemente können auf die Grundmaße der Europalette abgestimmt werden.

Häufig anzutreffende Ladehilfsmittel in intralogistischen Systemen sind Behälter (Abb. 4.7). Für die Gestaltung eines logistikgerechten Materialflusses sind besonders auf Modulreihen aufbauende Behälterklassen wichtig. Der Behälter gehört zu den Kleinladungsträgern (KLT) und ist der Gruppe der umschließenden Ladehilfsmittel zuzuordnen. Die verschiedenen Ladehilfsmittel sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. An dieser Stelle sei abermals auf die ausführliche Betrachtung von Ladehilfsmittel in [tHSN07] verwiesen.

Tabelle 4.2 Kommissioniererführung

4.2 Informationstechnische Kommissioniererführung

Nachdem die Kundenaufträge erfasst wurden und eine entsprechende Aufbereitung der Auftragsdaten zu einem Kommissionierauftrag stattgefunden hat, folgt die Weiterleitung der Informationen an den Kommissionierer. Um einen Kommissionierauftrag auszuführen müssen dem Mitarbeiter einerseits Informationen über Art und Menge der Artikel, die entnommen werden sollen, und andererseits der Ort der Bereitstellung übermittelt werden. Über die reinen Entnahmedaten hinaus können zur Erreichung einer höheren Kommissionierleistung weitere Informationen wie z. B. der Weg des Mitarbeiters, Fehlmengen oder Kundenangaben angegeben werden.

Im Folgenden liegen speziell die verschiedenen Möglichkeiten der Führung des Menschen durch ein Kommissioniersystem im Fokus. Der Einsatz automatischer Kommissioniersysteme erfordert in jedem Fall spezialisierte, an das System angepasste Steuerungen. Die Weitergabe der Auftragsinformationen an den Kommissionierer kann mittels verschiedener Übermittlungsarten erfolgen. In Tabelle 4.2 sind die zurzeit gebräuchlichsten Möglichkeiten der Kommissioniererführung aufgeführt. Allgemein wird zwischen den beleggebundenen bzw. papiergebundenen sowie den beleglosen Verfahren unterschieden. Bei der papiergebundenen Informationsübermittlung wird auf Kommissionierlisten (auch Picklisten genannt) zurückgegriffen. Die beleglosen Übermittlungsverfahren teilen sich in stationäre und mobile Terminals, Pick-by-light, Put-to-light und Pick-by-voice auf.

4.2.1 Pickliste

Bei dieser Art der Kommissioniererführung erhält der Kommissionierer einen Papierbogen mit den zur Entnahme notwendigen Informationen. Diese sogenannten *Picklisten* oder auch *Kommissionierlisten* sind prinzipiell für alle Kommissioniersys-



Abb. 4.8 Stationäres Kommissionierterminal [Foto: viastore]

teme geeignet. Vorteile der Pickliste liegen in der einfachen Ausfertigung, der kostengünstigen Vorbereitung sowie der simplen Umsetzung des Prinzips. Ebenso kann der Kommissionierer hierbei verschiedene Nebentätigkeiten (z. B. das Aufbringen von Preisschildern) ausführen. Um Pickfehler zu vermeiden ist großer Wert auf die Gestaltung, besonders die Lesbarkeit und die Eindeutigkeit, der Kommissionierliste zu legen. Nachteilig wirkt sich der hohe Totzeitanteil durch Identifizieren von verschiedenen Entnahmepositionen und die Handhabung der Liste aus. Darüber hinaus weist diese Art der Kommissionierung eine geringe Flexibilität auf. Dies zeigt sich z. B. bei Änderungen in Anzahl oder Menge der zu entnehmenden Artikel. Die gedruckte Liste kann nur mit hohem Aufwand (in der Regel nachträglich) geändert werden. Wenig sinnvoll ist die Bereitstellung der Kommissionierinformationen in papiergebundener Form bei (teil-)automatisierten Anwendungen (speziell bei vollautomatischen Ware-zur-Person-Lösungen), da hierbei die Steuerungsinformationen der Anlage ohnehin in elektronischer Form zur Verfügung stehen.

4.2.2 Stationäre Terminals

Eine Form der beleglosen Kommissioniererführung ist der Einsatz eines stationären Terminals. Ein Terminal ist ein Ein- und Ausgabegerät, über das ein Bediener interaktiv mit einem Datenverarbeitungssystem kommunizieren kann. Mindestbestandteile sind ein Anzeigemedium (Bildschirm, LCD-Anzeige oder Display) und ein Eingabemedium (Tastatur, Bedienungstasten oder Scanner). Bei Terminals für die Kommissioniererführung können ortsfeste (fest installierte bzw. stationäre) und mobile Lösungen unterschieden werden. Bei einem stationären Terminal zeigen fest installierte Monitore (online) die Entnahmeforinformationen an. Häufiges Einsatzgebiet solcher Systeme sind zentrale Kommissionierstationen, z. B. bei der



Abb. 4.9 Pick-by-light Panel für die manuelle Kommissionierung [Foto: Hörmann]

Ware-zur-Person-Kommissionierung (Abb. 4.8). Dabei sind diese oftmals direkt an das Warehousemanagementsystem (WMS) bzw. Enterprise-Ressource-Planning-System (ERP) angeschlossen. Ein Vorteil dieser Variante besteht in der uneingeschränkten Arbeitsweise des Kommissionierers, da beide Hände frei sind. Nachteilig sind demgegenüber die hohen Investitionskosten im Vergleich zur Pickliste. Außerdem weisen stationäre Terminals eine geringe Flexibilität in Bezug auf Ortsveränderungen im Rahmen von Restrukturierungen auf.

4.2.3 *Pick-by-light*

Pick-by-light-Lösungen gehören, wie schon die stationären Terminals, zu den ortsfesten Systemen. Bei dieser Methode der Kommissioniererführung, die in der Regel in Verbindung mit der Bereitstellung der Güter in Regalen erfolgt, erhält der Kommissionierer die notwendigen Informationen zur Entnahme über Anzeigefelder, die ober- bzw. unterhalb der Bereitstellplätze angebracht sind (Abb. 4.9). Der anzusteuende Platz wird durch das Aufleuchten einer Lampe signalisiert. Zur Anzeige der Entnahmemengen verfügen die meisten Systeme über ein Display. Neben der reinen Anzeigefunktion verfügen die Einheiten über verschiedene Korrekturmöglichkeiten und eine Taste, um die Entnahme zu quittieren. Pick-by-light-Systeme finden vorwiegend Anwendung in Bereichen, in denen kleinvolumige Artikel mit geringer Sortimentsbreite (bevorzugt Schnelldreher) kommissioniert werden. Vorteile sind die hohe Transparenz bei Bestandsänderungen, die Online-Erfassung des Auftragsstatus und die Möglichkeit der parallelen Auftragsbearbeitung. Die visuelle Kennzeichnung des Lagerplatzes und die Anzeige der Entnahmemenge am Bereitstellplatz führen zu einer Reduzierung von Totzeiten und demnach zu einer höheren Kommissionierleistung. Nachteilig wirken sich die hohen Anschaffungskosten (je ein Anzeigenfeld pro Entnahmepunkt), die Erfordernis eines übergeordneten Leitsystems und der hohe Organisationsaufwand aus.



Abb. 4.10 Beispiele von Put-to-light [Fotos: KBS Industrielektronik, Knapp]

4.2.4 *Put-to-light*

Put-to-light-Systeme zeigen dem Kommissionierer nicht den Entnahmestandort an, sondern visualisieren den Abgabeort der Kommissioniereinheit. Sie werden häufig bei der auftragsparallelen Kommissionierung in Kombination mit anderen Methoden der Kommissioniererführung eingesetzt, wie z. B. beim Sortieren während der Kommissionierung. Ein weiterer Anwendungsfall ist die inverse Kommissionierung. Durchschnittliche Leistungen von mehr als 800 Picks pro Stunde lassen sich mit kombinierten Systemen aus Pick-by-light- und Put-to-light-Anwendungen erreichen [HAN05]. An Ware-zur-Person-Kommissionierarbeitsplätzen werden beispielsweise stationäre Terminals und Put-to-light-Lösungen in der Art kombiniert, dass die Terminals Position und Menge des zu entnehmenden Artikels am Entnahmestandort anzeigen. Ein Lichtsignal leuchtet am Abgabebehälter bzw. am Abgabefach, dem Zielort der Pickbewegung. Abb. 4.10 zeigt eine mögliche Kommissionierplatzvariante. Die Artikel werden in mehrfach unterteilte Fächer auf einem verfahrbaren Wagen abgegeben, an denen ein Lichtsignal, ähnlich einer Pick-by-light-Anzeige, aufleuchtet. Ein Fach entspricht einem Abgabeort bzw. Kommissionierauftrag.

4.2.5 *Mobile Terminals*

Im Gegensatz zu den stationären Terminals, die prinzipiell online betrieben werden, kann bei den mobilen Systemen grundsätzlich zwischen einer Offline- und einer Online-Datenübertragung unterschieden werden.

Online-Geräte Früher aufgrund von fehlenden Alternativen häufig eingesetzte Infrarotverbindungen im Kommissionierbereich sind heute weitestgehend durch



Abb. 4.11 Mobile Terminals [Fotos: viastore, TGW]

Funklösungen ersetzt worden. In Einsatzfällen von drahtlosen Verbindungen, bei denen der Sender oder Empfänger sich bewegt, wie etwa bei Pick-by-voice-Anwendungen, sind Funkverbindungen durch schnellere Übertragung, eine einfacher zu realisierende bidirektionale Kommunikation sowie die unkomplizierte Skalierbarkeit Infrarotverbindungen signifikant überlegen. Darüber hinaus bedingt die keulenförmige Ausbreitung der Infrarotstrahlen eine gerichtete (gerichtete Reflexion) Aussendung und einen gerichteten Empfang der Signale. Die kugelförmige Ausbreitung der Funkwellen macht hingegen eine Ausrichtung des Senders/Empfängers unnötig. In der Praxis realisierte Anwendungen beruhen in der Regel auf lokalen Funknetzwerken (Wireless Local Area Network (WLAN)), die in Grenzen zulassungs- und meldefrei sind.

Alle nötigen Daten zur Erfüllung eines Kommissionierauftrags werden an ein mobiles Datenendgerät, welches über Funk mit einem Server oder Host kommuniziert, übertragen (Abb. 4.11). In der Regel verfügt es über eine Tastatur und eine alphanumerische Anzeige. Häufig sind diese Geräte mit Zusatzfunktionen wie Barcodescanner und Labeldrucker ausgestattet bzw. sind diese direkt in Geräten zur Identifizierung von Gütern integriert, z. B. Waagen zum Kommissionieren von Schüttgütern oder Kleinteilen (z. B. Schrauben).

Offline-Geräte Sie sind äußerlich oft nicht von Online-Versionen zu unterscheiden, verfügen aber nicht über die Option, Daten drahtlos zu übertragen. Diese Geräte müssen regelmäßig mit Docking-Stationen verbunden werden, um Informations- und physischen Materialfluss zu synchronisieren.



Abb. 4.12 Pick-by-voice [Foto: KBS Industrielektronik]

4.2.6 *Pick-by-voice*

Unter einem Pick-by-voice-System versteht man eine sprachgesteuerte Kommissioniererführung. Hierbei erhält der Mitarbeiter seine Arbeitsanweisungen von einem mobilen Terminal via Kopfhörer (Abb. 4.12). Zusätzlich ist ein Mikrofon zur Kommunikation mit dem Computer integriert. Die Stromversorgung wird über einen am Gürtel des Bedieners befestigten Akku sichergestellt. Vorteil dieser Technik ist, dass der Kommissionierer die Hände frei hat, da die Anweisungen über das Headset übermittelt werden. Die Bestätigung einer Aufgabe erfolgt über Spracheingabe. So wird etwa nach der Entnahme einer Einheit vom System eine Kontrollziffer generiert, die der Bediener zur Bestätigung nachsprechen muss. Grundsätzlich können Pick-by-voice-Systeme nach den in Tabelle 4.3 dargestellten Eigenschaften systematisiert werden. Diese Eigenschaften werden im Folgenden näher erläutert.

Zunächst kann die Client-Architektur in Thin-Client und Thick-/Fat-Client unterschieden werden. Allgemein wird als Thin-Client in einer Client-Server-Architektur ein Endgerät bezeichnet, dessen Hard- und Softwareausstattung auf ein Minimum beschränkt ist und lediglich den Zweck der Datenein- und -ausgabe besitzt. Möglichst alle Applikationen sind auf einem zentralen, allgemein leistungsstarken Server installiert, welcher die eigentliche Datenverarbeitung übernimmt. Im Fall von Pick-by-voice-Systemen bedeutet Thin-Client, dass sich die Software zur Spracherkennung bzw. -synthese (Text-to-Speech-System) nicht auf dem mobilen Terminal befindet. Im Gegensatz zu den Thin-Clients verfügen Thick-/Fat-Clients sowohl über eine größere Hardware- als auch Softwareausstattung. Somit wird weniger Bandbreite im Netzwerk benötigt und es entstehen zudem geringere Anforderungen hinsichtlich der Rechenleistung an den zentralen Server. Fat-Clients übernehmen bei Pick-by-voice-Systemen die Umwandlung von Auftragsdaten in Sprache sowie

Tabelle 4.3 Ausprägungsformen von Pick-by-voice-Systemen

Eigenschaften von Pick-by-voice-Systemen		
Client Architektur	Thick/Fat-Client	Thin-Client
Abhängigkeit vom Bediener	sprecherunabhängig	sprecherabhängig
Übermittlungsart	paketbasiert (TCP/IP)	streambasiert (IP-Layer)
Abhängigkeit beim Hardwareeinsatz	proprietäre Hardware	offene Plattform

auch umgekehrt die Spracherzeugung (Sprachsynthese). Vorteilhaft wirkt sich vor allem die Möglichkeit aus, auch offline Arbeiten zu können.

Um unterschiedliche menschliche Stimmen zu erkennen, existieren grundlegend zwei verschiedene Ansätze. Für sogenannte *sprecherabhängige* Systeme wird in der Regel durch Vorlesen eines standardisierten Textes ein individuelles Sprachprofil des Bedieners angelegt, welches nur für diesen Benutzer gültig ist. Bei der Spracherkennung werden dann die gespeicherten Frequenzverläufe mit den gesprochenen Worten verglichen, aufgrund einer statistischen Auswertung wird ermittelt, was gesprochen wurde. Bei Systemen, die unabhängig vom Bediener (*sprecherunabhängig*) funktionieren, sind zum Vergleich mit der Spracheingabe eine große Anzahl von Referenzmustern hinterlegt. Vorstellbar ist auch ein Mischsystem, das auf Basis eines sprecherunabhängigen Systems durch Training z. B. Akzente erkennen kann.

Weiteres Unterscheidungsmerkmal (Tabelle 4.3) ist die Art der Datenübertragung. Hier wird unterschieden in *paketbasierte* und *streambasierte* Methoden. Bei paketbasierten Systemen werden, bei den vorgestellten Architekturen, die Informationen in TCP/IP-Paketen übermittelt. Vorteil bei der Paketübertragung nach diesem Protokoll ist die Möglichkeit, dass Fehlerkorrekturen bei der Unterbrechung der Verbindung durchgeführt werden können. Dies ist bei der *streambasierten* Übertragung, bei der die Sprachdaten lediglich über den IP-Layer übertragen werden, nicht gewährleistet. Fehlende Informationen können nicht identifiziert und so auch nicht wiederholt werden. Verwendet wird diese Übertragungsart in Fällen, in denen Sprachdaten in Echtzeit übermittelt werden sollen, z. B. bei Internettelefonie oder Voice-over-IP (VoIP) [FÖL05a].

Letztlich können Pick-by-voice-Systeme, abhängig von verwendetem Betriebssystem und vorhandenen Schnittstellen, bezüglich der Abhängigkeit beim Hardwareeinsatz von Anbietervorgaben unterschieden werden. Wird in einem System *proprietäre* Hardware genutzt, so ist der Nutzer an bestimmte Geräte gebunden. Sollen dagegen herstellerunabhängig Geräte verwendet werden können, so ist eine *offene Plattform* zu wählen [FÖL05a].

Bei der Auswahl des Pick-by-voice-Systems sollte darauf geachtet werden, dass dieses mit einer mehrsprachigen Installation ausgestattet ist. Durch die Führung von

Dialogen des Nutzers in seiner Muttersprache kann in der Regel die Produktivität erhöht und die Fehlerrate gesenkt werden. Damit die in industrieller Umgebung auftretenden lauten Nebengeräusche die Funktion des Systems nicht beeinflussen, werden verschiedene Rauschfilter eingesetzt. Einerseits gibt es hardwareseitige Rauschunterdrückung im Mikrofon, andererseits existieren softwarebasierte Lösungen, um störende Geräusche zu unterdrücken.

Werden in einem Lager keine zusätzlichen Funktionen ausgeführt, ist ein Wortschatz von 100 Wörtern (bei ergänzenden Funktionen 1.000 Wörter) im Allgemeinen ausreichend, um alle Aufgaben zu erfüllen. Die Größe des Systemvokabulars ist eng mit der Dialogtiefe verbunden. Bei der Einarbeitung eines Nutzers in das System ist es wichtig, die Dialoge in ganzen Sätzen zu führen. Mit zunehmender Sicherheit und steigender Arbeitsleistung des Mitarbeiters nimmt die Dialogtiefe hin zu einwortigen Befehlen bzw. Zahlen ab. Die Veränderung der Dialogtiefe sollte das ausgewählte System dynamisch anpassen.

4.3 Neue Ansätze

Die Kommissionierung ist ein kostenintensiver Bereich eines Unternehmens, der immer wieder durch Verbesserung der Prozessabläufe oder durch technische Neuerungen optimiert wird. In den letzten Jahren gab es einige interessante neue Ansätze sowohl im Bereich der Kommissioniererführung als auch in der Automatisierung des Kommissionievorgangs, deren Marktreife noch nicht erreicht ist, die jedoch mit Blick in die Zukunft Erwähnung finden sollten.

4.3.1 Visionäre Systeme – Augmented Reality

Neben den in Abschnitt 4.2 vorgestellten Möglichkeiten der Kommissioniererführung gibt es seit einigen Jahren einen neuen Ansatz, der die Informationsbereitstellung mittels Augmented Reality ermöglicht.

Augmented Reality (AR) bedeutet wörtlich *erweiterte Realität*. In einem AR-System wird die reale Welt durch im Computer generierte Objekte ergänzt, die scheinbar im selben Raum wie die reale Welt bestehen. [ABB+01]

Neben dieser Definition beschreibt Azuma [ABB+01] folgende Eigenschaften, die ein AR-System auszeichnen:

- kombiniert reale und virtuelle Objekte in einer realen Umgebung,
- arbeitet interaktiv und in Echtzeit und
- registriert reale und virtuelle Objekte und richtet diese aneinander bzw. zueinander aus.

Bei dieser Definition verzichtet Azuma bewusst auf Beschränkungen hinsichtlich der eingesetzten Darstellungs-Technologien (wie z. B. head-mounted-display (HMD)) und der angesprochenen Sinne (potenziell kann AR auf alle Sinne angewendet werden, auch Tastsinn und Geschmackssinn). Darüber hinaus ist es in manchen Anwendungen notwendig, Objekte aus der wahrgenommenen Umgebung zu entfernen, um dort virtuelle Objekte einzufügen.

Nicht zu verwechseln ist diese Art der Kommissioniererführung mit der sogenannten erweiterten Virtualität (Augmented Virtuality (AV)) und der virtuellen Realität (Virtual Reality (VR)). Die AR stellt ein Teilgebiet der *vermischten Realitäten* dar. Abgrenzen lassen sich die verschiedenen Bereiche durch die Art der wahrgenommenen Umgebung. So wird bei der *erweiterten Realität* die reale Umgebung durch virtuelle Daten bereichert, im Gegensatz dazu ist bei der erweiterten *Virtuellen Realität* bzw. der *virtuellen Realität* die Darstellung der Umgebung zum größten Teil virtuell [MIK94].

Funktionsweise

Das Grundproblem bei Systemen der erweiterten Realität stellt die exakte Überlagerung der virtuellen Daten mit dem realen Objekt dar [SUT05]. Die Berechnung der exakten Positionierung der Überlagerungsbilder aus der Position des Bedieners und der Lage des Operationsbereichs nennt man Tracking. Man unterscheidet grundsätzlich zwei Verfahren.

- Beim markerbasierten Verfahren wird die Orientierung im Raum über Marker (Landmarken oder Passpunkte) erreicht. Die Marker werden mit einer Kamera aufgezeichnet und über spezielle Softwareanwendungen aus den Aufnahmen extrahiert und ausgewertet. Wird der Marker bewegt, so bewegt sich das Objekt im Raum ebenfalls. Eine Entwicklung, die markerbasierte Orientierung ermöglicht, ist das ARToolKit [KAB99]. Dabei handelt es sich um eine Open-Source-Bibliothek für eine C-Oberfläche, welche es dem Benutzer ermöglicht, Augmented Reality-Anwendungen zu erstellen. Normalerweise werden bei diesem Verfahren verschiedene Tracking-Verfahren kombiniert (Hybrides Tracking). Zur Unterstützung der Videoaufnahmen werden akustische (Ultraschall), magnetische und radiofrequente (Hochfrequenz-(HF)-FMCW-Radar (Frequency Modulated Continuous Wave) in Kombination mit einem aktiven Transponder) verwendet.
- Beim *markerlosen Tracking* wird versucht, ohne die vom Menschen künstlich in die Umgebung eingebrachten Marker eine Lokalisierung von Objekten zu ermöglichen. Dabei wird neben visuellen Verfahren auch auf bekannte Positionierungsverfahren zurückgegriffen (GPS und Kompass).

Um genaue Positionsbestimmungen zu erreichen, müssen AR-Systeme i. d. R. aufwendig kalibriert werden. Dazu zählen z. B. bei optischen Systemen die Kameraeigenschaften: Position und Blickwinkel des Betrachters, Sensordaten, Verzerrung.

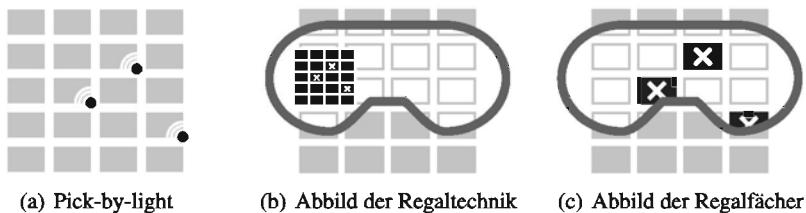


Abb. 4.13 Visuelle Kommissioniererführungsmethoden

Zur Realisierung von AR-Systemen ist es unerlässlich, geeignete und vom Benutzer akzeptierbare Mensch-Maschine-Schnittstellen einzusetzen. Zu den Schnittstellen gehören Anzeigegeräte (Displays), Geräte zur Positionsbestimmung des Benutzers und der betrachteten Objekte sowie Eingabegeräte, um mit der erweiterten Realität interagieren zu können. Die Anzeigegeräte können in vier Kategorien eingeteilt werden.

Head-Mounted-Displays (HMD) Dabei handelt es sich um sogenannte *wearable devices*. Grundsätzlich können zwei Prinzipien der Videodarstellung und der optische Darstellung differenziert werden. Das erste Prinzip zeichnet sich dadurch aus, dass ein Videobildschirm dem Benutzer die Sicht versperrt und er die Umgebung über Videoeinspielungen, die in das Sichtfeld über eine Kamera, die in der Nähe des Displays installiert ist, eingespielt werden, wahrnimmt. Optische Lösungen projizieren Bilder auf das Auge des Benutzers, ohne die Sicht zu verdecken.

Handgeführte Geräte Einige AR-Systeme benutzen handgeführte Displays. In der Regel sind dies handelsübliche PDAs mit einer integrierten Kamera. Diese fungieren wie ein Fenster, welches die reale Welt um virtuelle Objekte erweitert darstellt.

Projizierende Displays Bei dieser Variante wird die benötigte virtuelle Information direkt auf das zu *erweiternde* Objekt projiziert. Dabei kann es sich um fest installierte Projektoren handeln, die im einfachsten Fall Bilder in einer Ebene erzeugen, oder der Anwender selbst trägt den Projektor.

Fest montierte Displays Die letzte Gruppe der Anzeigegeräte ist die der fest montierten Anzeigen. Dabei handelt es sich in der Regel um einen (teil-)durchsichtigen Bildschirm, der über dem potenziellen „Operationsgebiet“ angeordnet ist. Die für die AR-Anwendung notwendigen virtuellen Daten werden auf diese Weise in das Blickfeld des Betrachters transportiert.

Als potenzielles Einsatzgebiet von AR-Systemen ist die Kommissioniererführung in ein- oder mehrstufigen Person-zur-Ware-Kommissioniersystemen anzusehen. Dabei steht weniger die Führung der Personen durch das Lager als vielmehr die Übermittlung von Entnahmeanweisungen im Fokus der Betrachtung.

Eine gängige visuelle Kommissioniererführung stellt das Pick-by-light-System dar. Dabei werden dem Kommissionierer über Leuchtelelemente, die über oder un-

ter den Fächern angeordnet sind, die Informationen über Art und Quantität der zu entnehmenden Artikel übermittelt (Abb. 4.13(a)). In Abb. 4.13(b) ist eine weitere, bereits in Richtung der *erweiterten Realität* zielende Variante dargestellt. In diesem Fall wird dem Kommissionierer ein Abbild der Regaltechnik in die reale Umgebung eingespielt, aus der die Entnahmeflussinformationen entnommen werden können.

Eine *echte* AR-Anwendung stellt die in Abb. 4.13(c) abgebildete Umsetzung der Kommissionierungsführung dar. Bei dieser Variante werden die Fächer durch exakte virtuelle Daten gekennzeichnet, d. h. dem Mitarbeiter werden die Fächer, aus denen Artikel zu entnehmen sind, als exakt skalierte grafische Überlagerung auf das entsprechende Regal projiziert. Diese Alternative würde die zumeist kostenintensive Ausrüstung der Regale mit Informationstechnik (z. B. Pick-by-light-Anzeigen) ersparen. Der Kommissionierer hätte die Hände frei, um die Artikel zu greifen. Über die rein visuelle Führung hinaus wäre des Weiteren akustische Unterstützung, um den Kommissionierer z. B. zum nächsten Lagerplatz zu leiten, denkbar und sinnvoll zu implementieren.

Wie bei allen visionären Ideen gibt es auch beim Einsatz von AR-Systemen noch eine Anzahl von Problemstellungen, die entweder noch nicht vollständig gelöst sind bzw. deren existierende Lösungen noch erhebliches Verbesserungspotenzial in sich bergen.

- *Performanz:* das Nachführen der Bilder bei Bewegungen
- *Energieversorgung:* Bei mobilen Systemen verfügen die Akkus nicht über ausreichende Energiereserven.
- *Sensoren:* Rauschen bei Bewegungen, Drift, Abschaltung des Trackingsystems (z. B. bei GPS)
- *Daten:* Verfügbarkeit und hohe Komplexität der Daten
- *Visualisierung:* um die Einbettung der virtuellen Szenen in die realen möglichst überzeugend zu leisten
- *Benutzerschnittstellen:* Insbesondere bei mobilen Anwendungen z. B. im Außenbereich ist die Eingabe von Informationen durch Tastatur und Menüsteuerung durch eine Mouse umständlich.
- *Ergonomie:* Die Systeme sind in der Regel noch zu schwer, um sie dauerhaft am menschlichen Körper zu tragen.

Trotz dieser zahlreichen (noch) bestehenden Einschränkungen birgt der Einsatz von Augmented-Reality in der Kommissionierung erhebliche Potenziale. Die Entwicklung sollte deshalb mit wachsendem Interesse beobachtet werden. Ansporn hierzu geben die bereits erreichten Umsetzungen, die, wenn auch unter laborähnlichen Bedingungen, ihre Daseinsberechtigung erbracht haben. Eine ausführliche Untersuchung einer Augmented Reality unterstützten Kommissionierung wurde in [GBS+09] vorgenommen.

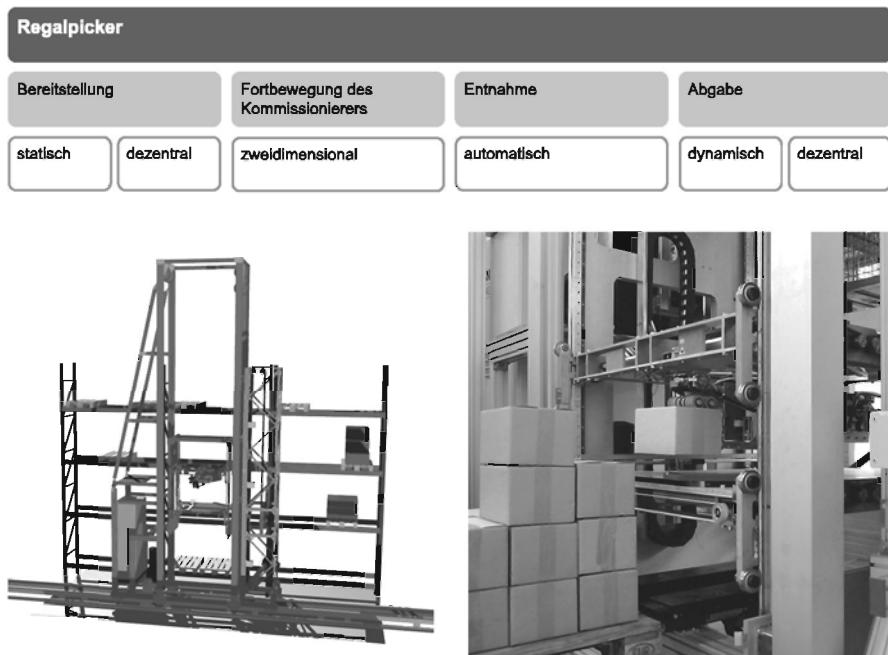


Abb. 4.14 Regalpicker [Fotos: Fraunhofer IML]

4.3.2 *Regalpicker*

Eine technische Entwicklung, die zu den vollautomatisierten Kommissionierlösungen zählt, ist der sogenannte Regalpicker (Abb. 4.14). Er ermöglicht die direkte automatische Kommissionierung im Hochregallager. Hierzu ist am Hubkorb eines Regalbediengeräts eine Greifeinheit installiert, die vertikal verfahrbar ist und mittels Teleskoparm genau positioniert werden kann, um die Artikel aus dem Regal entnehmen zu können. Das Kernstück der Greifeinheit ist ein sogenannter „Traction Gripper“. Dieses Greifwerkzeug ist mit zwei senkrecht zueinander stehenden Laufflächen ausgestattet, die mit Reibrollen oder Reibriemen versehen werden können. Durch den Antrieb dieser Rollen bzw. der Riemen werden die Artikel auf einer reibschlussbasierten Technik eingeklemmt und somit kommissioniert.

Nach dem Greifvorgang werden die Artikel auf einer sich ebenfalls im Hubkorb befindlichen Übergabestation abgelegt. Dort werden die Artikel mit einem Schieber an einen Vertikalförderer übergeben. Der Vertikalförderer ähnelt der Funktionsweise eines Doppelgurtförderers, wobei im Falle des Regalpickers der zweite Gurt durch ein Gleitblech ersetzt wurde. Die Artikel verlassen den Vertikalförderer am Ende des Gleitbleches durch einen Auswurf und werden auf eine in der Regalgasse verlaufende Stetigfördertechnik übergeben. Diese fördert die Artikel zum

definierten Übergabepunkt. Durch den Einsatz der in der Regalgasse verlaufenden Stetigfördertechnik ist eine dezentrale Abgabe der Artikel möglich.

Der Traction Gripper ermöglicht die Kommissionierung von im Verbund gestapelten Artikel von einer Palette. Restriktionen bezüglich Form und Oberflächenbeschaffenheit eines Artikels sind nicht gegeben. Somit können nicht nur rechtwinklige Artikel, sondern auch zylindrische Körper, Säcke oder nach oben hin offene Kisten automatisch kommissioniert werden. Allerdings existieren Einschränkungen bezüglich des Gewichts und der Kantenlänge eines Artikels. So können nur Artikel mit einer Kantenlänge von 160–300 mm und einem Maximalgewicht von 10 kg kommissioniert werden.

Der Regalpicker ist für die Kommissionierung von kleinen bis mittelgroßen Artikeln mit einer mittleren bis langsamen Zugriffshäufigkeit geeignet. Für die Kommissionierung von Schnelldrehern ist die Auslagerung von Ganzpaletten sinnvoller.

Der erforderliche Flächenbedarf eines Regalpickers ist nicht wesentlich höher als beim Einsatz eines regulären Regalbediengeräts. Lediglich der benötigte Platz für die Stetigfördertechnik in der Regalgasse muss hinzugerechnet werden.

Kapitel 5

Systemtypen in der Kommissionierung

Durch die Kombination der verschiedenen Funktionselemente entsteht eine Vielzahl von Systemlösungen. Welcher Systemtyp sich für ein Unternehmen eignet, hängt dabei wesentlich von den spezifischen Kennzahlen ab und muss im Einzelfall entschieden werden. Um einen Überblick über typische Ausprägungsformen zu geben, werden an dieser Stelle einzelne klassische Systemtypen vorgestellt und deren Eigenschaften in Bezug auf die Art der Bereitstellung, die Fortbewegung des Kommissionierers, die Entnahme sowie die Abgabe der zu kommissionierenden Artikel aufgeführt. Zunächst werden Systemtypen, die nach dem Person-zur-Ware-Prinzip arbeiten, beschrieben. Darauf folgend werden Ware-zur-Person-Systemtypen und abschließend Lösungen, die beide Prinzipien vereinen, vorgestellt. Es besteht jedoch kein Anspruch auf Vollständigkeit in Bezug auf die Darstellung aller möglichen Systemtypen.

Tabelle 5.1 Übersicht und Einordnung der technischen Systemtypen

	Person-zur-Ware (PzW)	Ware-zur-Person (WzP)	Kombination aus PzW und WzP
manuell	<ul style="list-style-type: none"> konventionelles Kommissionieren Kommissioniernest Kommissioniertunnel 		
teil-automatisiert	<ul style="list-style-type: none"> manuelles Kommissionieren mit FTF Kommissionieren im Hochregal manuelles Kommissionieren mit Bahnhof manuelles Kommissionieren - Kombination aus DLR u. FBR 	<ul style="list-style-type: none"> Kommissionierstation mit Behälterregal-Anbindung Kommissionierstation mit Shuttlestelsystemanbindung Kommissionierstation mit Horizontal-Umlaufregal-Anbindung Vertikal-Umlaufregal Liftsystem 	<ul style="list-style-type: none"> zweistufige Kommissionierung mit Pick-to-belt Kommissionieren entlang einer Regelfront am AKL Inverses Kommissionieren
voll-automatisiert	<ul style="list-style-type: none"> verfahrbarer Kommissionierroboter 	<ul style="list-style-type: none"> stationärer Kommissionierroboter mit Palettenregal-Anbindung Schacht-kommissionierer automatisches Kollipicken 	

In Tabelle 5.1 werden alle innerhalb dieses Kapitels vorgestellten Kommissionierlösungen aufgeführt. Die Klassifizierung erfolgt dabei nach den bereits genannten Prinzipien (Person-zur-Ware und Ware-zur-Person) sowie einer Kombination aus beiden und dem Automatisierungsgrad des Systemtyps. Bei einer manuellen Systemvariante werden alle zentralen Vorgänge (Bereitstellung, Fortbewegung, Entnahme und Abgabe) von Hand ausgeführt. In einer teilautomatisierten Lösung wird der Kommissionervorgang partiell von Maschinen durchgeführt und der Mensch in seiner Tätigkeit unterstützt. Eine Lösung wird als teilautomatisiert eingestuft, sobald einer der Prozessschritte Bereitstellung, Fortbewegung, Entnahme oder Abgabe von Maschinen durchgeführt wird. Bei vollautomatisierten Systemtypen wird die gesamte Prozessabfolge in der Kommissionierung automatisch durchgeführt.

5.1 Person-zur-Ware-Systemtypen

5.1.1 Konventionelles Kommissionieren

Bei der einfachen, manuellen Kommissionierung, auch konventionelles Kommissionieren genannt, bewegt sich der Kommissionierer mit einem Ladehilfsmittel nach

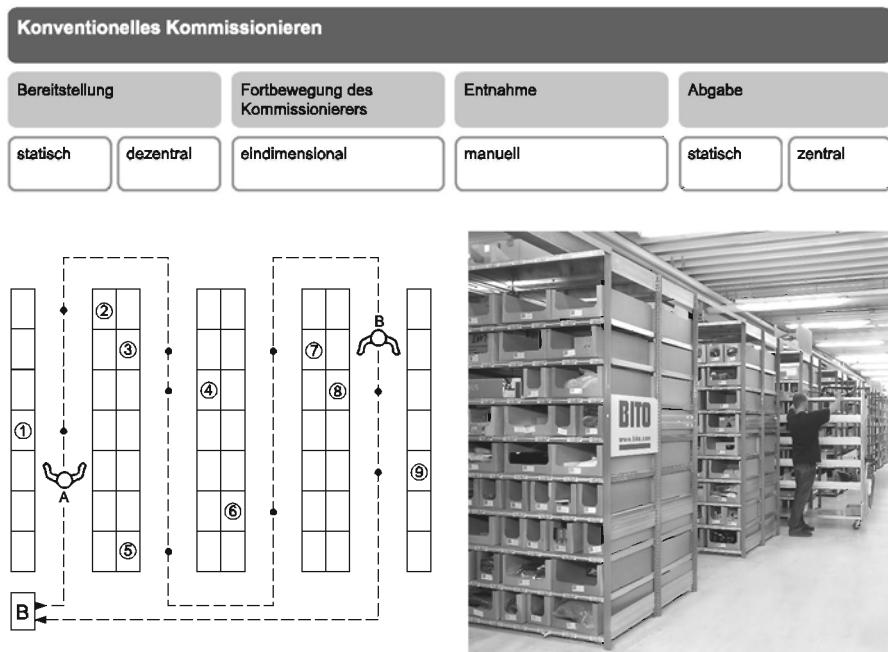


Abb. 5.1 Konventionelles Kommissionieren [Foto: Bito]

dem Person-zur-Ware-Prinzip zu den statisch bereitgestellten Artikeln. Die Artikel können dabei direkt auf Paletten oder in Fachboden- bzw. Durchlaufregalen gassenförmig bereitgestellt werden (Abb. 5.1). Der Kommissionierer bewegt sich in Form eines Rundgangs ebenerdig durch die Gassen und entnimmt die zu kommissionierenden Auftragspositionen manuell. Die Kommissioniererführung kann hierbei auf verschiedene Arten erfolgen. Es besteht die Möglichkeit, neben dem Sammelbehälter eine Pickliste an einer zentralen Basis aufzunehmen. Ebenso können die Auftragsinformationen mittels Pick-by-light oder Pick-by-voice während des Rundgangs übermittelt werden. Die Abgabe der Sammelbehälter erfolgt nach erfolgreicher Bearbeitung aller Auftragspositionen an einem definierten Übergabepunkt. Der Behälter wird anschließend zu Verpackung und Versand weitergeleitet. Dieser Übergabepunkt dient gleichzeitig zur Aufnahme eines neuen Sammelbehälters. Da der gesamte Kommissionervorgang ohne maschinelle Unterstützung stattfindet, entspricht das konventionelle Kommissionieren einem rein manuellen Person-zur-Ware-Kommissioniersystem.

Konventionelle Kommissioniersysteme sind mit geringen Investitionen verbunden und sehr flexibel bezüglich der zu lagernden Güter und des eingesetzten Personals.

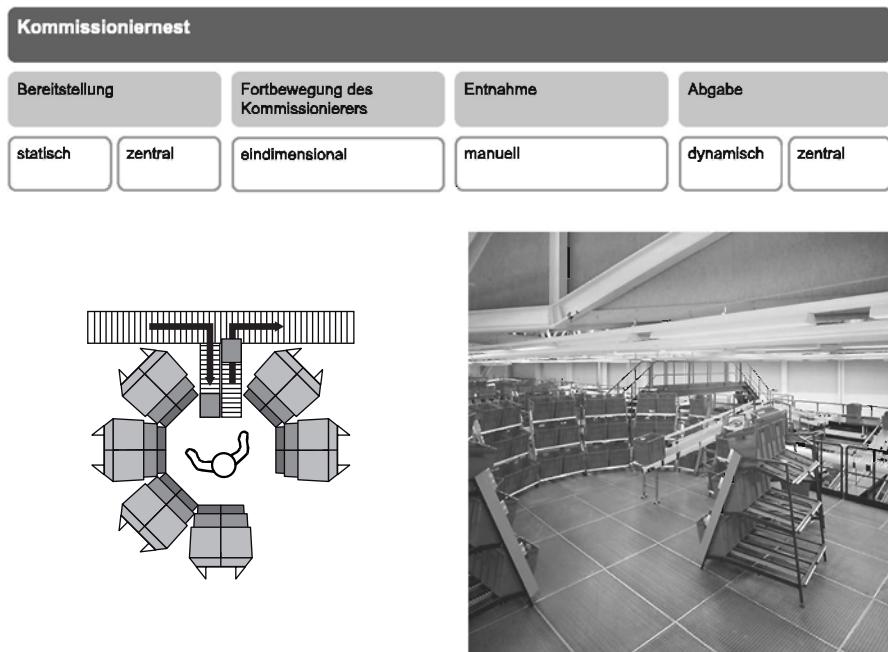


Abb. 5.2 Kommissioniernest [Foto: TGW]

5.1.2 Kommissioniernest

In sogenannten Kommissioniernestern, auch Kommissionierzellen genannt, können die sonst üblichen hohen Wegzeitanteile bei der Person-zur-Ware-Kommissionierung gänzlich minimiert werden, denn die Artikel werden statisch, zumeist in U-förmiger Anordnung, in Reichweite des Kommissionierers bereitgestellt. Somit können relativ hohe Kommissionierleistungen erzielt werden (bis zu 1.000 Teile pro Stunde), da der Kommissionierer an einem Punkt stehen bleiben und gleichzeitig alle Artikel eines Sortiments greifen kann. Der Kommissionierer legt die Entnahmeeinheiten eines Auftrags in einen Sammelbehälter ab. In Abb. 5.2 ist beispielhaft ein Kommissioniernest skizziert. Die Abgabe der Sammelbehälter kann an einer vordefinierten Stelle über eine Stetigfördertechnik erfolgen. Alternativ dazu können mehrere Auftragsbehälter gesammelt zu einem zentralen Übergabepunkt abtransportiert werden.

Diese Systemvariante eignet sich nur bei einer begrenzten Anzahl kleinvolumiger Artikel, so dass alle Artikel des Sortiments in einem Kommissioniernest bereitgestellt werden können. Das Kommissioniernest entspricht einem manuellen Person-zur-Ware-Kommissioniersystem.

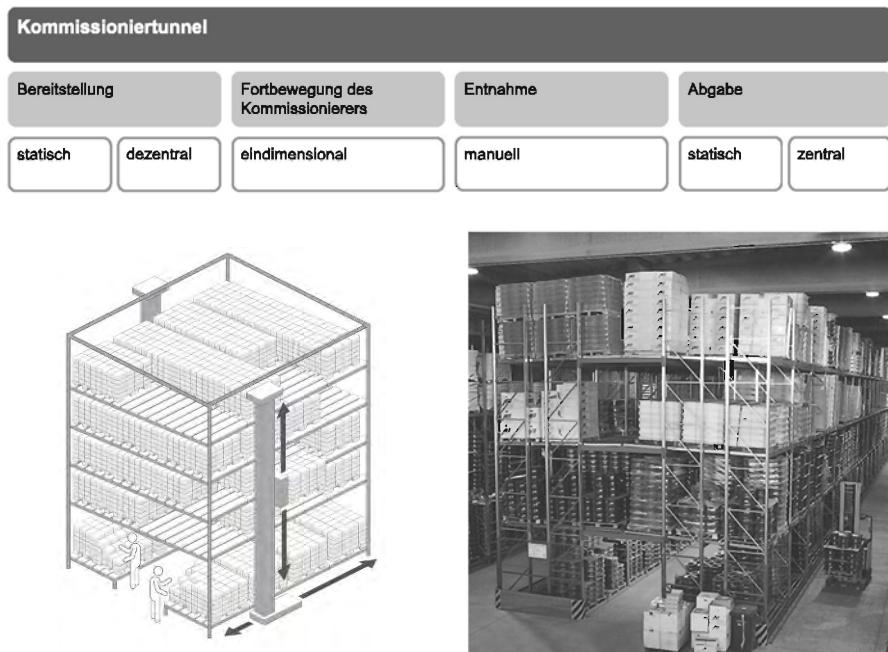


Abb. 5.3 Kommissioniertunnel [Foto: Bito]

5.1.3 Kommissioniertunnel

Eine kompakte und platzsparende Variante ist der sogenannte Kommissioniertunnel. Dabei sind Nachschublager und Kommissionierlager miteinander vereint. Die Kommissionierung erfolgt ebenerdig direkt von statisch bereitgestellten Paletten in einem Tunnelgang, ähnlich dem Vorgehen bei der konventionellen Kommissionierung (Abb. 5.3). Die Paletten werden auf Durchlaufbahnen im Kommissionierlager mehrfachtief bereitgestellt. Über dem eigentlichen Kommissionerbereich befinden sich das Nachschublager. Dort werden Paletten in Durchlaufkäneln bevoorratet. Das Kommissionierlager kann bei Bedarf einfach mit Nachschub versorgt werden, indem Paletten aus einem Durchlaufkanal mittels Regalbediengerät oder Stapler in den Kommissionerbereich befördert werden.

Vorteilhaft wirkt sich bei dieser Systemvariante die strikte Trennung von Entnahme und Nachschub aus sowie die automatische Auffüllung des Bereitstellplatzes mittels Fördertechnik. Große Mengen bei einem vergleichsweise kleinen Sortiment können mit einem sehr guten Raumnutzungsgrad in diesem Systemtyp bevoorratet werden. Der gesamte Kommissionierprozess läuft in diesem System vollständig manuell ab, deshalb wird es in die Kategorie der manuellen Person-zur-Ware-Systeme eingeordnet.

Manuelle Kommissionierung mit FTF		
Bereitstellung	statisch	dezentral
Fortbewegung des Kommissionierers	eindimensional	
Entnahme	manuell	
Abgabe	statisch	dezentral



Abb. 5.4 Manuelle Kommissionierung mit FTF [Foto: Dematic]

5.1.4 Manuelle Kommissionierung mit FTF

In konventionellen Kommissioniersystemen kommen hauptsächlich die in Kap. 4.1 vorgestellten Unstetigfördertechniken zum Einsatz. Eine Besonderheit stellt der Einsatz von fahrerlosen Transportfahrzeugen dar.

Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) können grundsätzlich in allen gassenförmig angeordneten Person-zur-Ware-Kommissioniersystemen eingesetzt werden. Als Lagermittel können zum Beispiel Fachbodenregale oder einfache Palettenregale dienen. Die Grundidee ist der des konventionellen Kommissioniersystems sehr ähnlich. Der Kommissionierer wird in diesem Fall jedoch von einem fahrerlosen Transportfahrzeug begleitet, das die Sammeleinheit mit sich führt. Die Kommissioniereinheiten werden vom Kommissionierer auf das vom FTF mitgeführte Ladehilfsmittel abgelegt. Der Kommissionierer bewegt sich von Entnahmestelle zu Entnahmestelle und das FTF folgt ihm.

Ermöglicht wird diese Art der Kommissionierung durch eine Kontrollsoftware. Diese ist in der Lage, die Aufträge aus dem Warehousemanagementsystem (WMS) so aufzubereiten, dass für das FTF und den Kommissionierer die optimale Wegführung koordiniert wird.

Unterstützt werden kann der Kommissionierer auf seinem Weg z. B. durch den Einsatz eines Pick-by-voice-Systems. Dies bietet die Möglichkeit einer weiteren Kontrolle und Optimierung der Kommissionierleistung, ohne den Kommissionierer bei seiner primären Tätigkeit zu beeinträchtigen, denn sowohl Augen als auch Hände sind frei (Abb. 5.4).

Nach Fertigstellung des Auftrags transportiert das FTF die Sammeleinheit zu Verpackung und Versand. Einzelne Zusatzkomponenten, wie das automatische Stretchen und Wickeln, lassen sich problemlos in das Gesamtsystem integrieren. Der Kommissionierer muss hierbei jedoch nicht wie beim manuellen Kommissionieren mit zentraler Abgabe zum Übergabepunkt zurückkehren, sondern er kann mit sei-

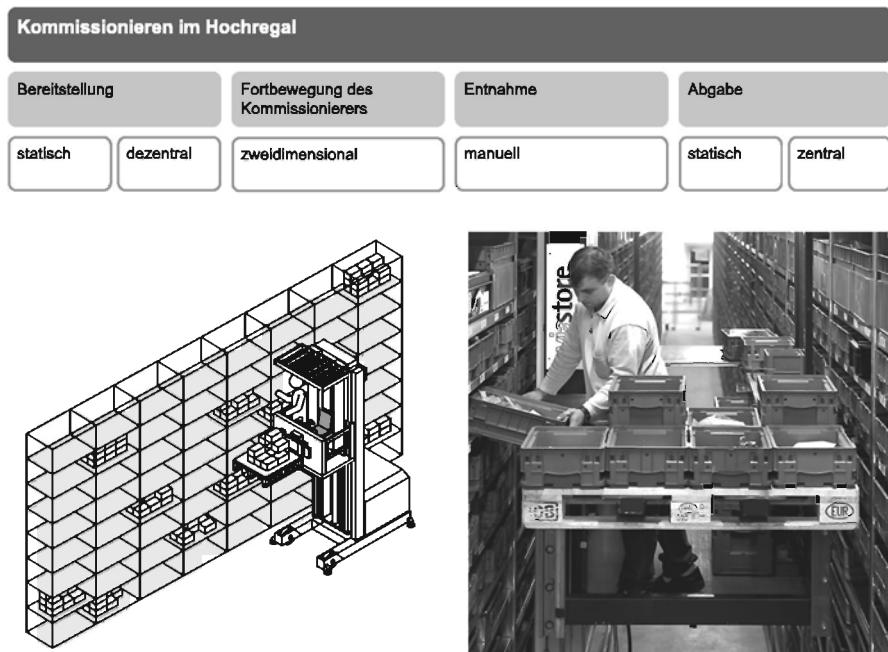


Abb. 5.5 Kommissionieren im Hochregal [Foto: viastore]

nem Rundgang an der gleichen Stelle fortfahren. Ihm wird umgehend ein neues Ladehilfsmittel durch ein FTF bereitgestellt, auf das er den Folgeauftrag kommissionieren kann. Die Abgabe erfolgt demzufolge in solchen Systemen dezentral.

Die Investitionskosten sind gegenüber konventionellen Kommissioniersystemen aufgrund des Einsatzes von FTF und des damit verbundenen erhöhten Steuerungsaufwands deutlich höher. Bei diesem Systemtyp handelt es sich um eine teilautomatisierte Lösung, die z. B. im Lebensmittelhandel zum Einsatz kommt.

5.1.5 Kommissionieren im Hochregal

In den bereits vorgestellten Kommissioniersystemen erfolgt die Fortbewegung des Kommissionierers zumeist ebenerdig entlang einer Regalfront. Durch den Einsatz eines Kommissionierstaplers oder eines bemannten Regalbediengeräts, bei denen der Kommissionierer in einem Bedienstand gemeinsam mit dem Ladehilfsmittel an einem Hubgerüst vertikal verfahrbar ist, erfolgt die Fortbewegung zweidimensional (Abb. 5.5). Zur Arbeitserleichterung kann das Ladehilfsmittel mittels eines Sekundärhubs an die Ablagehöhe des Kommissionierers angepasst werden.

Der Kommissionierer entnimmt die im Regalfach statisch bereitgestellten Auftragspositionen manuell und legt diese in den Sammelbehälter oder auf der Palet-

Manuelle Kommissionierung mit Bahnhöfen

Bereitstellung	Fortbewegung des Kommissionierers	Entnahme	Abgabe
statisch	dezentral	eindimensional	manuell
dynamisch	zentral		

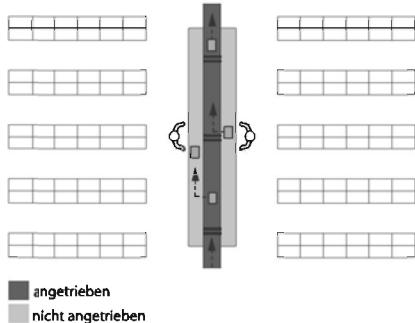


Abb. 5.6 Manuelle Kommissionierung mit Bahnhöfen [Foto: Knapp]

te ab. Nach Fertigstellung eines Kommissionierauftrags kehrt der Kommissionierer wieder zum zentralen Übergabepunkt zurück und übergibt dort die Sammeleinheit zur Weiterleitung an die Verpackung und den Versand. Die Kommissioniererführung wird in diesen Systemen meist mittels einer Pickliste oder eines mobilen Terminals realisiert. Zusätzlich zu der Rundfahrt über mehrere Gassen werden an der Regalwand innerhalb einer Gasse auch mehrere Entnahmestellen angefahren (vgl. Kap. 6.1.2). Da der Kommissionierer auf seiner Rundfahrt im Hochregal durch einen Unstetigförderer unterstützt wird, entspricht dieser Systemtyp einem teilautomatisierten Person-zur-Ware-System.

5.1.6 Manuelle Kommissionierung mit Bahnhöfen

Die Artikel sind bei diesem Systemtyp, ähnlich wie bei der konventionellen Kommissionierung, statisch in Fachboden-, Durchlauf- oder Palettenregalen bereitgestellt. Die Regale sind gassenförmig angeordnet und der Kommissionierer bewegt sich in den Gassen zu den Entnahmestellen. Dieser Systemtyp unterscheidet sich vom einfachen, manuellen Kommissionieren durch die Installation einer Steigfördertechnik. Mittels sogenannter Kommissionierbahnhöfe entlang des Zentralgangs werden an vordefinierten Ausschleusstellen die Auftragsbehälter auf eine

nichtangetriebene Förderbahn abgeleitet. Die in den Regalgängen entnommenen Artikel werden am Kommissionierbahnhof in den Auftragsbehälter abgegeben. Die Abgabe der Kommissioniereinheiten in den Sammelbehälter kann innerhalb eines Bahnhofs an einer beliebigen Stelle erfolgen. Ebenso kann die Übergabe des Auftragsbehälters auf die angetriebene Fördertechnik an jeder beliebigen Stelle erfolgen. Der Vorgang der Abgabe findet also im Gegensatz zum einfachen, manuellen Kommissionieren dezentral statt. In sehr großen Kommissioniersystemen mit einheitlicher Technik werden die Auftragsbehälter von Station zu Station weitergeleitet. Dieser Systemtyp wird häufig auch als Stationskommissionierung, Weiterreichsystem oder Bahnhofskommissionierung bezeichnet. In Abb. 5.6 ist beispielhaft ein Kommissionierbahnhof dargestellt. Da der Prozess der Abgabe über eine automatisierte Stetigfördertechnik erfolgt, ist das konventionelle Kommissionieren mit Bahnhöfen der Kategorie der teilautomatisierten Person-zur-Ware-Systeme zuordnen.

5.1.7 Manuelle Kommissionierung – Kombination aus Durchlauf- und Fachbodenregalen

Eine weitere häufig vorzufindende Systemlösung nach dem Person-zur-Ware-Prinzip ist die Kombination aus Durchlauf- und Fachbodenregalen (Abb. 5.7). Entlang der Durchlaufregalfront verläuft typischerweise eine Stetigfördertechnik zum Transport der Sammelbehälter von Station zu Station. In den Durchlaufregalen werden Schnelldreher zur Entnahme statisch bereitgestellt. Quer zur Durchlaufregalfront sind Fachbodenregale angeordnet, in denen Artikel mit einer geringeren Zugriffshäufigkeit oder für die Lagerung in Durchlaufkanälen ungeeignete Güter statisch bereitgestellt werden. Durch die Stetigfördertechnik (i. d. R. Rollenbahnen) werden die Sammelbehälter zu den sogenannten Kommissionierbahnhöfen befördert. An einem Bahnhof werden die Behälter auf eine nicht angetriebene Rollenbahn ausgeschleust und bis zur Vervollständigung des Auftrags durch den Kommissionierer entlang dieser Bahn bewegt. Der Kommissionierer entnimmt die angeforderten Auftragspositionen aus den Durchlaufkanälen oder bewegt sich stichgangförmig in die Fachbodenregalgassen und legt die Artikel anschließend in den bereitgestellten Behälter. Die fertig bearbeiteten Behälter werden manuell auf die angetriebene Rollenbahn geschoben und zum nächsten Entnahmehbahnhof transportiert. Je nach Größe eines Kommissionierbahnhofs können dort ein oder mehrere Kommissionierer arbeiten. Die Abgabe erfolgt innerhalb eines Kommissionierbahnhofs zentral. Betrachtet man jedoch das Gesamtsystem, ist die Abgabe der Kommissioniereinheiten dezentral.

Zur Kommissioniererführung ist bei dieser Systemvariante im Bereich der Durchlaufregalfront ein Pick-by-light-System geeignet, da eine schnelle visuelle Kennung der Entnahmestände möglich ist. Je nach Größe der Fachbodenregalanlage ist zu prüfen, ob die Investition in eine Pick-by-light-Anlage rentabel ist oder ob mobile Datenterminals kostengünstiger sind. Dieser Systemtyp ist bezüglich der zu la-

Manuelle Kommissionierung – Kombination aus Durchlaufregal und Fachbodenregal

Bereitstellung	Fortbewegung des Kommissionierers	Entnahme	Abgabe
dynamisch dezentral	eindimensional	manuell	dynamisch dezentral

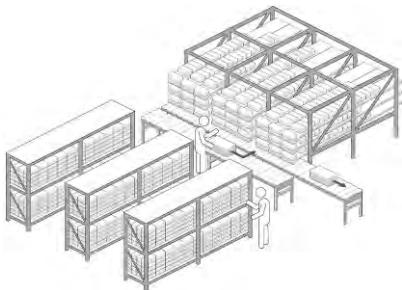


Abb. 5.7 Manuelles Kommissionieren – Kombination aus Durchlauf- und Fachbodenregalen [Foto: Bito]

gernden Güter und des eingesetzten Personals ebenfalls sehr flexibel und zählt zur Kategorie der teilautomatisierten Person-zur-Ware-Systeme.

5.1.8 Verfahrbarer Kommissionierroboter

Verfahrbare Kommissionierroboter bewegen sich ähnlich wie bei der manuellen Person-zur-Ware-Kommissionierung hin zu den statisch bereitgestellten Artikel-einheiten. Bei verfahrbaren Kommissionierrobotern handelt es sich entweder um FTF, die frei in der Ebene verfahrbar sind, oder um schienengeführte Regalbedien-geräte mit Greifvorrichtung. In der Pharmabranche werden Systeme realisiert, die wie ein Regalbediengerät aufgebaut sind (Abb. 5.8) und über eine Greifvorrich-tung zur Einzelentnahme der Artikel verfügen. Der Greifvorgang kann je nach zu kommissionierendem Gut durch einen Backengreifer, einen Gelenk-Fingergreifer, einen Saugnapfgreifer oder einen Magnetgreifer realisiert werden. Ähnlich wie beim Schachtkommissionierer ist es erforderlich, dass die Artikel formstabil sind und durch die automatische Entnahme nicht beschädigt werden. Damit der Greifvor-gang reibungslos ablaufen kann, wird in der Greifvorrichtung eine sensorgesteuerte Bilderverarbeitung eingebaut. Dies sind meist CCD-Kameras, die Lage und Form

Verfahrbarer Kommissionierroboter		
Bereitstellung	statisch	dezentral
Fortbewegung des Kommissionierers	zweidimensional	
Entnahme	automatisch	
Abgabe	statisch	zentral



Abb. 5.8 Verfahrbarer Kommissionierroboter [Foto: Bito]

eines Artikels erkennen und den Greifarm entsprechend ausrichten können. Diese Technologie bietet Potenzial zur Weiterentwicklung. Bei der Bereitstellung der Artikel ist eine genaue Positionierung erforderlich, um den Steuerungsaufwand so gering wie möglich zu halten. Die Durchführung der Bereitstellung kann entweder manuell oder automatisch erfolgen.

Eindeutige Nachteile der Roboterkommissionierung sind die hohen Entnahmzeiten, die störungsanfällige Sensorik und der bis heute nicht umgesetzte „Griff in die Kiste“. Diese beiden Punkte sind zwei entscheidende Kriterien, die die Ausbreitung der Robotertechnologie in der Kommissionierung verhindern. Durch zukünftige Entwicklungen, die durch gezielte Verbesserungen der Sensortechnik den zeitlichen Ablauf verkürzen, wird es ermöglicht, die Roboterkommissionierung stärker an die durch einen Menschen erzielbare Leistung heranzuführen. Grundsätzlich kann jedoch festgehalten werden, dass Kommissionierroboter eine höhere Flexibilität als beispielsweise Schachtkommissionierer besitzen. Da beim Einsatz von verfahrbaren Kommissionierrobotern der gesamte Kommissionievorgang ohne menschliches Eingreifen erfolgen kann, handelt es sich hierbei um ein vollautomatisiertes System.

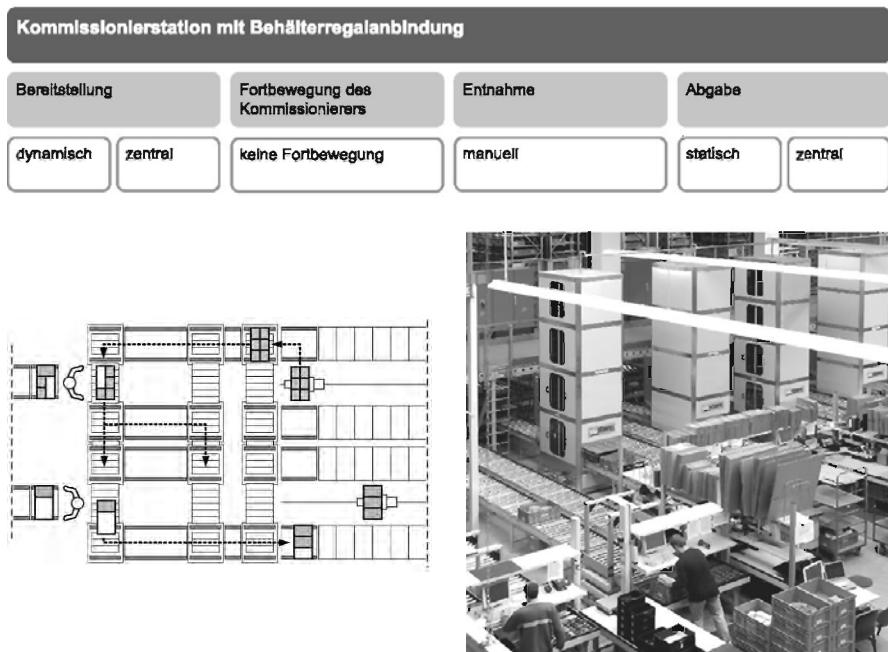


Abb. 5.9 Kommissionierstation mit Behälterregalanbindung [Foto: viastore]

5.2 Ware-zur-Person-Systemtypen

5.2.1 Kommissionierstation mit Behälterregalanbindung

In Kommissioniersystemen, die nach dem Ware-zur-Person-Prinzip arbeiten, findet der Kommissionervorgang an einer Kommissionierstation, auch Kommissionier-U genannt, statt (Abb. 5.9). Die Ware wird aus einem Lager über eine fördertechnische Anbindung automatisch zur Station transportiert und dort zur Entnahme bereitgestellt. Die Vorhaltung der Artikel findet meist in automatisch bedienten Lagersystemen, wie z. B. einem Automatischen Kleinteilelager, statt.

Automatische Kleinteilelager (AKL) dienen der Lagerung von kleinvolumigen Einheiten und Kartons. Als Ladungsträger werden Behälter oder Tablare verwendet. Bedient wird ein AKL durch ein Regalbediengerät. Das schienengeführte Regalbediengerät bewegt sich zweidimensional durch die jeweilige Gasse und positioniert das Lastaufnahmemittel vor der Lagereinheit. Durch Unterfahren, Ziehen oder Greifen nimmt das Bediengerät den jeweiligen Behälter auf und befördert diesen zum Übergabepunkt am Anfang der Gasse. Dort wird der Behälter einer Rollenbahn zugeführt. Diese befördert den Behälter nun zu dem vorgesehenen Kommissionierplatz. Am Kommissionierplatz selbst wird dem Kommissionierer neben dem Entnahmebehälter auch der Auftragsbehälter bereitgestellt. Die Informationsbereit-

stellung wird durch verschiedene Informationssysteme wie z. B. ein festinstalliertes Terminal oder Pick-by-light und Put-to-light ermöglicht. So zeigt beispielsweise eine Leuchtanzeige die Menge der zu entnehmenden Artikel aus einem Behälter an (Pick-by-light). Ein weiteres Lichtsignal kennzeichnet den Auftragsbehälter, in den die Einheiten zu kommissionieren sind (Put-to-light). Nachdem der Kommissionierer die gewünschte Anzahl eines Artikels aus der Bereitstelleinheit entnommen und in den Auftragsbehälter kommissioniert hat, quittiert er den Vorgang. Der Artikelbehälter wird anschließend über die angetriebene Fördertechnik abgeführt und wieder im AKL eingelagert. Der gesamte Vorgang wird so lange wiederholt, bis alle Auftragspositionen abgearbeitet wurden. Daraufhin wird auch der Auftragsbehälter meist über Fördertechnik in Richtung Verpackung und Versand abgeführt.

Für die Gestaltung der Bedienstation gibt es mehrere Möglichkeiten. Es können ein oder mehrere Entnahmehälter bereitgestellt werden. Ebenso kann in ein oder mehrere Sammelbehälter kommissioniert werden. Der Abtransport beider Behälter kann getrennt über verschiedene Förderbahnen oder über eine gemeinsame Förderbahn erfolgen. Die Realisierung ist je nach Hersteller oder je nach Kommissioniersystem unterschiedlich. In jedem Fall sollte der ergonomischen Gestaltung der jeweiligen Kommissionierarbeitsplätze besonderes Augenmerk gewidmet werden (vgl. Kap. 6.3). Denn durch eine ergonomische Bauweise ist es möglich, den Ermüdungsprozess des Kommissionierers zu verlangsamen und eventuellen Beschwerden durch Fehlbelastungen vorzubeugen. Die Anzahl der Kommissionierstationen vor einem AKL ist abhängig von der geforderten Kommissionierleistung und muss ausreichend dimensioniert werden.

Alternativ zum AKL gibt es auch Systemlösungen bei denen ein Hochregal mit Palettenstellplätzen eingesetzt wird. Der Ablauf des Kommissionierprozesses läuft hierbei analog zur bereits vorgestellten Lösung ab. Lediglich der Ladungsträger und die dafür erforderliche Systemtechnik (z. B. Kettenförderer, Regalbediengerät für Paletten) unterscheidet sich. An der Bedienstation werden häufig Hubtische zur Angleichung der Entnahme- und Abgabehöhe eingesetzt.

Grundsätzlich findet bei diesem Systemtyp eine dynamisch-zentrale Bereitstellung der Artikel statt. Der Kommissionierer führt keine Bewegung zum Entnahmestandort durch. Die Abgabe erfolgt in statisch bereitgestellte Sammelbehälter, die an einer zentral am Kommissionier-U installierten Abgabestelle aufgegeben werden.

Typische Einsatzfelder des Kommissionier-Us sind Kommissionierläger in der Distribution oder Ersatzteilläger in der Automobilindustrie. Da sowohl der Bereitstellungs vorgang als auch die Abgabe automatisiert ablaufen, ist dieser Systemtyp der Kategorie teilautomatisierte Ware-zur-Person-Systeme zuzuordnen.

Kommissionierstation mit Shuttlesystemanbindung		
Bereitstellung	dynamisch	zentral
Fortbewegung des Kommissionierers	keine Fortbewegung	
Entnahme	manuell	
Abgabe	statisch	zentral

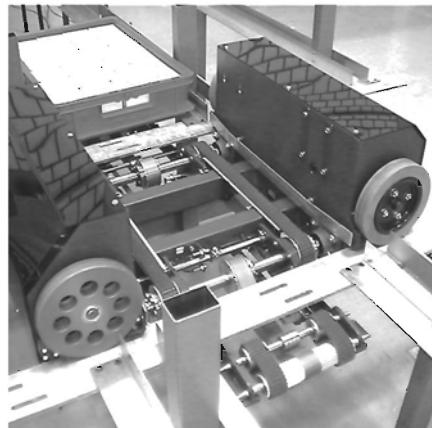


Abb. 5.10 Kommissionierstation mit Shuttlesystemanbindung [Foto: Fraunhofer IML]

5.2.2 Kommissionierstation mit Shuttlesystemanbindung

Eine Alternative zur herkömmlichen Regalbedienung durch Regalbediengeräte sind sogenannte Shuttlefahrzeuge. Sie bewegen sich auf Führungsschienen entlang einer Gasse und sind zunächst an eine Ebene gebunden. Unterschiedliche Lastaufnahmemittel, wie z. B. Riemenförderer oder Ziehmechanismen, ermöglichen die Aufnahme von verschiedenen Behältern oder Kartonagen (Abb. 5.10). Die Energieversorgung kann durch Schleifleitungen, durch mitgeführte Akkus oder induktiv über die Schienen in der Regalkonstruktion stattfinden. Hat ein Fahrzeug einen Behälter aufgenommen, so fährt es zurück an den Anfang einer Gasse. Dort befindet sich ein Vertikalförderer, z. B. ein Aufzug. Dieser nimmt entweder das Shuttlefahrzeug inklusive Behälter oder nur den Behälter in Empfang und befördert sie an den Übergabepunkt. Hier wird der Behälter an eine Fördertechnik abgegeben und gegebenenfalls ein neuer Behälter zur Rücklagerung aufgenommen. Der Vertikalförderer setzt das Shuttlefahrzeug mit dem neuen Behälter in der dafür vorgesehenen Ebene wieder ab. Neben Shuttlefahrzeugen, die nur innerhalb des Regals verfahren, existieren auch Lösungen, bei denen das Fahrzeug auch für den Transport des Behälter bis zur Kommissionierstation eingesetzt werden kann (z. B. das Multishuttle™).

Der Vorteil dieses Systems besteht in der flexiblen Nutzung der autonom von einander agierenden Fahrzeuge. Tagesspitzen und wechselnde Kapazitätsanforderungen können mit einem zweiten Lift pro Gasse oder der Variation der Anzahl an Fahrzeugen bewältigt werden.

Die Bedienstationen sind bei dieser Systemvariante ähnlich wie bei der vorhergehenden Variante aufgebaut. Die Bereitstellung der Behälter erfolgt zentral-dynamisch, die Entnahme manuell und die Abgabe ebenfalls zentral-dynamisch. Es findet keine Fortbewegung des Kommissionierers statt. Hierbei handelt es sich ebenfalls um eine teilautomatisierte Ware-zur-Person-Lösung.

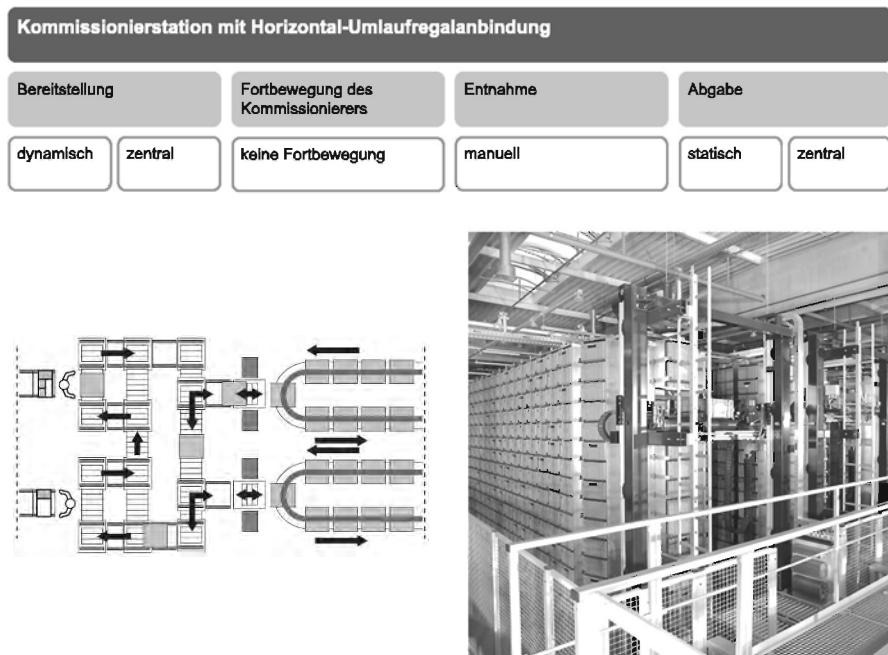


Abb. 5.11 Kommissionierstation mit Horizontal-Umlaufregalanbindung [Foto: SSI Schäfer]

5.2.3 *Kommissionierstation mit Horizontal-Umlaufregalanbindung*

Anstelle eines AKLs erweisen sich auch horizontale Umlaufregale als leistungsstarke Alternative zur Versorgung der Kommissionierstationen mit Artikelbehältern. Horizontale Umlaufregale, auch Karusselllager genannt, bestehen entweder aus abgehängten oder durch Fahrwerke getragene Regale oder aber aus unabhängig voneinander verfahrbaren Ebenen. Der Antrieb erfolgt jeweils über horizontal umlaufende Ketten. Um das entsprechende Lagerfach zu erreichen, wird die Kette bewegt, bis sich die relevante Lagersäule an der Entnahmefront befindet. Befindet sich der angeforderte Artikelbehälter nicht auf der Entnahmeebene, kann dieser mit einem Verikalförderer auf die Ebene des Kommissionierplatzes gefördert werden. Dort wird er an eine Rollenbahn übergeben und zur Kommissionierstation transportiert. Die Kommissionierung findet zumeist an der Stirnseite des Regals statt.

In einem Kommissioniersystem ist es auch möglich, mehrere dieser einzelnen horizontalen Umlaufregale in einem System zu integrieren. So bilden beispielsweise zwei oder mehr Karussellmodule ein System, das über einen Fördertechnikumlauf untereinander verbunden ist. Die Behälter werden an der Stirnseite durch eine Ziehvorrichtung auf einen Vertikalförderer ausgelagert und auf die Ebene der Steigfördertechnikanbindung befördert. Die Behälter werden dann über einen Fördertechnikumlauf dem entsprechenden Kommissionierplatz zugeführt und nach dem

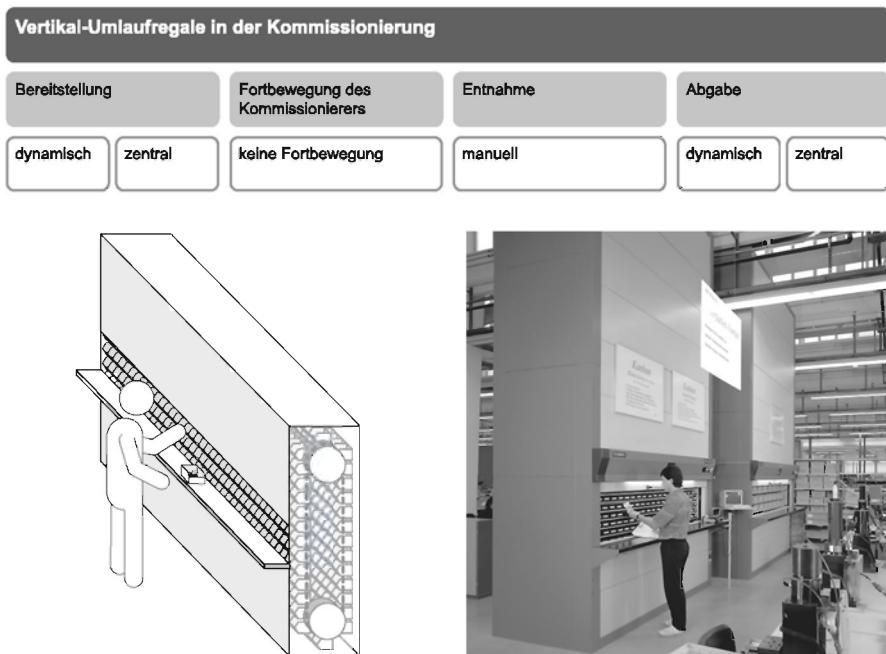


Abb. 5.12 Vertikal-Umlaufregale in der Kommissionierung [Foto: KARDEX]

erfolgreichen Kommissionierungsvorgang wieder zurückgelagert. Die Bereitstellung erfolgt demnach dynamisch. Die Bedienstationen sind bei dieser Systemlösung ebenfalls ähnlich aufgebaut wie bei den oben beschriebenen Ware-zur-Person-Lösungen. Die Kommissionierungsführung kann ebenfalls mit festen Terminals oder visuellen Anzeigen durchgeführt werden. Dieser Systemtyp zählt ebenfalls zur Kategorie der teilautomatisierten Ware-zur-Person-Systemen.

5.2.4 Vertikal-Umlaufregale und Liftsysteme

Eine kompakte teilautomatisierte Form der Kommissionierung nach dem Ware-zur-Person-Prinzip ist durch den Einsatz eines vertikalen Umlaufregals oder eines Liftsystems bzw. Turmregals gegeben.

Vertikale Umlaufregale, auch Paternosterregale genannt, verfügen über Regalböden oder Wannen, die an zwei vertikal umlaufenden Ketten befestigt sind. In den Regalböden werden typischerweise Werkzeuge, Kleinteile oder Akten gelagert. Zur Entnahme der Güter ist ein vordefinierter Zugriffsbereich über eine oder mehrere Ebenen vorgesehen. Die Ketten werden für den Zugriff auf einen Artikel bewegt, bis der entsprechende Regalboden im Zugriffsbereich liegt (Abb. 5.12).



Abb. 5.13 Liftsysteme in der Kommissionierung [Foto: KARDEX]

Ein analoges Vorgehen mit differierender Technik bietet der Einsatz von Turmregalen bzw. Liftsystemen. Sie sind eine minimalisierte Form der Regalzeilenlagerung. Die Artikel werden meist direkt auf Tablaren oder in sich darauf befindenden Behältern eingelagert. Die Tablare werden turmartig übereinander in Lagerfächern eingeschoben. Zentral ist ein vertikal verfahrbarer Lift angeordnet, der die entsprechenden Tablare beidseitig mittels einer Ziehvorrichtung auslagern, zum vordefinierten Zugriffsbereich befördern und dynamisch zur Entnahme bereitstellen kann (Abb. 5.13).

Die Informationsbereitstellung kann mittels Pick-by-light-Anzeigen oder durch Ausleuchten des entsprechenden Entnahmehälers erfolgen. Der Kommissionierer entnimmt die entsprechenden Artikel und legt diese in den Sammelbehälter ab. Nach Fertigstellung des Auftrags wird der Sammelbehälter meist über eine hinter dem Kommissionierer angeordnete Stetigfördertechnik abgegeben. Die Installation von Kommissionierbahnhöfen, bei denen ein Auftragsbehälter mehrere Kommissionierstationen ansteuert, ist bei dieser Systemvariante möglich.

Beide Systemlösungen bieten Schutz vor Verschmutzung und haben einen hohen Raumnutzungsgrad. Sie eignen sich zur Kommissionierung von geringen Mengen, i. d. R. Mittel- bis Langsamdreher. Typische Einsatzgebiete sind Ersatzteillager, die Werkzeuglagerung sowie die Lagerung von Produktiv- und Gemeinkostenmaterialien.



Abb. 5.14 Stationärer Kommissionierroboter mit Palettenregalanbindung [Foto: KUKA]

5.2.5 Stationärer Kommissionierroboter mit Palettenregalanbindung

Ortsfeste Kommissionierroboter arbeiten nach dem Ware-zur-Person-Prinzip und entnehmen die dynamisch bereitgestellten Artikel mittels eines Greifmechanismus. Bei diesen Kommissionierrobotern handelt es sich meist um die sogenannten Knickarmroboter (Abb. 5.14). Sie sind mit mehreren Achsen ausgestattet und können vertikal und horizontal innerhalb eines begrenzten Radius agieren. Hinsichtlich ihrer Bewegungsabfolge sind sie frei programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt. Hauptsächlich werden sie zum Kommissionieren von Paletten eingesetzt. Die eingebaute Greifvorrichtung richtet sich nach dem zu kommissionierenden Gut. Eine Bereitstellung der Paletten kann entweder durch Flurförderzeuge oder vollautomatisch durch Anbindung eines automatisch bedienten Palettenregals über eine stetige Palettenfördertechnik erfolgen. Neben den bekannten Robotern mit Knickarm zur Depalettierung gibt es auch Varianten, die einen Portalkran zur Kommissionierung einsetzen. Der gesamte Kommissionervorgang läuft bei dieser Systemvariante vollautomatisiert ab.

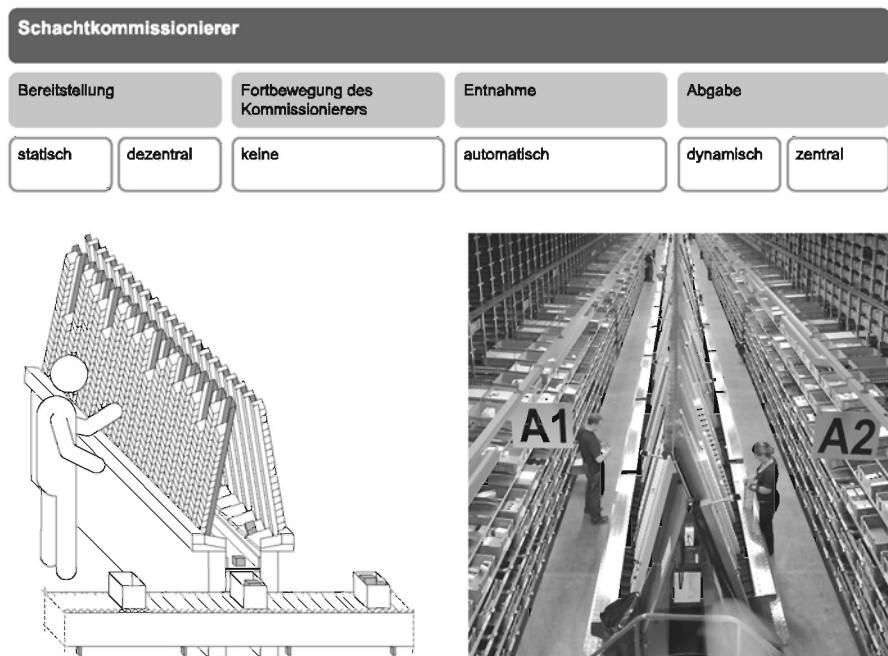


Abb. 5.15 Schachtkommissionierer [Foto: SSI Schäfer]

5.2.6 Schachtkommissionierer

Schachtkommissionierer dienen zur automatischen Vereinzelung von Gütern. Die Form und Stabilität der vertriebenen Artikel ist entscheidend für den Einsatz eines Schachtkommissionierers. Geeignet sind überwiegend Artikel mit einer rechteckigen Form oder Verpackung. Wie in Abb. 5.15 zu sehen, werden die Artikel in Schächten bereitgestellt. Die Größe eines Schachtes lässt sich individuell an die Artikelmaße anpassen, so dass eine optimale Raumausnutzung gewährleistet ist. Es findet keine Durchmischung von Artikeln in einem Schacht statt, die Bereitstellung erfolgt sortenrein in einem Kanal. Am unteren Ende eines Schachtes befindet sich ein Ausschubelement, das die Artikel aus dem Schacht auf das abführende Förderband wirft. Dies geschieht meist auftragsweise, d. h. alle Positionen für einen Auftrag werden in einem zugewiesenen Abschnitt auf dem Förderband gesammelt und in einen wartenden Auftragsbehälter abgeführt. Das Steuerungssystem ordnet dabei jedem Auftrag ein virtuelles Fenster auf dem Fördergurt zu. Die Befüllung des Behälters kann durch einen Trichter am Ende des Förderbands vereinfacht werden. Schachtkommissionierer existieren in mehreren Ausführungsformen. Grundsätzlich können Automaten für Schnelldreher und solche für Mittel- bis Langsamdreher unterschieden werden. Schachtkommissionierer für Schnelldreher sind in A-Form aufgebaut (Abb. 5.16(a)). Im englischsprachigen Raum wird dieser Systemtyp auch als A-Frame bezeichnet. Die Schächte sind in zwei schräg gestellten Reihen ange-

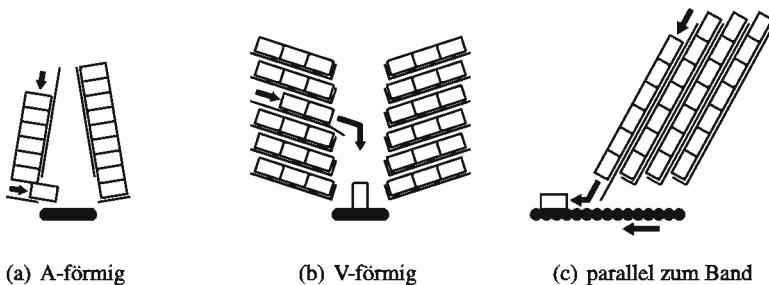


Abb. 5.16 Anordnungsvarianten von Schächten beim Schachtkommissionierer

ordnet. Zwischen den beiden Schachtreihen verläuft ein Gurtförderer, der die Artikel in den Auftragsbehälter abführt. Neben dieser Bauform existieren auch Geräte für Mittel- bis Langsamdreher, bei denen die Schachtanordnung von der A-Form abweicht. Die Artikel werden bei einer Variante dieser Gerätetypen in mehreren übereinandergelegenen Ebenen gelagert, die Kanäle sind V-förmig zum Fördergurt angeordnet (Abb. 5.16(b)). Das Funktionsprinzip ähnelt dem des Schnelldreherautomaten. Die Artikel werden über einen Zwangsauswurf auf das Band kommissioniert und in den Auftragsbehälter abgeführt. Der Nachschub kann bei beiden Gerätetypen zeitgleich zum Kommissionierprozess erfolgen. Bei einer weiteren Systemvariante sind die Schächte parallel zum Förderband angeordnet (Abb. 5.16(c)).

Neben den beiden bereits beschriebenen Ausführungsformen variieren Schachtkommissionierer auch hinsichtlich der Abgabeart und des Verlaufes der Förderbänder. Die Abgabe kann zwangsgesteuert oder mit Hilfe der Schwerkraft erfolgen. Dazu werden die Artikel bei Bedarf aus einer Haltung gelöst und fallen aus geringer Höhe auf den Fördergurt. Bei der Zwangsabgabe werden die Artikel mittels einer Ausschubkomponente aus den Kanälen auf den Gurt gestoßen.

Das Förderband kann alternativ zur bereits beschriebenen Variante auch als Außenring um die Schachtreihen verlaufen. Probleme treten beim bedarfsgerechten Nachschub auf, da die Befüllung der Schächte im Gegensatz zum Kommissioniervorgang meist nicht automatisiert ist und manuell durchgeführt werden muss. Zur Optimierung dieses Vorgangs verfügen einige Systeme über einen Füllstandsanzeiger an jedem Schacht. Falls die Bestückung eines Schachtes zu gering ist, wird mittels einer Leuchtdiode der Bedarf signalisiert. Auf einem kleinen Display werden ebenfalls die Mengeninformationen und der Standort des Artikels für den Nachschub angezeigt.

Die Bereitstellung der Artikel erfolgt in Schachtkommissionierern statisch-dezentral. Die Entnahme wird automatisch durchgeführt. Abgegeben werden die Artikel dynamisch an einer zentralen Stelle.

Schachtkommissionierer zählen zu den leistungsstärksten Kommissioniertechniken und werden vorwiegend in der Pharmabranche eingesetzt. Sie werden aber auch zur Kommissionierung von CDs und DVDs verwendet. Einige Schnelldreherautomaten können bis zu 2.400 Aufträge pro Stunde bearbeiten und haben eine im

Automatisches Kollipicken		
Bereitstellung	dynamisch	zentral
Fortbewegung	keine Fortbewegung	
Entnahme	automatisch	
Abgabe	statisch	zentral



Abb. 5.17 Automatisches Kollipicken [Foto: Witron]

Vergleich zur manuellen Kommissionierung sehr geringe Fehlerrate von $\pm 0,01\%$. Im Schnelldreherbereich kann durch die hohe Geschwindigkeit der Automaten eine schnelle Auftragsbearbeitung und somit eine kurze Durchlaufzeit garantiert werden. Durch den Einsatz im Mittel- bis Langsamdreherbereich werden lange Wegzeiten eingespart und die Durchlaufzeit somit stark verkürzt. Eine Überalterung der Produkte wird bei dieser Kommissioniertechnik durch die bedingte Ausgabe nach dem FIFO-Prinzip vermieden.

Ein Schachtkommissionierer kommissioniert vollautomatisch ohne menschliches Einwirken. Entscheidendes Kriterium für die Zuordnung dieses Systemstyps zu einem Kommissionierprinzip ist in diesem Fall der Sammelbehälter. Die Artikel werden beim Schachtkommissionierer auf einen Bandförderer geworfen, an einen zentralen Abgabepunkt transportiert und anschließend in den Sammelbehälter abgegeben. Der Schachtkommissionierer arbeitet demnach vollautomatisch nach dem Prinzip Ware-zur-Person.

5.2.7 Automatisches Kollipicken

In bestimmten Bereichen der Distributionslogistik ist es sinnvoll, vollautomatische Kommissionierlösungen zu implementieren. Diese Lösungen sind ganzheitliche Systeme, die den gesamten Prozess von der Lagerung bis zur volumenoptimierten Palettenbildung umfassen. Um dies zu gewährleisten, ist ein vollintegriertes System notwendig, welches sich aus vielen verschiedenen Bausteinen zusammensetzt. Für den Lebensmittelhandel wurde ein Systemtyp entwickelt, der eine filialgerechte automatische Kommissionierung von Paletten bzw. Kolls ermöglicht. Der Ablauf der Kommissionierung bei diesem Systemtyp wird im Folgenden beschrieben.

Sortenreine Paletten aus dem Wareneingang werden zunächst automatisch in einem Hochregallager eingelagert und dort so lange bevoorraet, bis der Artikel vom Kommissioniersystem angefordert wird. Eine Stetigfördertechnik überführt die Palette dann zur automatischen Depalettierung. Hier wird die Palette in ihre einzelnen Lagen zerlegt. Die einzelnen Lagen werden nun über Fördertechnik einem AKL zugeführt. Das AKL dient zur Pufferung der einzelnen Lagen auf Tablaren. Aus dem Kleinteilelager werden die Lagen über eine spezielle Fördertechnik weitergeführt, die eine Vereinzelung der einzelnen Packstücke aus den jeweiligen Lagen vollzieht. Spezielle Software sorgt nun dafür, dass die jeweiligen Packstücke oder Trays sequenzgerecht und den Filialanforderungen entsprechend der Palettierung zugeführt werden (Abb. 5.17). Die Palettierung findet rechnerbasiert statt, so dass eine maximale Volumenausnutzung und höchste Stabilität garantiert werden können. Zuletzt findet das automatische Stretchen der Palette statt, bevor sie für die Auslieferung bereit ist. Das automatische Lagenpicken kann dem Kommissionierprinzip Ware-zur-Person zugeordnet werden, da alle Artikel zur Sammeleinheit transportiert werden und erst dort die physische Zuordnung zu den einzelnen Kundenaufträgen vollzogen wird.

5.3 Kombinierte Systemtypen

5.3.1 Zweistufige Kommissionierung mit *Pick-to-belt*

Bei diesen zweistufigen System werden die Auftragspositionen zunächst artikelweise in einem konventionellen Kommissioniersystem aus Fachboden-, Behälter- oder Durchlaufregalen nach dem Person-zur-Ware-Prinzip kommissioniert. Die manuell entnommenen Einheiten werden direkt auf einen parallel zur Entnahmefront angeordneten angetriebenen Gurt- bzw. Bandförderer abgegeben (*Pick-to-belt*), der die Artikel daraufhin zur Sortieranlage transportiert (Abb. 5.18). Die Abgabe erfolgt demzufolge dezentral. In der Sortieranlage erfolgt die Zuordnung der einzelnen Artikel zu den entsprechenden Kundenaufträgen. Ein Kundenauftrag wird meist in einer Endstelle des Sorters gesammelt. Die Artikel müssen dazu über ein eindeutiges Identifizierungsmerkmal verfügen (z. B. Barcode oder RFID-Tag). In der zweiten Kommissionierstufe erfolgt die Zuweisung der Artikel zum Kundenauftrag nach dem Ware-zur-Person-Prinzip. Es handelt sich also bei diesem Systemtyp um eine teilautomatisierte Lösung, bei der beide Kommissionierprinzipien miteinander kombiniert werden.

Die Kommissioniermethode *Pick-to-belt* ist dabei streng mit der artikelorientierten Kommissionierung verbunden und nicht mit dem *Pick-to-Box*-Prinzip zu verwechseln, bei dem die Artikel in einen Auftragsbehälter kommissioniert werden, der im Anschluss über eine Förderbahn abtransportiert wird. Vorteile der *Pick-to-belt*-Methode liegen in der unbegrenzten Sammelkapaziät des Kommissionierers, da keine Einschränkungen aufgrund eines Ladehilfsmittels zur Sammlung von Kom-

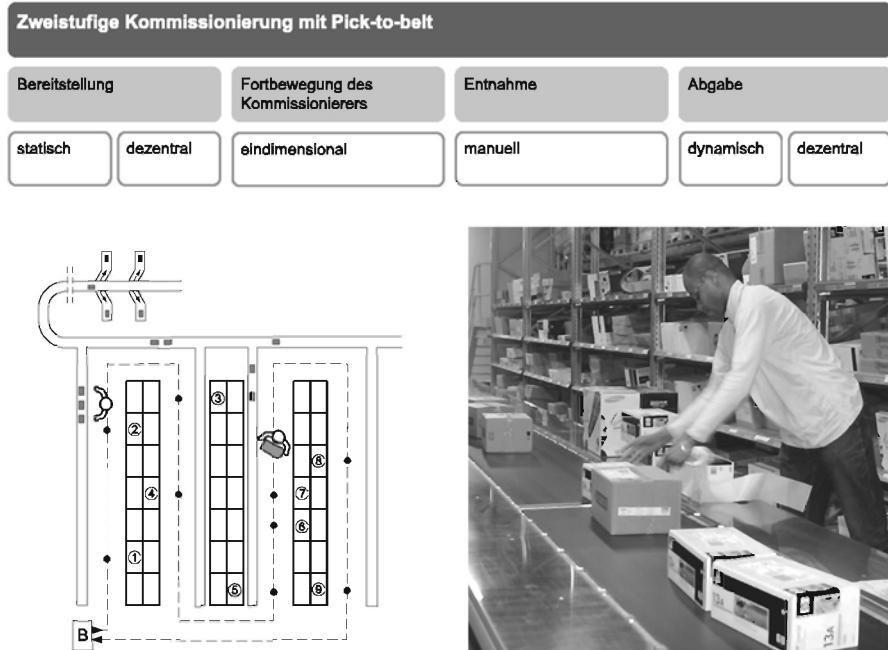


Abb. 5.18 Zweistufige Kommissionierung mit Pick-to-belt [Foto: Knapp]

missioniereinheiten bestehen. Demzufolge ist die Anzahl der Auftragspositionen der Kommissionieraufträge nicht limitiert.

Die Sortieranlage in zweistufigen Kommissioniersystemen mit Batchbetrieb wird üblicherweise in einer Ringstruktur angeordnet, damit Auftragspositionen ggf. temporär auf dem Kreislauf rezirkulieren können, falls alle Endstellen belegt sind. Weit verbreitete Sorter in diesem Bereich sind Kippschalen- und Quergurtsorter. Welche Sortiertechnik in einem zweistufigen System zum Einsatz kommt, ist abhängig von der Artikelbeschaffenheit und muss im Einzelfall entschieden werden.

Die Kommissioniererführung kann in der ersten Stufe mittels Pick-by-light-Anzeigen, Pick-by-voice oder mobilen Handterminals erfolgen

Zweistufige Kommissioniersysteme eignen sich bei einem großen Artikelstamm und einer großen Anzahl Aufträge pro Tag mit einer geringen Positionsanzahl.

5.3.2 Kommissionieren entlang einer Regalfront am AKL

Eine weitere Möglichkeit der kombinierten Kommissionierung ist die Kommissionierung entlang einer Regalfront in einem automatischen Kleinteilelager. Hier werden die Bevorratung und die Kommissionierung von Artikeln miteinander verknüpft. Die unteren Ebenen des Regals sind in diesem Fall keine Lagerfläche, son-

Kommissionierung entlang Regalfront an AKL

Bereitstellung	Fortbewegung des Kommissionierers	Entnahme	Abgabe
statisch/ dynamisch	dezentral	eindimensional	manuell

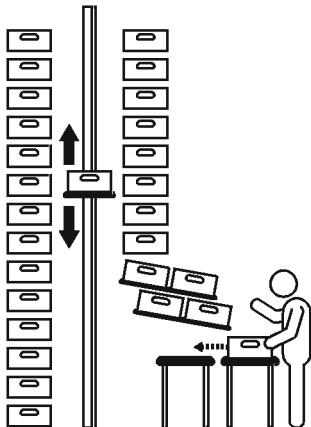


Abb. 5.19 Kommissionieren entlang einer Regalfront am AKL [Foto: BSS Bohnenberg]

dern Bereitstellplätze für die Kommissionierung. Sie werden vom Regalbediengerät mit Artikelbehältern versorgt (Abb. 5.19). Entlang der Regalfront verläuft typischerweise eine Stetigfördertechnik. Dort befinden sich auch ein oder mehrere Kommissionierbahnhöfe, an denen Auftragsbehälter durch Fördertechnik ein- und ausgeschleust werden können, sofern für den Auftrag relevante Artikel in diesem Bereich bereitgestellt werden. Ein Pick-by-light-System instruiert den Kommissionierer, der sich vor der jeweiligen Regalfront bewegt, und visualisiert, wie viele Artikel aus welchem Behälter in den entsprechenden Auftragsbehälter kommissioniert werden müssen. Ist der Kommissionierungsvorgang abgeschlossen, wird der Auftragsbehälter auf die angetriebene Fördertechnik geschoben und abgeführt. Je nach Auftrag durchläuft der Behälter gegebenenfalls noch einen oder mehrere Bahnhöfe. Die Implementierung von anderen Informationssystemen, wie Pick-by-voice oder einer einfachen Kommissionierliste, ist hier problemlos möglich. Durch die direkte Eingliederung in das Kleinteilelager ist das Regalbediengerät in der Lage, eine schnelle und effiziente Bereitstellung zu ermöglichen.

Die Bereitstellung kann hierbei differenziert werden. Schnelldrehern wird meist ein fester Bereitstellplatz in einem Durchlaufkanal zugeordnet. Die Artikelbereitstellung erfolgt demnach statisch. Das Regalbediengerät sorgt von der anderen Seite lediglich für Nachschub in den mehrfachtiefen Fächern. Zusätzlich ist dieser Systemtyp in der Lage, nur die Behälter bereitzustellen, die für freigegebene Aufträge erforderlich werden. Dafür ist neben den festen Plätzen für Schnelldreher eine Rei-

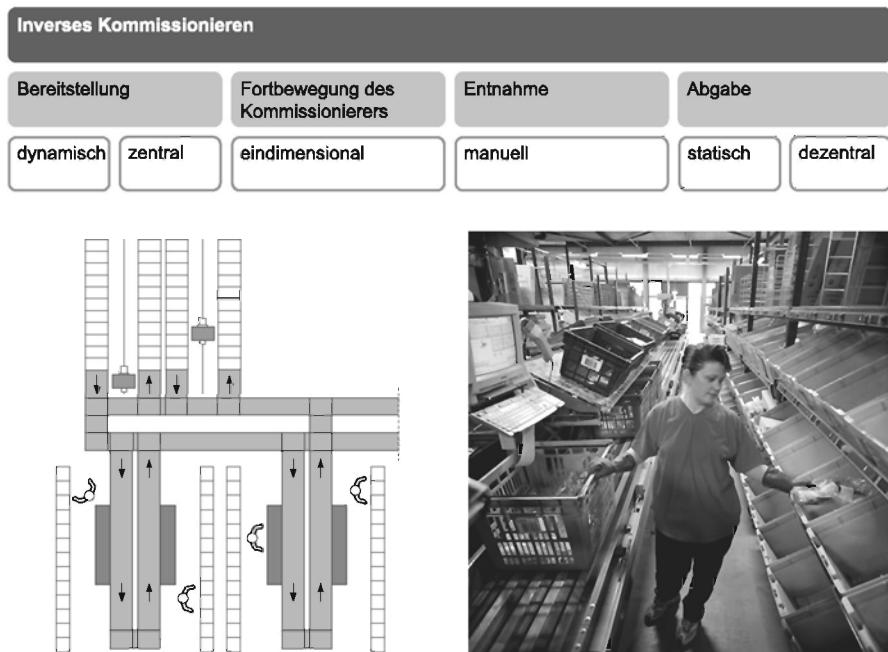


Abb. 5.20 Inverse Kommissionierung [Foto: Vanderlande Industries]

he von Plätzen für Mittel- bis Langsamdreher vorgesehen. Die Artikel werden in die dafür vorgesehenen Lagerplätze mittels RBG dynamisch bereitgestellt und nach erfolgreicher Kommissionierung wieder zurückgelagert.

Besonders effizient ist diese Form der Kommissionierung in Verbindung mit dem Pick&Pack-Prinzip. Anstelle von Behältern wird hier direkt in versandfertige Kartons kommissioniert.

Dieser Systemtyp kann auch mit einem Hochregallager für Paletten realisiert werden. Dabei befinden sich in der untersten Ebene eine Reihe von Bereitstellplätzen für Paletten, von denen abkommissioniert werden kann. Bei der Kommissionierung entlang einer Regalfront eines AKLs handelt es sich ebenfalls um eine teilautomatisierte kombinierte Lösung, da sich der Kommissionierer innerhalb seines Arbeitsbereichs zu den bereitgestellten Behältern bewegt. Diese werden wiederum dynamisch vom RBG auf den Bereitstellplätzen angedient.

5.3.3 Inverses Kommissionieren

In diesem Fall sind die Kundenauftragsbehälter in einem Regal angeordnet. Artikelreine Behälter werden aus einem entfernten Lagerbereich zum Entnahmeplatz transportiert und zur Entnahme nach dem Ware-zur-Person-Prinzip dynamisch-dezentral

bereitgestellt. Die Abgabe erfolgt in die im Regal befindlichen Kundenauftragsbehälter. Der Kommissionierer bewegt sich mit der Bereitstelleinheit zu den einzelnen Auftragsbehältern (Abb. 5.20). Die Fortbewegung erfolgt ähnlich dem Person-zur-Ware-Prinzip. Nach Vervollständigung des Auftrags werden die Kommissioniereinheiten durch weitere Mitarbeiter zum Versand befördert (statisch-dezentrale Abgabe der Entnahmeeinheit und statisch-zentrale Abgabe der Kommissioniereinheit). Das Verfahren wird als inverse Kommissionierung bezeichnet und findet in den letzten Jahren insbesondere im E-Commerce-Bereich zunehmend Bedeutung (sehr großes Sortiment und viele kleine Aufträge). Durch diese Kombination beider Kommissionierprinzipien werden die Zugriffe auf einen Artikel verdichtetet. Die Kommissioniererführung wird hierbei durch eine Kombination von Pick-by-light und Put-to-light realisiert.

Kapitel 6

Optimierung von Kommissioniersystemen

In den vorhergehenden Kapiteln wurden grundlegende organisatorische, technische und informatorische Ausprägungen von Kommissioniersystemen vorgestellt. Durch eine betriebliche Optimierung in Bezug auf das Zusammenspiel der ausgewählten Anlagen sowie eine effiziente Gestaltung der Kommissionierbereiche können Abläufe verbessert und somit die Systemleistung gesteigert werden. Darüber hinaus können Fehler in der Kommissionierung minimiert werden. Es werden Leistungsziele und auch Qualitätsanforderungen vorangetrieben.

Optimierungs- und Gestaltungsprinzipien können in den verschiedensten Bereichen sinnvoll umgesetzt werden. Die Kommissionierleistung kann beispielsweise durch die Nutzung von Wegstrategien zur Verkürzung der Wegzeit gesteigert werden. Einige Wegstrategien können dabei erst dann zweckmäßig angewandt werden, wenn die Artikel im Kommissionierlager je nach Umschlaghäufigkeit in verschiedenen Lagerzonen eingelagert wurden. Die Optimierung der Einlastungsreihenfolge von Aufträgen kann insbesondere in Systemen mit Sammelauftragsbearbeitung die Produktivität verbessern. Hervorzuheben ist hier die Batchplanung in zweistufigen Kommissioniersystemen.

Die Vermeidung von Kommissionierfehlern durch Maßnahmen zur Sicherung der Kommissionierqualität führt zu einer hohen Serviceleistung und spart sowohl Kosten als auch Zeit (Nachkommissionierung von fehlerhaften Aufträgen) ein. Die ergonomische Gestaltung des Arbeitsplatzes ist ein weiterer wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang, anhand dessen sowohl die Leistung als auch die Qualität sichergestellt werden können.

6.1 Strategien zur Produktivitätssteigerung

Die Leistung eines Kommissioniersystems, d. h. die Anzahl bearbeiteter Positionen pro Zeiteinheit (vgl. Kap. 7), kann durch die Erhöhung des Personaleinsatzes im Kommissionierbereich erzielt werden. Eine Produktivitätssteigerung wird dadurch jedoch nicht erzielt. Produktivität bezeichnet das Verhältnis von Ausbrin-

Tabelle 6.1 Lagerplatzvergabestrategien

Lagerplatzvergabestrategien	
Festplatzprinzip	Freiplatzprinzip (chaotische Lagerplatzvergabe)
kürzeste Fahrzeit	nach Zugriffshäufigkeit
ABC-Zonung	kontinuierlich

gungsmenge (z. B. Summe der kommissionierten Güter) zur dafür aufgebrachten Einsatzmenge (z. B. Arbeitsstunden, Personal, Betriebsmittel, Hilfsmittel, etc.). Die Steigerung der Produktivität kann z. B. durch eine abgestimmte Lagerplatzvergabe der Bereitstelleinheiten, den Einsatz leistungsstärkerer Technikkomponenten, eine andere Kommissioniererführung sowie durch eine Verbesserung des menschlichen Kommissionierablaufs erfolgen.

6.1.1 Lagerplatzvergabestrategien

Einen Optimierungsansatz innerhalb des Kommissionierlagers zur Steigerung der Kommissionierleistung stellt die Lagerplatzvergabestrategie dar. Sie bezeichnet das Vorgehen bei der Zuweisung eines Artikels zu einem Lagerplatz. Die Vergabe der Laggeräume kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen (Tab. 6.1). Bei der Lagerplatzvergabe nach dem *Festplatzprinzip* erhält jeder Artikel eine feste Zuordnung zu einem Lagerplatz.

Bei dem *Freiplatzprinzip*, oder auch chaotische Lagerplatzvergabe genannt, wird jedem Artikel wahlfrei ein Lagerplatz zugewiesen. Hierbei wählt das Lagerverwaltungssystem (LVS) den nächsten freien Lagerplatz aus. Es besteht kein Zusammenhang zwischen zwei aufeinander folgenden Einlagerungen. Ein Spezialfall des Freiplatzprinzips ist die Strategie der kürzesten Fahrzeit (KFZ). Bei der *KFZ-Strategie* werden die freien Lagerplätze ausgehend vom Ein- und Auslagerpunkt nach der benötigten Fahrzeit sortiert. Anschließend wählt das System den nächsten freien Lagerplatz aus und weist diesen dem Artikel als Einlagerplatz zu. Durch diese Ver-gabestrategie werden Lagerplätze mit geringen Zugriffszeiten höher ausgelastet als Lagerplätze mit hohen Zugriffszeiten. Das Einsparungspotenzial dieser Strategie hängt vom mittleren Auslastungsgrad des Lagers ab. Je geringer der Auslastungsgrad, desto größer ist das Einsparungspotenzial. Beide Verfahren werden als frei eingestuft, da im Lager keine Ordnung der Artikel nach einem vorgegebenen Merkmal besteht.

Ein anderes Kriterium zur Lagerplatzvergabe nach dem Freiplatzprinzip ist die Umschlaghäufigkeit bzw. Zugriffshäufigkeit der Artikel. Hierbei werden die Artikel mit hoher Zugriffshäufigkeit nahe dem Ein- und Auslagerpunkt eingelagert. Je

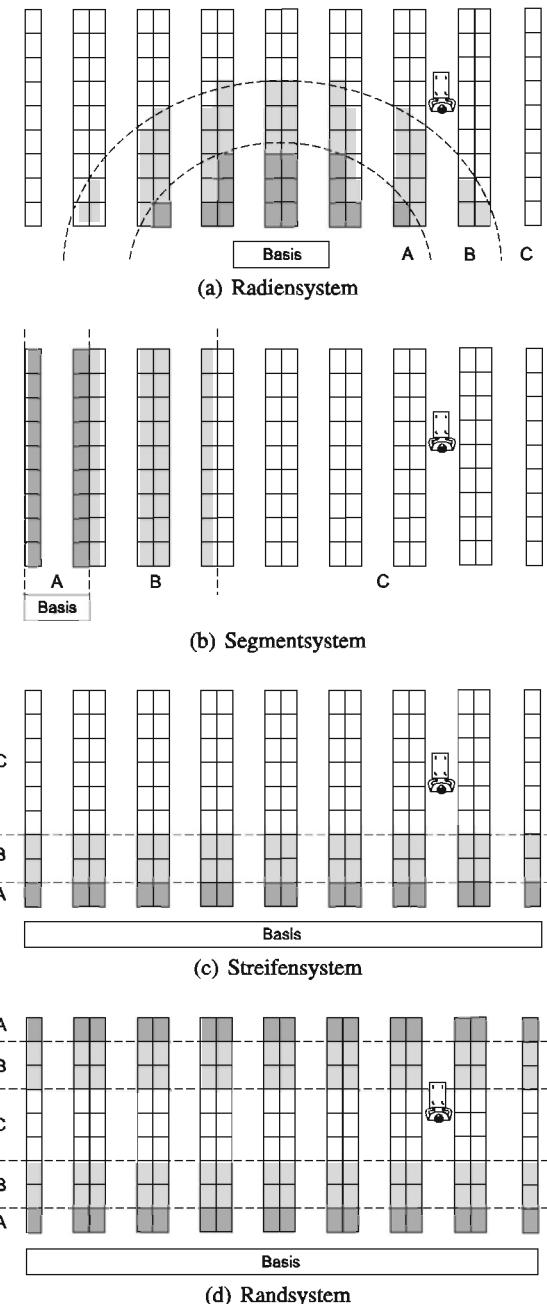


Abb. 6.1 Varianten der Anordnung von ABC-Zonen

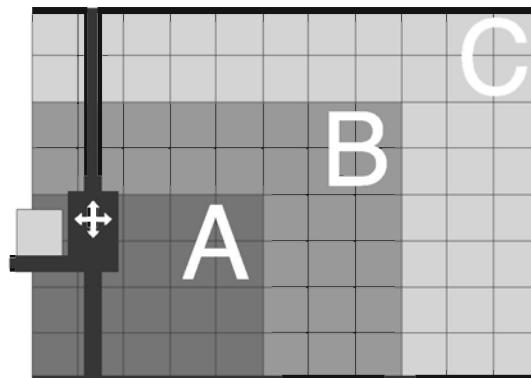


Abb. 6.2 ABC-Zonung an einer Regalwand

niedriger die Anzahl Zugriffe auf einen Artikel sind, desto größer ist die Entfernung zum Ein- und Auslagerpunkt.

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

Nach Durchführung einer ABC-Analyse (vgl. Kap. 8) sind die Artikel in Abhängigkeit von ihrer Zugriffshäufigkeit in unterschiedliche Klassen eingeteilt. Ebenso werden die Lagerplätze gemäß der jeweiligen Anfahrtzeit in Zonen gruppiert. Je nach Klassenzugehörigkeit werden die Artikel bei der Einlagerung einer Zone zugewiesen. In Abb. 6.1 sind verschiedene ABC-Zonungen in Kommissionierlagern mit ebenerdiger Fortbewegung des Kommissionierers veranschaulicht. Dazu zählen das Radiensystem, das Segmentsystem, das Streifensystem sowie das Randsystem. In Abb. 6.2 ist eine beispielhafte Darstellung der ABC-Zonung einer Regalwand in einem Hochregallager dargestellt. Artikel, die zur A-Gruppe zählen, sind sogenannte Schnelldreher und werden nahe der Kommissionierbasis eingelagert. Die B-Zone umschließt die A-Zone und beinhaltet Mitteldreher. Sogenannte Langsamdreher werden aufgrund ihrer geringen Umschlaghäufigkeit weiter entfernt von der Basis eingelagert. Innerhalb einer Zone erfolgt die Zuordnung der Lagerplätze wiederum nach dem Zufallsprinzip oder der KFZ-Regel.

Bei der *kontinuierlichen Lagerplatzvergabe* werden alle Artikel gemäß der erwarteten Zugriffshäufigkeit sowie die Lagerplätze gemäß ihrer Zugriffszeit sortiert. Anschließend erhalten sowohl die Lagerplätze als auch die Artikel eine Ordnungszahl, über die die Zuordnung geregelt ist. Daraufhin erfolgt eine sukzessive Platzvergabe auf Grundlage einer Rangliste. Der Artikel mit der höchsten Zugriffshäufigkeit wird dem Lagerplatz mit der geringsten Entfernung vom Basispunkt zugeordnet. Dieses Vorgehen wird für jeden Artikel wiederholt, bis alle Artikel einem Lagerplatz zugeordnet sind. Die Platzvergabe folgt demnach kontinuierlich einer vorbestimmten Reihenfolge. Die Zugriffshäufigkeit einzelner Artikel ändert sich in manchen Branchen jedoch täglich (Beispiel Buchhandel: Bekanntgebung der Nobelpreisträger), so dass ein hoher Aufwand zur Einhaltung dieser Lagerplatzvergabestrategie betrieben werden muss.

6.1.2 Wegstrategien

Die Optimierung der Kommissionierreihenfolge innerhalb eines Kommissionierbereichs kann als Traveling-Salesman-Problem (TSP) formuliert werden. Da die zur Lösung von TSP und Tourenplanungsproblemen entwickelten exakten Verfahren bei gängigen Problemumfängen jedoch große Algorithmen-Laufzeiten aufweisen, wird oftmals mit Heuristiken, wie beispielsweise den im Folgenden vorgestellten Wegstrategien, gearbeitet. Diese liefern eine Lösung des Optimierungsproblems. Es kann jedoch bei den meisten Heuristiken nicht garantiert werden, dass es sich um die optimale Lösung handelt.

Die Weg- oder Gangstrategie legt fest, nach welchen Regeln sich der Kommissionierer durch die Gassen des Lagers bewegt. Durch die Auswahl der Wegstrategie wird somit seine Route vorbestimmt. Ziel ist es, die mittlere Wegstrecke, die ein Kommissionierer zurücklegt, zu minimieren. In Abhängigkeit von der Auftragsstruktur, der Lagerplatzvergabestrategie und vom Layout können unterschiedliche Wegstrategien zu einem optimalen Ergebnis führen.

Wegstrategien bei eindimensionaler Fortbewegung

Grundsätzlich können in einem Person-zur-Ware-System mit eindimensionaler Fortbewegung des Kommissionierers sechs einfache Heuristiken unterschieden werden.

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

Die *Schleifenstrategie ohne Überspringen* (SchOÜ) wird auch als Durchgangsstrategie oder Mäander-Heuristik bezeichnet [HHH06]. Dabei durchläuft der Kommissionierer mäanderförmig alle Gassen des Systems, unabhängig davon, ob in der Gasse eine Pickposition vorliegt oder nicht. Ein Gassenwechsel ist an jedem Gangende zwingend notwendig. Nach der Abarbeitung des Kommissionierauftrags kehrt der Mitarbeiter zur Basis (Auftragsannahme- und/oder -abgabestelle) zurück (Abb. 6.3(a)).

Der Einsatz dieser Strategie ist sinnvoll, wenn die Anzahl der Positionen pro Auftrag so groß ist, dass der Kommissionierer fast immer alle Gassen durchlaufen muss oder die Gassen so schmal sind, dass ein Begegnungsverkehr innerhalb der Gasse nicht möglich ist. Zudem bietet die Schleifenstrategie einen besonders einfachen und geordneten Aufbau [GUD05]. Der Aufwand zum Anlernen von neuem Personal ist hierbei minimal. Die Strategie bietet außerdem die Möglichkeit, konkurrierende Kriterien bei der Planung und dem Aufbau von Kommissionierzonen, wie z. B. Bereitstellung der Ware unter Berücksichtigung einer optimalen Packreihenfolge oder Kommissionierung nach umgekehrtem Ladenspiegel [SCH96] für die Fili-

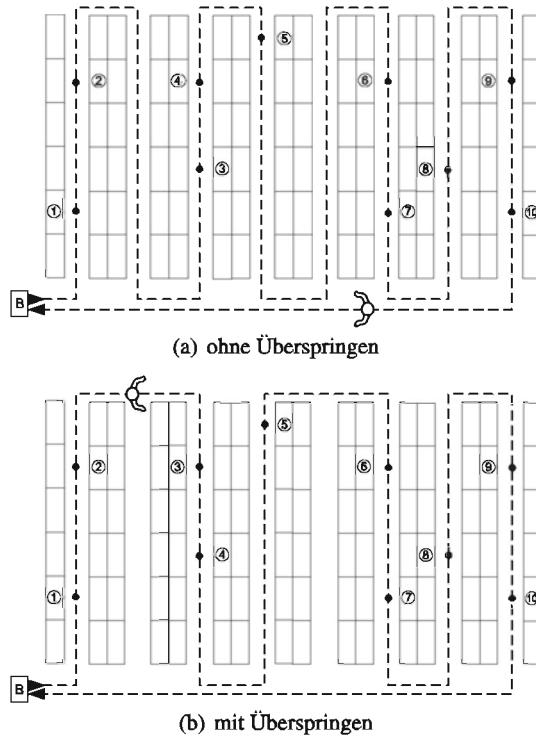


Abb. 6.3 Schleifenstrategie

albelieferung, zu integrieren. Der Nachteil dieser Wegstrategie besteht darin, dass strategiebedingt unnötige Wegstrecken zurückgelegt werden, wenn der Kommissionierer eine Gasse durchquert und dort kein Artikel entnommen wird. Ebenfalls besteht die Gefahr von Stauungen und Wartezeiten, wenn Kommissionierer aufgrund zu schmaler Arbeitsgangbreiten einander nicht überholen können.

Bei der *Schleifenstrategie mit Überspringen* (SchMÜ) durchläuft der Kommissionierer ebenfalls mäanderförmig die Gassen des Kommissionierlags. Im Gegensatz zur Schleifenstrategie ohne Überspringen lässt der Kommissionierer bei dieser Strategie jedoch alle Gassen aus, in denen keine Pickpositionen vorliegen (Abb. 6.3(b)). Dadurch wird der anteilige Weg pro Position reduziert und die Kommissionierleistung erhöht. Durch das Überspringen von Gassen ist die Richtung, in der eine Gasse durchlaufen wird, im Gegensatz zur Schleifenstrategie ohne Überspringen nicht vorgegeben. Die Arbeitsgangbreite in der Kommissionergasse muss aus diesem Grund ausreichend dimensioniert werden, so dass beim Einsatz mehrerer Kommissionierer im System der Begegnungsverkehr ohne Probleme erfolgen kann.

Im Gegensatz zu den beiden bereits vorgestellten Wegstrategien stellt die Stichgangstrategie eine völlig andere Vorgehensweise bei der Kommissionierung dar. Unterschieden werden kann hierbei in die Stichgangstrategie mit und ohne Gang-

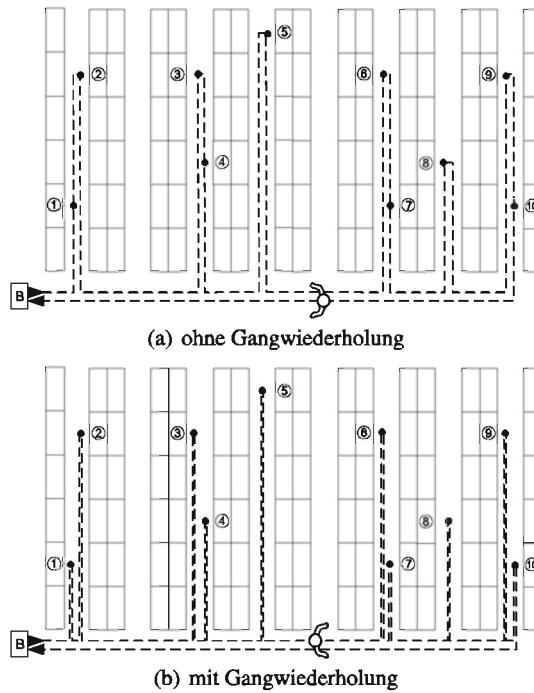


Abb. 6.4 Stichgangstrategie

wiederholung. Bei der *Stichgangstrategie ohne Gangwiederholung* (StOW) bewegt sich der Kommissionierer entlang der Regalstirnseite und geht ausschließlich in die Gasse hinein, in der Artikel entnommen werden sollen. Die jeweilige Gasse wird dabei nur einmal betreten, um alle dort befindlichen Auftragspositionen der Reihe nach zu kommissionieren (Abb. 6.4(a)). Der Kommissionierer verlässt die Gasse an der gleichen Seite, an der er hineingegangen ist. Die *Stichgangstrategie mit Gangwiederholung* (StMW) basiert auf dem gleichen Prinzip wie die Stichgangstrategie ohne Gangwiederholung. Der wesentliche Unterschied besteht jedoch darin, dass sich der Kommissionierer für jede einzelne Auftragsposition in den Gang hinein begibt, diese entnimmt und wieder zur Regalstirnseite zurückkehrt (Abb. 6.4(b)). Diese Strategie wird eingesetzt, wenn die Kommissioniergänge aufgrund zu geringer Gangbreite nicht mit einem Wagen oder Kommissioniergerät befahren werden können [GUD05] oder wenn die zu kommissionierenden Artikel zu groß sind, um mehrere Einheiten auf einen Wagen zu packen. In diesem Fall steht dem Vorteil des höheren Volumennutzungsgrads aufgrund der schmalen Gänge der Nachteil des verlängerten Weges gegenüber. Vorteile dieser Strategien liegen zum einen in der Platzersparnis, da an den Gassenenden kein Raum für den Gassenwechselweg vorgesehen werden muss. Zum anderen kann die Wegstrecke reduziert werden, sofern nur wenige Artikel pro Gasse kommissioniert werden und zusätzlich die Lagerplatzvergabe nach der Zugriffshäufigkeit der Artikel gewählt wurde.

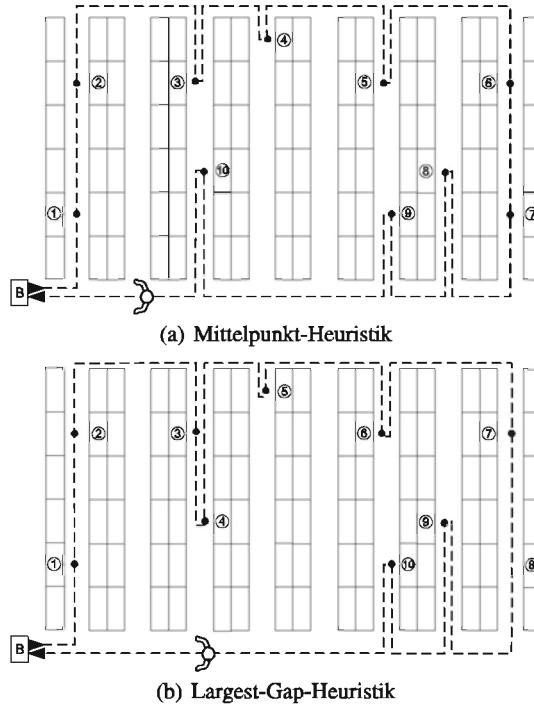


Abb. 6.5 Weitere Wegstrategien

Eine Sonderform der Stichgangstrategie ist die sogenannte *Mittelpunkt-Heuristik* (MH). Bei dieser Strategie wird die Gasse 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 Positionen 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. 6.5(a)). Der Einsatz der Mittelpunkt-Heuristik ist nur sinnvoll, wenn die Zugriffshäufigkeit der Artikel bei der Einlagerung berücksichtigt wird (vgl. Abb. 6.1(d)), da dann die eingesparte Wegstrecke innerhalb der Gasse größer ist als die zusätzliche Wegstrecke, die durch den Wechsel von der Vorderseite auf die Rückseite des Lagers entsteht.

Die *Largest-Gap-Heuristik* 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 Entnahmestellen innerhalb der Gasse bezeichnet. Hat der Kommissionierer die größte Lücke erreicht, bewegt er sich zur Stirnseite der Gasse zurück. Die Entnahmestellen oberhalb der größten Lücke werden wie bei der Mittelpunkt-Heuristik von der hinteren Regalstirnseite aus erreicht (Abb. 6.5(b)). Dadurch, dass der Kommissionierer die größte Lücke innerhalb einer Gasse auslässt, wird der

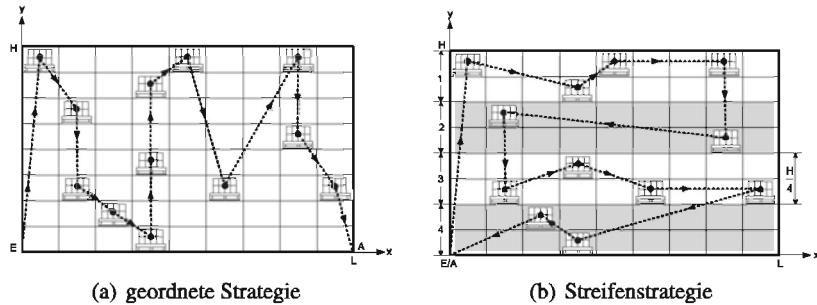


Abb. 6.6 Zweidimensionale Kommissionerrundfahrten

Gassenweg minimiert. Der Aufwand zum Erzeugen der Pickreihenfolge ist für die Largest-Gap-Heuristik sehr hoch und muss daher ins Verhältnis zum erzielbaren Nutzen gesetzt werden. In der Praxis wird diese Strategie nur selten eingesetzt.

Wegstrategien bei zweidimensionaler Fortbewegung

Bei der Kommissionierung nach dem Person-zur-Ware-Prinzip mit zweidimensionaler Fortbewegung des Kommissionierers, wie sie beispielsweise bei einer Kommissionerrundfahrt mit einem Regalbediengerät in einem Hochregallager vorkommt, gibt es ebenfalls mehrere Wegstrategien, die zur Verkürzung der Wegzeit und damit zur Steigerung der Kommissionierleistung beitragen. Neben der optimalen Fahrstrategie, die durch Lösen des TSP ermittelt werden kann, existieren verschiedene Heuristiken, die eine Tourenbildung mittels geometrischer Verfahren vollziehen. Bekannte Strategien sind u. a. die geordnete Strategie und die Streifenstrategie. Die *geordnete Strategie* hat ihren Namen aufgrund der Reihenfolge, in der die Entnahmestellen angefahren werden, erhalten. Das Regalbediengerät fährt die Entnahmestellen nacheinander, nach aufsteigender Position in Fahrtrichtung des Regalbediengeräts (x -Richtung), an. Am gegenüberliegenden Ende angekommen, fährt das Regalbediengerät wieder zurück an seinen Ausgangspunkt (Abb. 6.6(a)). Bei der *Streifenstrategie* wird die Regalwand in eine gerade Anzahl gleichbreiter horizontaler Streifen unterteilt. Das Regalbediengerät durchfährt die Streifen nacheinander und steuert dabei die sich darin befindenden Entnahmestellen an. Wie in Abb. 6.6(b) dargestellt, kann die Kommissionierung am obersten Streifen beginnen. Das Regalbediengerät fährt nun von links nach rechts alle Entnahmestellen dieses Streifens nacheinander an. Am rechten Ende angekommen, erfolgt der Übergang in den darunterliegenden Streifen. Dieser Streifen wird nun von rechts nach links durchfahren, bis alle Positionen kommissioniert wurden. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis alle Streifen durchfahren wurden und alle Positionen einer Tour gepickt sind. Daraufhin kehrt das Regalbediengerät zu seinem Basispunkt zurück. Durch den Einsatz der Streifenstrategie werden die vertikalen Fahrbewegungen des Regalbediengeräts vermindert. Aufgrund der – im Vergleich zur Fahrgeschwindigkeit

eines Regalbediengeräts – wesentlich geringeren Hubgeschwindigkeit lässt sich die erforderliche Fahrzeit pro Kommissionierrundfahrt verringern und die Kommissionierleistung steigern. Eine häufig anzutreffende Variante der Streifenstrategie ist die Zweiseitenstrategie, bei der das Regal funktional halbiert wird und so zwei gleich große Streifen entstehen.

6.1.3 Einlastungsreihenfolge von Kommissionieraufträgen

Im Mittelpunkt dieses Kapitels steht nicht die Bildung von Touren und Routen für einen wegoptimalen Rundgang des Kommissionierers, sondern die Bildung einer Reihenfolge, in der die Kommissionieraufträge zur Kommissionierung freigegeben werden. Die Sequenz der Aufträge wird im Rahmen der Auftragsdisposition festgelegt. Im Unternehmen ist dieser Bereich für die Abwicklung der Aufträge zuständig. Zentrale Aufgaben der Auftragsdisposition sind die Aufnahme, Aufbereitung, Reservierung, Umwandlung, Weiterleitung und Dokumentation der eingehenden Auftragsdaten. Der Begriff Disposition leitet sich dabei aus dem lateinischen Verb disponere ab, welches verteilen, aufstellen, ordnen bedeutet. Die Auftragsdisposition beinhaltet im Rahmen der Kommissionierung die Zuordnung aller notwendigen Warenbewegungen zu den jeweiligen Ressourcen (z. B. Auslagerung (Warenbewegung) zu Staplerfahrer (Ressource)). Parallel dazu erfolgt die Bestimmung der Zeitpunkte und der Reihenfolge der Auftragsbearbeitung. Übergeordnete Ziele sind dabei die fristgerechte Bearbeitung der Aufträge, eine gleichmäßige Systemauslastung und ein Minimum an unproduktiven Nebenzeiten, ohne dass Engpässe im System auftreten. Unter bestimmten Randbedingungen ist es sinnvoll, mehrere Kundenaufträge gleichzeitig zu bearbeiten. Eingehende Kundenaufträge werden von der Auftragsdisposition entgegengenommen und an das Kommissioniersystem angepasst. Hierzu werden die Aufträge ggf. aufbereitet, gruppiert und in eine sinnvolle Einlastungsreihenfolge gebracht. Die Disposition der Aufträge kann hierbei nach unterschiedlichen Regeln und unter Zuhilfenahme von Softwaretools erfolgen.

Die Reihenfolge und die Zuordnung der Aufträge zu den verschiedenen Ressourcen im Kommissioniersystem wird anhand einer Terminplanung, dem sogenannten Scheduling, durchgeführt. Die Planung der Einlastungsreihenfolge der Aufträge hängt vom System- und Auftragsstatus ab. Sie kann zum einen statisch erfolgen, d. h. dass bereits vor Beginn der Reihenfolgebildung alle erforderlichen Auftragsinformationen vorhanden sind und später eintreffende Aufträge in der Berechnung nicht mehr berücksichtigt und erst in die darauf folgende Aufstellung einbezogen werden. Zum anderen kann eine dynamische Berechnung durchgeführt werden. Hierbei werden auch während der Planungsperiode eintreffende Aufträge in die Reihenfolgebildung mit einbezogen. Dabei wird davon ausgegangen, dass zum Startzeitpunkt der Berechnung nur eine Teilmenge der Aufträge bekannt ist [WAN95].

Zur Lösung des Einlastungsreihenfolgeproblems können zahlreiche Optimierungsverfahren angewandt werden. Grundsätzlich lassen sich diese Verfahren in exakte und suboptimierende Verfahren einteilen. Zielkriterien, nach denen eine

Lösungsoptimierung durchgeführt werden soll, sind: die Durchlaufzeit eines Auftrags zu minimieren, die Auslastung des Kommissioniersystems zu maximieren und sowohl Bestände als auch die Terminüberschreitungen möglichst gering zu halten. Diese Zielsetzungen stehen teilweise im Konflikt zueinander und werden als Dilemma der Ablaufplanung beschrieben.

Anhand *exakter Verfahren* kann die optimale Lösung des Reihenfolgeproblems ermittelt werden. Diese Verfahren, z. B. die vollständige Enumeration, erfordern allerdings eine sehr lange Rechenzeit zur Findung der optimalen Lösung. Aufgrund der langen Optimierungsdauer lassen sich diese Verfahren nur zur Optimierung einer eher kleinen Anzahl an Aufträgen sinnvoll in der Praxis einsetzen.

Suboptimierende Verfahren ermitteln zwar nur in seltenen Fällen das globale Optimum des Auftragsreihenfolgeproblems, erfordern jedoch eine um ein Vielfaches geringere Optimierungsdauer.

Aus der Klasse der suboptimierenden Verfahren sind besonders die Prioritätsregeln hervorzuheben. Anhand eines ausgewählten Zielkriteriums, z. B. des Zeitpunkts der Erteilung eines Kundenauftrags (First Come – First Serve (FCFS)), wird die Auftragsreihenfolge geordnet. Die Prioritätsregeln bestimmen in kürzester Zeit eine Lösung und sind damit sehr gut geeignet für den Einsatz in dynamischen Systemen, da gerade hier ein hohes Maß an Flexibilität gefordert wird. Prioritätsregeln können schnell auf kurzfristig eintretende Ereignisse reagieren und eine neue an die Systemzustände angepasste Lösung ermitteln. Verschiedene Prioritätsregeln können darüber hinaus miteinander kombiniert werden und so mehrere Zielkriterien zusammenfassen.

Geeignete Prioritätsregeln für die Bildung der Einlastungsreihenfolge in der Kommissionierung sind:

- First Come – First Serve (FCFS)
- Frühester-Liefertermin-Regel (FLT-Regel)
- Größte-Gesamtbearbeitungszeit-Regel (GGB-Regel)
- Kleinste-Gesamtbearbeitungszeit-Regel (KGB-Regel)
- minimale Anzahl der Bearbeitungsschritte
- maximale Anzahl der Bearbeitungsschritte
- Kundenauftragspriorität
(Aufträge besonderer Kunden erhalten die höchste Priorität.)
- Terminüberschreitungs-Regel
(Der Auftrag, der die weiteste Terminüberschreitung hat, wird zuerst bearbeitet.)
- größte Anzahl gemeinsamer Artikel
(Der Auftrag mit der größten Anzahl übereinstimmender Artikel mit der bestehenden Auftragsgruppe wird hinzugefügt.)

Neben den Prioritätsregeln können auch rein zufallsgesteuerte Verfahren, wie die Monte-Carlo-Strategie und der Random Walk, angewendet werden. Die Monte-Carlo-Strategie erzeugt mehrere Lösungen des Problems. Findet sich dabei eine bessere Lösung als die vorher festgehaltene, so wird diese übernommen. Andernfalls wird die bis dahin beste Lösung beibehalten. Eine Bewegung in kleinen Schritten durch den Lösungsraum führt der Random Walk durch. Eine neue Lösung wird

durch zufällige Abwandlung der zuletzt betrachteten ermittelt. Die beste auf diesem Weg ermittelte Lösung wird übernommen. Ein Abbruchkriterium ist bei beiden Verfahren die im Vorfeld definierte Anzahl der zufällig erzeugten Lösungen ([GOL89], [tHS08]).

Diese zufallsgesteuerten Verfahren erfordern einen vergleichsweise geringen Rechenaufwand zur Erzeugung einer Lösung. Die Abweichung des erzielten Lösungswerts im Vergleich zum Optimum ist jedoch meist sehr hoch. In den letzten Jahren haben auch zahlreiche naturanaloge Heuristiken bewiesen, dass sie mit einem relativ geringen Rechenaufwand eine sehr gute Näherungslösung erzeugen. Heuristiken (griechisch heuriskein = finden) sind Suchmethoden, die auf die Problemstellung speziell zugeschnitten sind und anhand bestimmter Vorgehensregeln eine Lösung ermitteln. Das zu lösende Problem steht bei heuristischen Verfahren im Mittelpunkt [DOM97].

Optimierungsverfahren, die an Prozessabläufe der Natur angelehnt sind, können in zwei Untergruppen gegliedert werden: die chemisch/physikalischen und die biologischen Optimierungsverfahren. Zu den chemisch/physikalischen Verfahren zählen unter anderen das Simulated Annealing, der Threshold-Algorithmus, der Sintflut-Algorithmus und das Record-to-Record Travel. Eine neue Lösung wird bei diesen Verfahren ebenfalls durch eine kleine, zufällige Änderung der vorherigen Lösung ermittelt. Anhand vorher festgelegter Kriterien wird entschieden, welche der beiden Lösungen als neue Ausgangslösung gewählt wird. Dabei kann zeitweise eine schlechtere Lösung akzeptiert werden, um die Möglichkeit zu gewährleisten, lokale Optima zu verlassen. Zur Gruppe der biologischen Optimierungsverfahren gehört die Klasse der Evolutionären Algorithmen. Sie sind an die Gesetzmäßigkeiten der Evolutionstheorie nach Charles Darwin angelehnt. Dabei erfolgt aus einer Menge von Lösungen mittels eines Evolutionsprozesses eine natürliche Auslese. Die genetischen Algorithmen, die Evolutionsstrategien, die Evolutionäre Programmierung, die Classifier Systems und die genetische Programmierung gehören zu dieser Klasse. Das wichtigste und sehr häufig eingesetzte Verfahren zur Auftragsreihenfolgebildung aus dieser Gruppe ist der genetische Algorithmus. Für ein vertiefendes Studium der naturanalogen Optimierungsverfahren sei an dieser Stelle auf [GOL89] verwiesen.

Die mittels der oben genannten Eröffnungsverfahren entwickelte Lösung kann in einem weiteren Schritt mittels rekursiver Verbesserungsverfahren weiter optimiert werden. Ein bekannte Methode ist das r-opt-Verbesserungsverfahren. Die durch ein Eröffnungsverfahren ermittelte Lösung wird dabei durch Vertauschen von r Aufträgen verändert. Liefert die neue Lösung eine bessere Zielerfüllung, wird diese ausgewählt und es werden abermals r verschiedene Aufträge getauscht. Die Anzahl der Iterationsschritte wird im Vorfeld festgelegt.

Neben den hier aufgeführten Optimierungsverfahren existiert noch eine Vielzahl weiterer Lösungsalgorithmen. Zudem ist die Optimierung von Reihenfolgeproblemen nicht nur Gegenstand in der Optimierung von Kommissioniersystemen sondern auch eine Fragestellung in zahlreichen anderen logistischen Bereichen, wie z. B. bei der Erstellung von Produktionsplänen oder Transportaufträgen. Eine ausführliche

Betrachtung von Reihenfolgeproblemen wird in [DOM97], [GOL89] und [JEH99] vorgenommen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass Auftragsdisposition und Auftrags-einlastungsreihenfolge abhängig von vielen, meist voneinander unabhängigen Kri-terien sind. Sie folgen dem Layout ebenso wie den branchenspezifischen Vorgaben und sind hoch individuell. Es gibt daher keine allgemeingültigen Regeln. Zumeist finden Heuristiken Anwendung, die sehr spezifisch auf den jeweiligen Einsatzfall zugeschnitten sind.

6.1.4 Optimierungspotenziale in zweistufigen Kommissioniersystemen

In zweistufigen Kommissioniersystemen werden Aufträge zu sogenannten Batches zusammengefasst und als Gruppe in das System eingelastet. Um einen problemlosen Ablauf innerhalb des Systems zu garantieren, müssen im Bereich der Auftragsdis-position zunächst vorbereitende Maßnahmen getroffen werden. Neben der Bildung von Kommissionerbatches und der Festlegung der Steuerungsstrategien werden das Planungsverfahren, die Freigabezeitpunkte und die Batchgröße parametriert. Durch eine geeignete Kombination aller Strategieparameter kann eine hohe Systemleistung realisiert werden. Da die Wahl der Batchsteuerungsstrategie das Vorgehen bei der Batchbildung beeinflussen kann, werden hier zunächst die unterschiedlichen Steue-rungsformen, mögliche Freigabezeitpunkte und Anhaltspunkte für die Batchgröße vorgestellt.

Formen der Batchsteuerung

Wird ein Kommissioniersystem batchorientiert betrieben, so bestehen drei Möglich-keiten zur Steuerung des Auftragsstroms durch das System (Abb. 6.7).

Zum einen können Aufträge in festen Batches (engl. Fixed Batch) durch das Sys-tem geleitet werden. Das Folgebatch wird erst freigegeben, wenn das Kommissio-nier- und das Sortiersystem vollständig geleert sind. Zwischen den Batches kommt es so zu einer Leerlaufzeit, die auch als Batchwechselzeit bezeichnet wird (Abb. 6.7). Innerhalb dieser Zeitspanne wird das Kommissioniersystem zeitweise gar nicht und das Sortiersystem nicht vollständig beansprucht. Die Batchgröße ist bei dieser Form der Batchsteuerung ein fester Parameter. Die Anzahl der Aufträge in einem Batch kann auf zwei Arten bestimmt werden:

- mengenabhängig: eine fest definierte Anzahl an Sortieraufträgen im Batch
- zeitabhängig: Die Aufträge, die nach Durchlaufen einer festgelegten Zeitspanne (z. B. 2 Stunden) eingegangen sind, werden erst im nächsten Batch berücksichtigt.

Die Anzahl der Aufträge in einem Batch orientiert sich grundsätzlich an der Anzahl der Endstellen des Sorters. Im einfachsten Fall entspricht die Anzahl der Aufträge

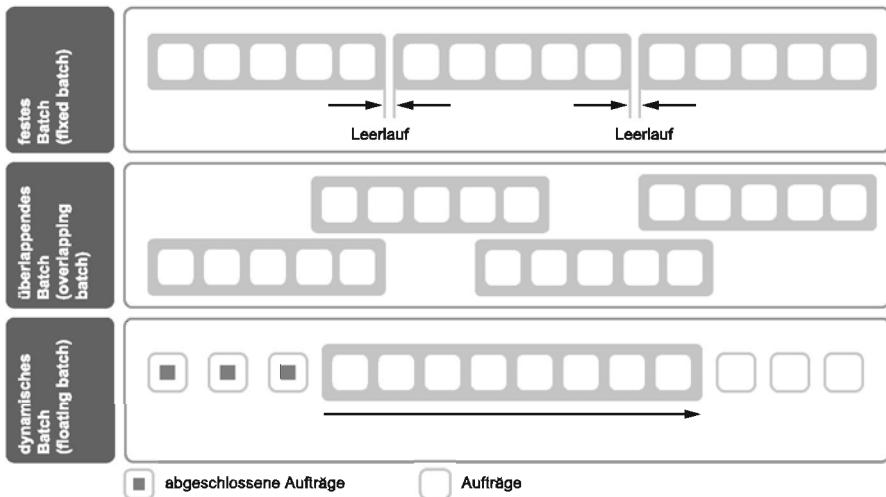


Abb. 6.7 Formen der Batchsteuerung

der Endstellenanzahl des Sorters. Diese kann aber auch über- oder unterschritten werden. Eine Überschreitung der Endstellenanzahl führt zu einer Mehrfachbelegung der Endstellen innerhalb der Batchlaufzeit. Zum einen kann eine zeitgleiche Belegung einer Endstelle durch mehrere Aufträge erfolgen. Dies bedarf allerdings einer weiteren manuellen oder automatischen Sortierung. Zum anderen können Endstellen nacheinander belegt werden. Die Teile eines Auftrags rezirkulieren dann notfalls so lange auf dem Sorter, bis eine Endstelle geleert wurde und der vorherige Auftrag fertiggestellt wurde. Eine Alternative dazu sind Bachtrennkappen in einer Endstelle. Ist eine Endstelle bereits mit einem vollständig abgearbeiteten Kundenauftrag belegt, kann die Bachtrennkappe zum Einsatz kommen und ein weiterer Kundenauftrag eingeschleust werden. Um ein Überlaufen des Sorters zu vermeiden, ist eine Überschreitung der Endstellenanzahl jedoch nur begrenzt möglich.

Wird dieser Richtwert (Endstellenanzahl) unterschritten, kann die Freigabe des Folgebatches früher erfolgen. Dies ist bei einer Batchsteuerung mittels überlappender Batches (engl. Overlapped Batch) sinnvoll. Diese Strategie wird auch zur Verringerung der Leerlaufzeiten zwischen zwei festen Batches und zur Erhöhung des Systemdurchsatzes eingesetzt.

Die Batchgröße ist beim überlappenden Batch ebenfalls ein fixer Parameter. Der wesentliche Unterschied zum Fixed Batch ist der Zeitpunkt der Batchfreigabe. Der Freigabezeitpunkt kann anhand unterschiedlicher Kriterien gewählt werden. Möglichkeiten der Batchfreigabe auf dem Sorter nach [RAD00] sind:

- Eine Mindestanzahl freier Endstellen ist vorhanden. Zusätzlich sind das Kommissioniersystem und der Sorter vollständig geleert.
- Eine Mindestanzahl freier Endstellen ist vorhanden. Auf dem Sorter befinden sich noch Auftragspositionen, das Kommissioniersystem wurde vollständig durchlaufen.
- Das erste Teil des Folgebatches folgt unmittelbar auf das letzte Teil des Vorgängerbatches.

Für das Kommissioniersystem bestehen analog mehrere Möglichkeiten der Batchfreigabe. Zum einen kann das nächste Batch freigegeben werden, sobald das vorherige Batch komplett in beiden Systemen bearbeitet wurde. Zum anderen besteht die Möglichkeit der Batchfreigabe, wenn das Vorgängerbatch im Kommissioniersystem fertiggestellt wurde und im Sorterbereich eine Mindestanzahl freier Endstellen vorhanden sind. Ebenfalls kann das erste Teil des Folgebatches direkt nach dem letzten Teil des Vorgängerbatches kommissioniert werden.

Die beiden bereits vorgestellten Strategien arbeiten nach dem Push-Prinzip. Die Batches werden dabei schubweise in das zweistufige System eingelastet. Im Gegensatz dazu findet beim dynamischen Batch (engl. Floating-Batch) eine Umkehrung vom Push- zum Pullsystem statt. Jede geleerte Endstelle zieht einen Folgeauftrag aus dem wartenden Auftragspool in das System. Durch das schubweise Einspielen neuer Batches kommt es sowohl beim Fixed Batch als auch beim überlappenden Batch zu einer ungleichmäßigen Auslastung sowohl im Kommissionier- als auch im Sorterbereich. Es treten Spitzenlasten auf, auf die das System ausgelegt werden muss.

In Abb. 6.8 sind typische Batchverläufe der verschiedenen Steuerungsstrategien vereinfacht dargestellt. Die Anzahl aktiver, d. h. belegter Endstellen steigt in der Anlaufphase des Batches zunächst langsam an, bis die maximale Anzahl belegbarer Endstellen erreicht wurde. Zum Ende eines Batches sinkt die Anzahl aktiver Endstellen wieder langsam. Bei einer Fixed-Batch-Steuerung liegt zwischen der Auslaufphase des Vorgängerbatches und der Anlaufphase des Folgebatches eine Batchwechselzeit. Diese Zeit entsteht aufgrund der Bearbeitung von Fehllesungen und Überhängen infolge von Fehlkommissionierung. Ebenso beinhaltet die Batchwechselzeit die Zeitspanne, die das erste Teil eines neuen Batches von der Kommissionierung bis zur Sortierung benötigt. Bei der Overlapped-Batch-Strategie entfällt die Batchwechselzeit aufgrund einer früheren Batchfreigabe.

Durch den Einsatz einer dynamischen Batchstrategie wird eine gleichmäßige Auslastung von Kommissionier- und Sortiersystem erreicht, da die uneffizienten Anlauf- und Auslaufphasen mehrerer Batches entfallen (Abb. 6.8). Die Batchgröße als fixer Parameter wird bei dieser Variante aufgelöst. Zu Beginn wird ein Startbatch eingespielt. Die Anzahl der Aufträge in diesem Batch orientiert sich an der Anzahl Endstellen des Sorters. Die Freigabe der zu bearbeitenden Aufträge kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Entweder wird ein neuer Auftrag in das Batch aufgenommen, sobald eine Endstelle geleert, d. h. ein Auftrag fertiggestellt wurde, oder ein ganzer Auftragspulk wird freigegeben, wenn die entsprechende Anzahl Endstellen zur Verfügung steht. Im Kommissioniersystem wird dabei ein sich „ständig ergänzender Auftragstapel“ [JÜS99] abgearbeitet (Abb. 6.7). Als Voraussetzung

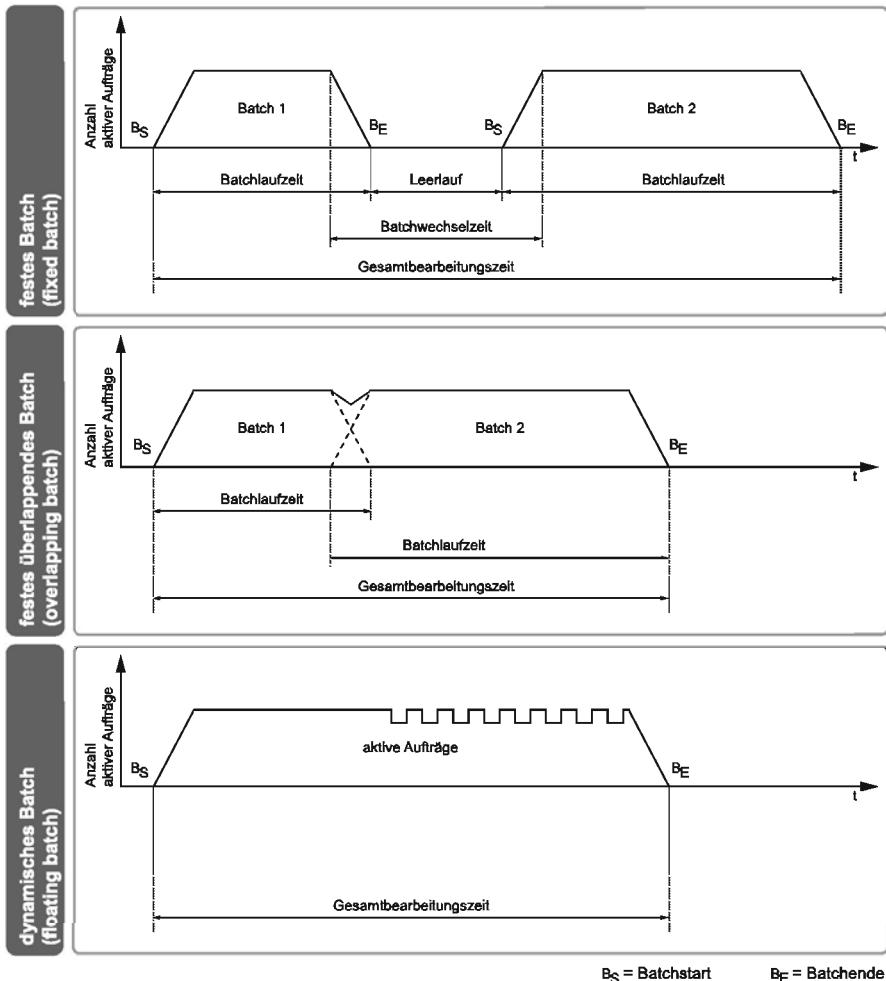


Abb. 6.8 Typische Batchverläufe nach [OTT06]

für diese Strategie müssen Kommissionier- und Sortiersystem direkt miteinander gekoppelt werden, um den ständigen Informationsaustausch zwischen beiden Systemen zu garantieren. Dies erfordert einen erhöhten Steuerungsaufwand, den entsprechende Online-Systeme gewährleisten. Die Übermittlung der Entnahmefreigaben des nächsten Auftrags kann dann durch Auslösung der Endstellenfreigabe angestoßen werden.

Die Bildung von Auftragsreihenfolgen innerhalb eines Batches wird durch die Auswahl des Schedulingverfahrens, anhand dessen die Aufträge in ein Batch aufgenommen werden, beeinflusst. Aus diesem Grund werden zunächst die verschiedenen Schedulingverfahren vorgestellt.

Tabelle 6.2 Einteilung der Scheduling-Methoden

Die Terminplanung (engl. Scheduling) eines zweistufigen Kommissioniersystems legt fest, inwieweit eintreffende Ereignisse bei der Batchbildung berücksichtigt werden. Ein Ereignis kann beispielsweise ein neu eintreffender Auftrag, ein Ressourcenausfall oder eine beendete Operation sein. Die Terminplanung ermittelt einen Ablaufplan (engl. Schedule), in dem die Reihenfolge der Aufträge und deren Freigabezeitpunkte hinterlegt sind. Beim Scheduling wird eine grundlegende Unterscheidung in Systemstatus und Auftragsstatus vorgenommen (Tabelle 6.2).

Wird ein System offline betrieben, so werden alle bis zu einem bestimmten Zeitpunkt eingetroffenen Aufträge in den Ablaufplan aufgenommen und in die Berechnung mit einbezogen. Der erstellte Ablaufplan wird im System in der berechneten Reihenfolge eingespeist und abgearbeitet. Es findet keine Neuberechnung des Ablaufplans aufgrund neu eintreffender Ereignisse statt. Im Gegensatz dazu können Systeme, die online betrieben werden, flexibler auf Änderungen reagieren, denn sobald ein Ereignis eintritt, erfolgt eine Neuberechnung des Ablaufplans. Während der Batchbildung eintreffende Eilaufträge können eingeplant werden. Ebenso können bei einem Maschinenausfall Fertigstellungszeitpunkte angepasst werden.

Die vorhandenen Auftragsinformationen zu Beginn des Scheduling sind ein weiteres wichtiges Unterscheidungskriterium. Sind alle erforderlichen Informationen für das nächste Batch bereits vor Beginn des Scheduling bekannt, so spricht man von einem statischen Auftragsstatus. Bei der dynamischen Sichtweise ist zu Beginn nur eine Teilmenge aller zu berücksichtigenden Aufträge vorhanden. Weitere Aufträge treffen erst im Laufe der Batchbildung ein [WAN95]. Die Entscheidung, welches Planungsverfahren letztendlich ausgewählt wird, muss systemabhängig getroffen werden.

Um eine effiziente Batchsteuerung zu gewährleisten, werden geeignete Aufträge ausgewählt und zu Kommissionierbatches zusammengefasst. Zur Bildung von Kommissionierbatches durchlaufen alle Aufträge einen sogenannten Batchberechnungsalgorithmus.

Batchbildung

Ziel einer Batchbildung ist es, die für einen Kommissionierbereich relevanten Aufträge herauszufiltern, diese in eine optimale Reihenfolge zu bringen und sie dann

einem Kommissionierbatch zuzuordnen. Innerhalb des Batches kann eine weitere Sortierung erfolgen, so dass eine wegoptimale Kommissionierung ermöglicht wird. Grundsätzlich werden innerhalb einer Batchbildung folgende Vorgänge durchgeführt [RAD00]:

- *Aussonderung ungeeigneter Aufträge zur manuellen Kommissionierung*
- *Ausschluss oder Sonderbehandlung von Aufträgen, die aufgrund von Mindermengen nicht kommissioniert werden können*
- *Zusammenfassung von Einzelaufträgen zu größeren Sortieraufträgen*
- *Überprüfung der Einhaltung maximaler Auftragsgrößen unter Berücksichtigung der Endstellenkapazität*
- *Einhaltung der maximalen Anzahl an Aufträgen für einen Sortierlauf*
- *gleichmäßige Auslastung der Kommissionierbereiche*
- *Optimierung der Bewegungsabläufe im Kommissioniersystem*

Ein detailliertes Vorgehen einer Batchbildung ist in Abb. 6.9 anhand eines Ablaufdiagramms beispielhaft dargestellt und wird im Folgenden näher erläutert.

Die im Unternehmen eingehenden Kundenaufträge gelangen über das ERP-System (Enterprise Resource Planning System) in die Auftragsdisposition. Dort erfolgt eine Aufbereitung der externen Kundenaufträge zu internen Kommissionierungsaufträgen, indem für die Kommissionierung relevante Daten ergänzt und unwichtige Daten entfernt werden. Diese Kommissionieraufträge werden nun zu einem Batch zusammengefasst. Bei diesem Vorgang durchlaufen alle Aufträge einen bestimmten Algorithmus. Zunächst werden alle Aufträge in ein Hostsystem übernommen und zu Beginn des Algorithmus auf einen möglichen Sonderfall hin überprüft.

Sonderfälle können beispielsweise Gefahrgut- oder Exportaufträge sein, da hier bestimmte gesetzliche Vorschriften eingehalten werden müssen und somit ein gezielter Ablauf erforderlich ist. Darauf folgt eine Aufspaltung der Ein- und Mehr-Positionsaufträge. Mehrere Ein-Positionsaufträge werden zu einem größeren fiktiven Kundenauftrag zusammengefasst und einer einzigen Endstelle zugewiesen, sofern sie die Endstellenkapazität des Sorters nicht überschreiten. Dadurch wird eine effizientere Nutzung der Endstellen des Sorters gewährleistet.

Im Anschluss an die Separierung der Aufträge aufgrund ihrer Positionszahl werden nun die Lagerorte der einzelnen Artikel und die erforderliche Behälterzahl ermittelt. Ebenso kann jetzt die erforderliche Gesamtbearbeitungszeit pro Auftrag berechnet werden. Sie setzt sich aus verschiedenen Operationen, z. B. der Kommissionierzeit, der Zeit für die Bereitstellung der Kommissionierbehälter, der Pufferung zwischen Kommissionier- und Sortiersystem und der Bereitstellung des Artikels am Warenausgang, zusammen [tHS08]. Nachdem diese Schritte durchgeführt wurden, werden alle vorhandenen Aufträge, auch die vorher aussortierten Ein-Positionsaufträge, wieder zusammengeführt, damit eine Bildung der Einlagerungsreihenfolge der Kommissionieraufträge in das System erfolgen kann. Diese Reihenfolge lässt sich durch zahlreiche Verfahren optimieren (vgl. Kap. 6.1.3). Je nachdem, welche Batchsteuerungsform im vorliegenden System eingesetzt wurde (s. o.), ist eine Ermittlung von sogenannten Zeitscheiben der Batches notwendig. Eine Zeitscheibe entspricht der Batchlaufzeit, also der Zeit, die ein Batch bis zur

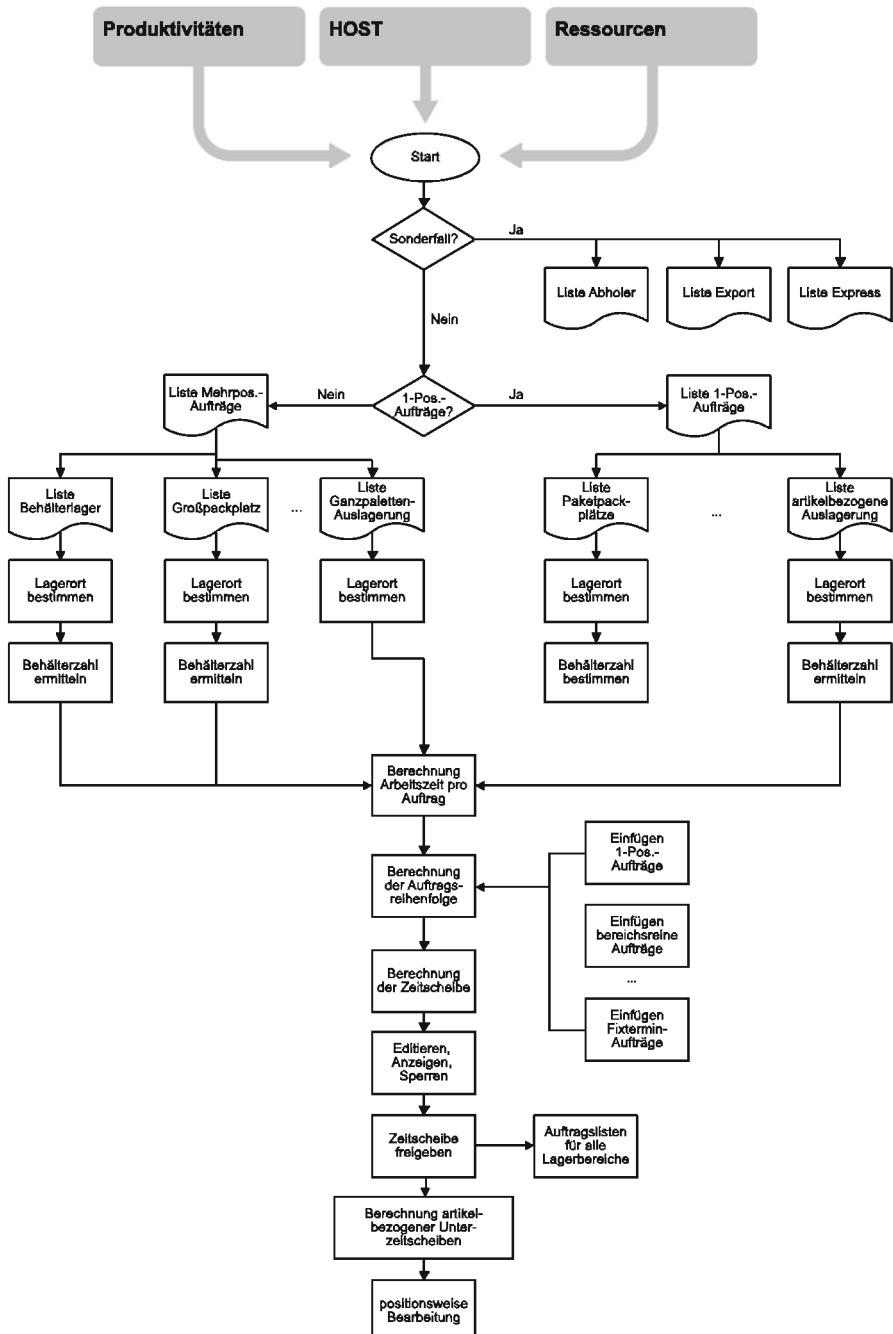


Abb. 6.9 Beispielhafter Ablauf einer Batchberechnung nach [tHO99]

Fertigstellung beansprucht. Die Batchlaufzeit darf einen gewissen Zeitrahmen nicht überschreiten, um Verspätungen von Auslieferungen zu vermeiden. Dieses Vorgehen wird auch als deterministischer Materialfluss bezeichnet, da aufgrund der Ermittlung von Zeitscheiben eine Vorausberechnung bzw. Vorplanung ermöglicht wird. Des Weiteren müssen die anfallenden Operationen noch den Ressourcen im Kommissionierlager zugeordnet werden. Eine Ressource kann dabei eine Zone des Kommissionierlagers oder ein Kommissionierer sein. Die einer Ressource zugewiesenen Operationen können nochmals lokal optimiert werden, so dass eine wegoptimale Kommissionierung der Artikel ermöglicht wird [THO99]. Nach erfolgreicher Batchbildung kann dieses freigegeben und abgearbeitet werden.

6.2 Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung

Kommissionierqualität ist die „Eignung des Kommissionierprozesses, die vom Kunden geforderte Leistung zu erfüllen“. Dies ist der Fall, wenn das richtige Objekt in der richtigen Menge im richtigen Zustand zur richtigen Zeit vorliegt. Ob die vorgegebene Zeit eingehalten werden kann, hängt u. a. von folgenden Faktoren ab:

- Einlastung und Freigabe von Kommissionieraufträgen
- rechtzeitige Bereitstellung der Waren am Pickplatz

Die rechtzeitige Bereitstellung kann durch eine intelligente Nachschubsteuerung erreicht werden. Durch diese Art der Steuerung wird eine permanente Warenverfügbarkeit gewährleistet. Die Einlastung und Freigabe der Kommissionieraufträge muss auf der dispositiven Ebene erfolgen. Nur wenn ein freigegebener Auftrag vorliegt, kann dieser auch kommissioniert werden.

Grundsätzlich gelten in allen Branchen und für alle Kunden die gleichen Qualitätsanforderungen. Die Folgen eines Fehlers in der Kommissionierung können jedoch je nach Produkt variieren. Zustandsfehler wirken sich bei hochwertigen Produkten stärker aus als bei geringerwertigen Gütern, da die Behebung des Fehlers wesentlich kostenintensiver ist.

Zur Fehlerreduzierung bzw. zur Fehlervermeidung existieren verschiedene Maßnahmen, von denen im Folgenden thematisch eine Auswahl vorgestellt wird.

Ablauforganisation In großen Systemen ist es oft sinnvoll, dass der Kommissionierer in einer parallelen Arbeitsweise nur Teile der Aufträge bearbeitet. Bei der späteren Zusammenführung aller Auftragsteile können Mengen- oder Auslassungsfehler entstehen. An dieser Stelle sind Maßnahmen zu integrieren, um resultierende Fehler frühzeitig zu erkennen und zu reduzieren.

Beleggestaltung Durch die übersichtliche Strukturierung von Belegen (Picklisten) lassen sich Kommissionierfehler vermeiden. Merkmale strukturierter Belege sind:

- Beleg ist grafisch nach Position geordnet.
- Beleg hat ausreichend große Schriftart.
- Beleg enthält keine unnötigen Informationen.
- Es sind keine Umrechnungen erforderlich, wie z. B. die Errechnung der Entnahmemenge aus der angegebenen Stückzahl.

Lagerortkennzeichnung Nicht nur eine übersichtliche Gestaltung der Pickliste, sondern auch eine strukturierte Lagerplatzkennzeichnung in Form von eindeutigen Bezeichnungen des Regals, der Ebene und des Bereitstellorts (Fach) erleichtert das Auffinden der Entnahmorte.

Informationsbereitstellung An dieser Stelle kann auf die bereits vorgestellten Verfahren zur Kommissioniererführung mit den genannten Vor- und Nachteilen verwiesen werden. Abhängig von der Kommissionieraufgabe sind im Zusammenhang mit der Informationsbereitstellung geeignete technische Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Reduzierung von Kommissionierfehlern zu wählen.

Quittieren der Entnahme Kommissionierfehler lassen sich reduzieren, indem vom Mitarbeiter bestimmte Entnahmebestätigungen wie das Abhaken oder Scannen der Position auf der Pickliste, oder das Bestätigen der Entnahme durch Betätigen einer Kontrolltaste gefordert werden. Bei Pick-by-light-Systemen ist speziell darauf zu achten, dass die Kontrolltaste nach dem Entnahmevergäng betätigt wird, da durch vorheriges Bestätigen ein hohes Verzährlrisiko entsteht und so Mengenfehler auftreten können.

Personalauswahl Ausreichend geschulte Mitarbeiter erbringen in der Regel bessere Leistungen, machen weniger Fehler und arbeiten motivierter. Eine Stärkung des Qualitätsbewusstseins trägt darüber hinaus zu besseren Kommissionierergebnissen bei.

Ausreichend lange Einarbeitungszeit Die Einarbeitungszeit eines Kommissioniers sollte ausreichend lange bemessen sein, bevor er eigenständig Aufträge bearbeitet. Fehler, die aufgrund mangelnder Systemkenntnisse neuer Kommissionierer entstehen, können dadurch vermieden werden.

Ergebnisabhängige Leistungs- und Qualitätsvergütung Durch eine eindeutige Zuordnung der bearbeiteten Aufträge zu den Kommissionierern kann die Fehlerentstehung besser zurückverfolgt werden. In der Praxis verspricht die Distanzierung von der anonymen Qualitäts- und Leistungskontrolle gute Erfolge.

Regelmäßige Schulung Im Zuge der zuvor genannten Maßnahmen lassen sich Mitarbeiter mit hohen Fehlerraten identifizieren und schulen.

6.3 Ergonomische Gestaltung

Eine Optimierung im Bereich der Kommissionierung kann nicht nur durch Anwendung der bereits in den vorherigen Abschnitten aufgeführten Betriebsstrategien erreicht werden, vielmehr können auch durch die Gestaltung der Kommissionierarbeitsplätze unter ergonomischen Gesichtspunkten Verbesserungspotenziale aus-

geschöpft werden. Der Prozess der Kommissionierung wird in vielen Fällen manuell durchgeführt und lässt sich nicht immer sinnvoll automatisieren. Eine gezielte ergonomische Gestaltung des Arbeitsplatzes führt zu einer Leistungssteigerung der Mitarbeiter und sichert gleichzeitig die Qualitätsanforderungen in der Kommissionierung. Denn das Auftreten von Ermüdungserscheinungen wird verringert, eine hohe Konzentration gewährleistet und der Arbeitsfluss aufrecht erhalten. Ergebnis ist eine konstante, gleichmäßig hohe Kommissionierleistung jedes einzelnen Kommissionierers.

6.3.1 Grundlagen der Ergonomie

Der Begriff Ergonomie setzt sich aus den griechischen Wörtern *ergon* = Arbeit bzw. Werk und *nomos* = Gesetz bzw. Regel zusammen. Die Ergonomie ist ein Teilgebiet der Arbeitswissenschaft, die sich laut DIN 6385 mit dem Verständnis der Wechselwirkung zwischen den menschlichen Faktoren und allen anderen Bestandteilen eines Systems befasst. Ziel ist es, das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren [DIN 6385].

Im Mittelpunkt der Betrachtung steht demzufolge der Mensch. Er wird hierbei als Teilsystem des gesamten Arbeitssystems verstanden, analysiert und beschrieben. Die Ergonomie untersucht das dynamische und statische Verhalten unter Arbeitsbedingungen im Hinblick auf die optimale Anpassung zwischen Mensch und Arbeit. Auch eine humane Arbeitsgestaltung und der Schutz der Psyche zählen zu diesem Aufgabengebiet. Die Betrachtung richtet sich sowohl auf den Arbeitsplatz als auch auf die Arbeitsabläufe. Die Grundlage zur ergonomischen Gestaltung von Arbeitsplätzen bildet die Anthropometrie. Sie vermittelt Kenntnisse über die menschlichen Körpermaße und ihre Variabilität, die bei der Planung von Maschinen berücksichtigt werden sollten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergonomie sich vor allem mit der dem Menschen angepassten Gestaltung des Arbeitsplatzes beschäftigt. Dabei stehen nicht nur die technischen Geräte und der Umgang mit ihnen im Blickpunkt, sondern auch Raumklima, akustische Gegebenheiten und Lichtverhältnisse. Für die Anpassung des Arbeitsplatzes sind im wesentlichen drei Kriterien Grundlage der Betrachtung: Zum einen müssen die individuellen Leistungsgrenzen beachtet werden, zum anderen müssen gesundheitsschädigende Belastungen vermieden werden. Darüber hinaus muss eine fähigkeitsgerechte Anforderung vorliegen und Überforderung vermieden werden.

Arbeitsbelastung

Die Bearbeitung eines Kommissionierauftrags stellt an den Kommissionierer äußere Anforderungen, die sich in Abhängigkeit von den gegebenen Arbeitsbedingungen zu einer Belastung auswirken können. Die Arbeitsaufgabe (z. B. Stückliste lesen),

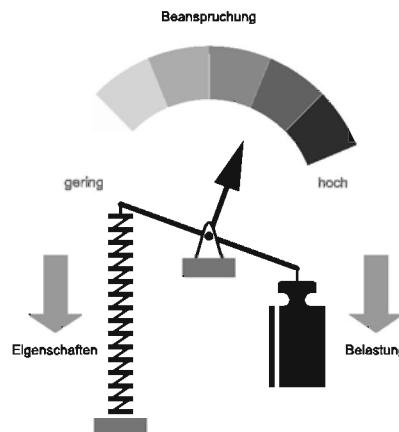


Abb. 6.10 Mechanisches Modell der Belastung und Beanspruchung nach [REF97]

die Arbeitsorganisation (z. B. die Interaktion zwischen Mensch und Betriebsmittel) und die Arbeitsumgebung (z. B. Licht, Klima) werden als äußere Faktoren bezeichnet und bestimmen die Höhe der einwirkenden Belastung [MAG05].

Nach DIN 6385 wird unter Arbeitsbelastung die Gesamtheit der äußeren Bedingungen und Anforderungen im Arbeitssystem, die auf den physiologischen und/oder psychologischen Zustand einer Person einwirken, verstanden [DIN 6385]. Um die Belastung quantitativ in ihrer Intensität und Dauer zu erfassen, werden die Begriffe Belastungshöhe und Belastungsdauer verwendet. Die tatsächliche Belastung eines Kommissionierers ergibt sich beispielsweise aus der Zeitspanne (Belastungsdauer), in der er eine bestimmte Last (Belastungshöhe) bewegen muss.

Die Beanspruchung ist als Folge der Belastung zu sehen und ist abhängig von den individuellen Eigenschaften des Kommissionierers. Das heißt, gleiche Belastung führt bei verschiedenen Menschen zu einer unterschiedlichen Beanspruchung. In Abb. 6.10 ist dieser Zusammenhang schematisch dargestellt. Das Mechanische Modell der Belastung und Beanspruchung verdeutlicht nochmals den Wirkzusammenhang zwischen der Höhe der Belastung und den individuellen Eigenschaften. Bei hoher Belastung in Kombination mit schwachen Eigenschaften, wie ein hohes Alter, schlechter Trainingszustand oder schlechte Bewältigungsmöglichkeit von Stress, ergibt sich eine hohe Beanspruchung.

Generell werden mehrere Belastungsarten unterschieden. Dazu zählen die energetische Belastung, die informatorische Belastung, die psychische Belastung und Belastungen, die aufgrund von Umgebungseinflüssen entstehen.

Energetische Belastung Die energetische Belastung wirkt hauptsächlich auf die Skelettmuskulatur. Daraus resultierend kommt es zu Belastungen des Herz-Kreislauf-Systems, der Muskeln und des Stoffwechsels. Die energetische Belastung lässt sich demnach in drei Untergruppen gliedern:

- die Muskelbelastung,
- die Herz-Kreislauf-Belastung und
- die biomechanische Belastung.

Muskelbelastung entsteht durch die Erzeugung von Kräften zur Durchführung einer Tätigkeit. Herz-Kreislauf-Belastungen hingegen lassen sich auf den Energiebedarf der Muskeln zurückführen. Bei der Erzeugung von inneren (z. B. Gewicht eines Arms) und äußeren Kräften (z. B. Gewicht eines Pakets) und bei der Durchführung von Arbeitsaufgaben entstehen biomechanische Belastungen [MAG05]. Allgemein kann festgehalten werden, dass in manuellen Kommissioniersystemen hauptsächlich energetische Belastungen vorherrschen, die durch Lasthandhabungsvorgänge hervorgerufen werden. Es wird hierbei zwischen zwei Hauptbelastungen unterschieden: das Gehen mit/ohne Last und die Lasthandhabung. Einflussgrößen, die in diesem Zusammenhang relevant sind, sind u. a. das Lastgewicht, die Greifhöhe, die Greifentfernung, die Hubbhöhe, das Volumen der Artikel und die Körperfrehung bei Lasthandhabung [MAG05].

Informatorische Belastung Durch die allgemeine Aufnahme, Verarbeitung und Abgabe von Informationen kommt es zu sogenannten informatorischen Belastungen, die wiederum zur mentalen Ermüdung führen [SCH93a]. Diese Belastungsart kann weiterhin sowohl zu psychischen als auch zu physischen Belastungen der an der Informationsaufnahme beteiligten Sinnesorgane führen. Die Belastungshöhe ist in diesem Fall abhängig von der Gestaltung der informatorischen Arbeitsbedingung [LAU92]. Dies sind

- die Menge an Informationen in Abhängigkeit von der benötigten Zeit für die korrekte Ausführung der Arbeitsaufgabe,
- die zeitliche und räumlichen Gestaltung der Informationsbereitstellung,
- Nutzen und Wichtigkeit der Information und
- Inhalt und Bedeutung der Information.

In Kommissioniersystemen werden die Informationen vor allem visuell oder auditiv aufgenommen. Dadurch ergeben sich Belastungen, die durch folgende Eigenschaften hervorgerufen werden.

- Belastung durch Lese- und Identifikationsaufgaben
- schlechte Schriftqualität
- unzureichende Kontraste
- Belastung durch Steuerungsaufgaben
- ggf. Anfahren des Lagerplatzes/Abgabepunktes
- Reizarmut (Halbdunkel; Farbmonotonie)
- ggf. Feinpositionierung des Fahrzeugs

Informatorische Belastungen setzen die momentane mentale Leistungsfähigkeit herab und wirken sich langfristig auf die Motivation der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus. Um langfristige Schädigungen des Gesundheitszustands durch Stresssituationen zu vermeiden, sollten entsprechende Erholungsmöglichkeiten

geschaffen werden. Aufgrund fehlender quantifizierbarer Parameter für die mentale Beanspruchung, stellt sich die Messung dieser Belastung als äußerst schwierig dar [MAG05].

Psychische Belastung Als psychische Belastung wird die Gesamtheit aller erfassbaren Einflüsse, die von außen auf den Menschen zukommen und psychisch auf ihn einwirken, bezeichnet [DIN 10075-2]. Die psychische Belastung setzt sich aus individuellen, technischen, organisatorischen und sozialen Faktoren zusammen. Bei der ergonomischen Gestaltung von Kommissionierbereichen sollte insbesondere auf die Vermeidung bzw. die Reduzierung dieser Belastungen geachtet werden. Einflussfaktoren auf die Psyche von Mitarbeitern sind z. B.

- die Arbeitsaufgabe (z. B. Zeit- und Termindruck, Entscheidungsanforderungen ohne ausreichende Informationsgrundlage),
- die Umgebungseinflüsse (z. B. Lärm, mangelhafte ergonomische Verhältnisse, Licht),
- die betriebliche Organisation (z. B. strukturelle Veränderungen, unklare Kompetenzregelungen) und
- die sozialen Verhältnisse (z. B. schlechtes Betriebsklima, mangelnde Kommunikation).

Nach DIN 10075-2 können psychische Belastungen sowohl positive als auch negative Folgen haben. Positive Erscheinungen sind Trainings- und Lerneffekte sowie Aktivierungs- und Anregungseffekte. Formen psychischer Fehlbelastungen sind z. B. Stress, Monotonie, Ermüdung oder Konflikte am Arbeitsplatz [RIC97]. Lärm löst z. B. bei den betroffenen Kommissionierern Unbehagen und Unmut aus. Nicht selten führen diese Belastungen auch zu langfristigen Folgeschäden wie chronischen Erkrankungen [DIN 10075-2].

Belastungen durch Umgebungseinflüsse Eine weitere Belastungsart sind die Belastungen, die aufgrund von Umgebungseinflüssen entstehen. Auf den Menschen wirken aus seiner Arbeitsumgebung nach DIN 6385 vor allem physikalische und chemische, aber auch biologische Einflüsse. Kulturelle und soziale Faktoren sind ebenfalls Teil der Arbeitsumgebung und nehmen Einfluss auf den Menschen [DIN 6385].

Belastungen aus der Arbeitsumgebung, die unmittelbar Einfluss auf die physische Belastung haben, sind klimatische Belastungen wie beispielsweise Hitze oder Kälte. Wirken diese Belastungen über einen längeren Zeitraum auf den menschlichen Organismus ein, so können sie Herz-Kreislauf-Beschwerden hervorrufen und mindern damit die physische Leistungsfähigkeit. Eine andauernde Tätigkeit eines Kommissionierers im Tiefkühlbereich muss deshalb zwangsläufig nach zwei Arbeitsstunden für eine 15-minütige Aufwärmphase in normal temperierten Räumen unterbrochen werden, um die Leistungsfähigkeit aufrechtzuerhalten und Gesundheitsschäden vorzubeugen [DGU04].

Ebenfalls wirken sich Lärm und Schall negativ auf den menschlichen Organismus aus. Daher ist an Kommissionierarbeitsplätzen mit erhöhten Dezibelwer-

ten ein Gehörschutz unabdingbar. Laut Arbeitsstättenverordnung ist ab einer Überschreitung der Lautstärke von 85 dB ein Gehörschutz Pflicht [LVA07].

Außerdem können auch mechanische Schwingungen negative Auswirkungen auf den Menschen haben. Beim Warentransport mit Flurförderzeugen etwa sind die Mitarbeiter sogenannten mechanischen Ganzkörperschwingungen ausgesetzt.

Bei handgeführten Arbeitsmitteln wirken Hand-Arm-Schwingungen, die zu Belastungen führen können. Die Höhe der Belastung wird durch die Intensität und die Frequenz der Schwingung bestimmt. Dazu kommen Faktoren wie Schwingrichtung, die Einleitungsstelle und die Körperhaltung. Im Wirbelsäulenbereich treten hier die höchsten Schwingungseinflüsse auf. Zusätzlich kann auch die Körperhaltung eines Staplerfahrers im Kommissionierbereich die Belastungshöhe beeinflussen, z. B. ein verdrehter Oberkörper beim Rückwärtfahren.

Abschließend sind Gefahr- oder Schadstoffe als Umgebungsbelastungsfaktoren zu nennen. Zur Minimierung der Einwirkung dieser Belastungsfaktoren muss ein Mitarbeiter verschiedene Sicherheitsvorschriften im Umgang mit deklarierten Gefahrstoffen zwingend beachten.

Ein wichtiger Faktor zur Bestimmung der Belastung ist die sogenannte Expositonszeit. Sie beschreibt, wie häufig eine bestimmte Tätigkeit ausgeführt wird (täglich, wöchentlich oder während des kompletten Berufslebens). Zur Ermittlung der Gesamtbela stung innerhalb der Kommissionierung ist bislang jedoch kein einheitliches Verfahren bekannt. Aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen auf die Mitarbeiterbelastung bedarf es vieler Verfahren, um eine vollständige Untersuchung durchzuführen. Verschiedene Verfahren für unterschiedliche Belastungsarten werden in [MAG05] näher betrachtet.

Beanspruchung und Ermüdung

Eine Folge der einwirkenden Belastung ist die Beanspruchung. Als Beanspruchung wird die Wirkung der Belastung auf den Menschen bezeichnet. Gleiche Belastung führt durch die individuell unterschiedlichen Eigenschaften und Fähigkeiten bei jedem Menschen zu divergierenden Beanspruchungen [ROH84].

Nach DIN 6385 sind die Auswirkungen der Belastung im Organismus in Abhängigkeit von Eigenschaften und Fähigkeiten des Menschen als Beanspruchung definiert. Die Beanspruchung hängt nicht nur von der Belastungshöhe, sondern auch von Faktoren wie Alter, Konstitution sowie den individuellen Bewältigungsmöglichkeiten (Umgang mit Stress) ab [DIN 6385].

Die Beanspruchung lässt sich in physische und psychische Beanspruchung unterteilen. Physische Beanspruchungen sind z. B. auf folgende Belastungen zurückzuführen: das Ausüben von körperlich anstrengenden Tätigkeiten, ungünstige Umgebungsbelastungen sowie einseitige Körperbelastungen. Diese Belastungen haben eine direkte Auswirkung auf den Körper und können zu negativen Beanspruchungen im Bereich des Skelett-Muskel-Systems führen.

Das Resultat der bewussten oder unbewussten Verarbeitung der Belastung ist die psychische Beanspruchung [STA06]. Zu den psychischen Beanspruchungen zählen

sensorische Beanspruchungen der Sinnesorgane, mentale Beanspruchungen, die bei der geistigen Verknüpfung und Verarbeitung von Informationen entstehen, und emotionale Beanspruchungen, wie sie aus zwischenmenschlichen Sozialbeziehungen hervorgehen.

Eine Beanspruchung kann sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf den Menschen haben. Sie kann anregend und aktivierend, qualifizierend und persönlichkeitsentwickelnd wirken. Ziel der Arbeitsgestaltung ist demnach nicht nur die Verringerung der Beanspruchung, sondern die optimale Beanspruchung herzustellen, um die positiven Effekte zu nutzen.

Negative Beanspruchungen verringern die Leistungsfähigkeit und führen zur *Ermüdung*. Kurzfristige negative Beanspruchungen sind z. B. Monotonie, Stress und psychische Sättigung. Langfristig können sich daraus psychosomatische Erkrankungen entwickeln.

Von einer Ermüdung wird gesprochen, wenn eine reversible Herabsetzung der Funktionsfähigkeit infolge einer muskulären Tätigkeit zu beobachten ist. Quantitativ gibt es zwei Möglichkeiten, Ermüdung zu definieren [LEH53]:

- Abnahme der willkürlichen Kontraktionskraft des Muskels oder
- die erforderliche Erholzeit.

Ermüdung macht sich beispielsweise durch eine erhöhte Pulsfrequenz oder eine flachere Atmung des Mitarbeiters bemerkbar. Die Ermüdung kann ebenfalls in physische und psychische Ermüdung eingeteilt werden. Zur Messung von physischer Ermüdung gibt es zahlreiche Ansätze. Physiologische Ansätze messen die Herzfrequenz, Hauttemperatur, Augenbewegung, Lidschlagfrequenz oder den Blutdruck. Biochemische Methoden hingegen messen im Blut den Adrenalin-, Noradrenalin- oder Cortisolgehalt. Durch die gemessenen Veränderungen ergibt sich dabei ein Maß für die psychische Ermüdung. Eine Messung der psychischen Ermüdung hingegen ist aufgrund der subjektiven Wahrnehmung nur schwer möglich [GHN95].

Einer Ermüdung kann durch mehrere kurze Pausen entgegengewirkt werden. Diese gewährleisten ein effektives Arbeiten. Bei Bildschirmarbeitsplätzen in der Kommissionierung sind zu den eigentlichen Ruhepausen zusätzliche Arbeitsunterbrechungen einzulegen, da sich schon nach etwa 60 Minuten Sehschärfeminderungen und Farbsinnstörungen einstellen. Hier eignet sich eine Regenerationszeit von zehn Minuten. Mit zunehmender Arbeitsdauer erhöht sich auch die Regenerationszeit. Diese kann von 15 bis zu 35 Minuten bei vier Stunden durchgehender Arbeit am Bildschirm betragen [KÖC84].

6.3.2 Arbeitsplätze im Kommissionierungsbereich

Um Schwachstellen am Arbeitsplatz aus ergonomischer Sicht zu ermitteln, sind neben den einzuhaltenden Normen und Standards vor allem die Erfahrungen der Mitarbeiter essenziell. Die Nutzung dieses Wissens um Arbeitsaufgabe, Arbeitsablauf und Arbeitsbedingungen ist gerade für eine belastungsoptimierte Arbeitsgestaltung,

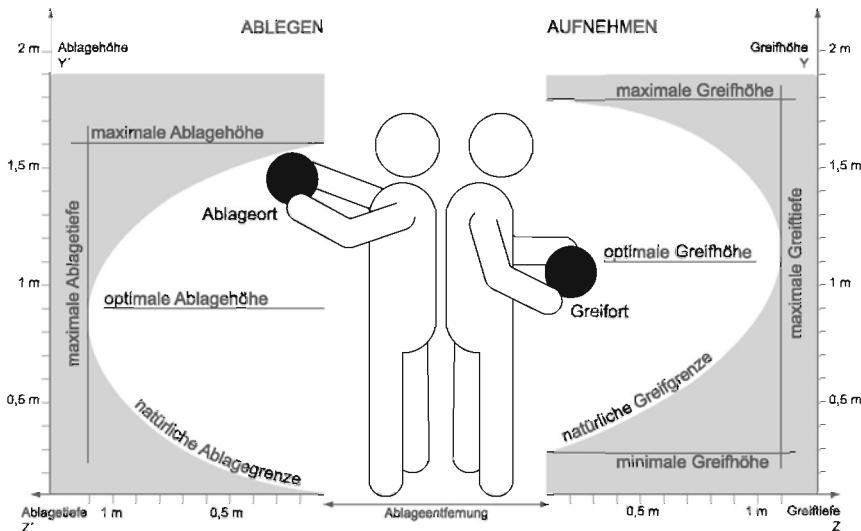


Abb. 6.11 Vertikaler Greifraum nach [GUD05]

für die Entwicklung von Verbesserungsvorschlägen und um Schwachstellen an den bestehenden Arbeitsplätzen aufzudecken wichtig [STA06].

Die Arbeitsplätze im Kommissionierbereich lassen sich grundsätzlich wieder nach den zwei gängigen Kommissionierprinzipien gliedern. Bei der ersten Variante bewegt sich der Kommissionierer von Bereitstellplatz zu Bereitstellplatz nach dem Person-zur-Ware-Prinzip. Sein Bewegungsradius kann dabei die gesamte Lagerfläche umfassen. Die zweite Variante zeichnet sich durch die Einschränkung des Bewegungsradius aus. Der Kommissionierer bewegt sich innerhalb eines begrenzten Radius. Die Bereitstelleinheiten werden zu ihm nach dem Ware-zur-Person-Prinzip transportiert.

Im Folgenden werden zunächst einige allgemeingültige Gestaltungsregeln für Kommissionierarbeitsplätze vorgestellt. Darauf folgend werden jeweils spezielle Regeln für Person-zur-Ware- und Ware-zur-Person-Kommissionierarbeitsplätze aufzeigt.

Allgemein muss bei der Gestaltung von Kommissionierarbeitsplätzen die Anthropometrie berücksichtigt werden. Werden bei der Arbeitsplatzgestaltung das sogenannte 5. und 95. Perzentil beachtet, ist dieser Arbeitsplatz für 90 % der Bevölkerung ausgelegt, denn nur 5 % der Bevölkerung sind kleiner bzw. größer als diese Maße. In Bezug auf die Körperhöhe liegt das 5. Perzentil der Frauen bei 151 cm, das 95. Perzentil der Männer bei 184 cm. Die Reichweite zum Greifen von Gegenständen liegt bei dem 5. Perzentil der Frauen bei 61,6 cm und das 95. Perzentil der Männer bei 78,7 cm [DIN 33402]. An einem ergonomisch geplanten Ar-

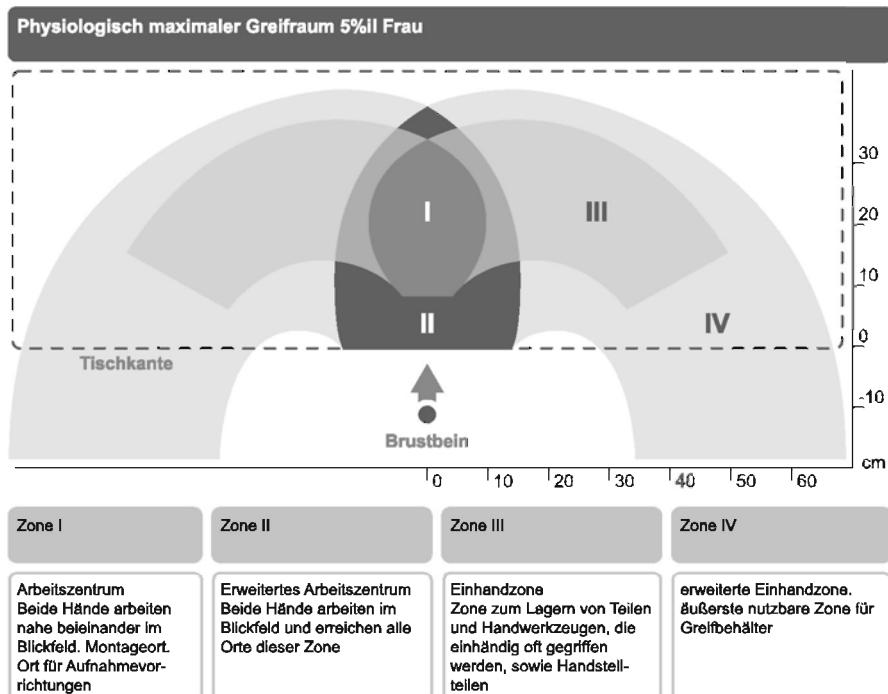


Abb. 6.12 Horizontaler Greifraum nach [HEI98] (Draufsicht)

beitsplatz können alle Arbeiten von Personen mit diesen Körpermaßen ausgeführt werden.

Nach physiologischer Überlegung sollten Greifhöhen über Schulterhöhe und unter der Knieebene vermieden werden, um überflüssige Belastungen zu vermeiden. In Ausnahmefällen können leichte, einfach zu greifende Güter auch in Kopfhöhe bereitgestellt werden. Eine Gegenüberstellung von Greifhöhe und Ablagehöhe ist in Abb. 6.11 für Personen mit einer Körpergröße von 170 bis 180 cm beispielhaft dargestellt. Die ideale Greifhöhe liegt demnach bei 110 cm, die ideale Ablagehöhe bei 90 cm. Der physiologisch maximale horizontale Greifraum einer Frau aus dem 5. Perzentil wird in Abb. 6.12 veranschaulicht. Dabei werden vier Zonen unterschieden. In den ersten beiden Zonen ist eine beidhändige Arbeitsbewegung möglich. Zone drei und vier sind Einhandzonen.

Neben dem Greifraum des Menschen ist in der Kommissionierung auch der Sehbereich zu berücksichtigen. Er wird durch die Kopfhaltung und die Blicklinie beeinflusst. Bei stehender, aufrechter Haltung ist die Blicklinie um einen Winkel von $\beta = 15^\circ$ nach oben oder unten gegen die Waagerechte geneigt. Informationen, die sich ober- bzw. unterhalb der Blicklinie befinden, können durch eine geneigte Anbringung leichter und schneller erkannt werden [VDI 3657].

Die Beleuchtung eines Kommissionierlagers ist ein weiterer allgemeiner Aspekt. Nach DIN 12464 sind für Lagerbereiche 300 Lux Beleuchtungsstärke vorgeschrieben.

ben [DIN 12464-1]. Aus physiologischer Sicht darf dieser Wert durchaus überschritten werden, denn durch die richtige Beleuchtung können eine höhere Leistungsbereitschaft, geringere Ermüdungserscheinungen, eine geringere Fehlerrate und weniger Arbeitsunfälle erzielt werden.

Person-zur-Ware-Kommissionierarbeitsplätze

Für die Bereitstellung der Güter existieren bei der Person-zur-Ware-Kommissionierung einige Gestaltungsregeln, die Beachtung finden sollten.

Die Bodenlagerung birgt bei einem sehr hohen Gewicht der Güter und häufig erforderlichen Bück-Bewegungen die Gefahr einer hohen physische Belastung für den Kommissionierer. Daher sollten in diesem Fall überwiegend ganze Ladeeinheiten mit Hilfe von Flurförderzeugen ausgelagert werden oder eine günstige Bereithöhe gewährleistet sein. Zur Entnahme einzelner Güter ist aus ergonomischer Sicht eine Regallagerung sinnvoll, da auf diese Weise eine Vielzahl von Artikeln im Bereich des natürlichen Greifraums angeordnet werden kann. Bei der Bereitstellung der Güter in Regalen ist außerdem darauf zu achten, dass entsprechende Gangbreiten von mindestens einem Meter eingehalten werden, um den Bewegungsablauf nicht einzuschränken und die Arbeitssicherheit zu gewährleisten. Entnahmen aus einer Überkopfhöhe sollten, wenn möglich, ebenfalls vermieden werden [HEW93].

Güter, die auf Europaletten bereitgestellt werden, können oftmals nur durch ungünstige Bewegungen erreicht werden. Die Abmessungen einer Europalette mit 1.200 mm x 800 mm ermöglichen bei einer Längseinlagerung nur schwer das Erreichen von Gütern im hinteren Bereich. Eine Greiftiefe von 1.200 mm liegt außerhalb des physiologisch maximalen Greifraums (vgl. Abb. 6.12). Eine Quereinlagerung wird aus ergonomischer Sicht empfohlen [HEW93].

Bei der Bereitstellung von Artikeln in Behältern sollte darauf geachtet werden, dass ein hindernisfreies Hineingreifen möglich ist und Inhalt und Füllgrad des Behälters für den Kommissionierer sichtbar sind. In Abb. 6.13 werden die Artikel in Durchlaufregalen bereitgestellt. Durch die Neigung der Behälter kann der Kommissionierer ungehindert hineinsehen und den entsprechenden Artikel entnehmen. In den Kommissionierbereichen mit statischer Artikelbereitstellung kommt es häufig zu unterschiedlichen Leuchtdichten. Untere Regalebenen sind teilweise nur schlecht ausgeleuchtet, und der Kommissionierer greift fast blind nach den Gütern, da die Greifzeit viel kürzer ist als die Zeit, die das Auge zur Anpassung an die wechselnden Lichtverhältnisse benötigt. Leicht zu verwechselnde Güter sollten daher nicht nebeneinander gelagert werden, um Fehler zu vermeiden [HEW93].

Die Informationsbereitstellung im manuellen Kommissionierbereich erfolgt vor allem durch die Kennzeichnung des Lagerplatzes. Grundsätzlich sollten im Regalbereich die Informationen auf ein Minimum reduziert sein. Dennoch muss das Gut ausreichend gekennzeichnet werden, damit der Kommissionierer auch aus einer Entfernung die Kennzeichnung noch gut erfassen kann. Neben dem Schutz vor Verschmutzung und Beschädigung ist auch auf einen ausreichenden Kontrast der Beschriftung zu achten. In den letzten Jahren haben sich insbesondere digita-



Abb. 6.13 Manuelle Kommissionierung [Foto: SSI Schäfer]

le Pick-by-light-Anzeigen als visuelles Hilfsmittel zur Kennzeichnung des Artikelstandorts durchgesetzt. Im gesamten Kommissionierungsbereich sollte ein einheitliches Kennzeichnungssystem initialisiert sein, um die Gewöhnungseigenschaft zu nutzen. Dies erleichtert die Einarbeitung sowie das Zurechtfinden und wirkt sich positiv auf die Psyche des Kommissionierers aus [HEW93].

Aus ablauforganisatorischer Sicht bieten sich ebenfalls einige Verbesserungsmöglichkeiten, um die Kommissionertätigkeit zu erleichtern. Schnelldreher sollten beispielsweise in zugangsfreien und grifffreundlichen Positionen bereitgestellt werden. Dabei muss eine kontinuierliche Strukturierung erfolgen, d. h. aktuellen Änderungen in der Zugriffshäufigkeit wird durch Neubelegungen Rechnung getragen [HEW93]. Das Gewicht der Güter darf ebenfalls nicht vernachlässigt werden. Güter mit höherem Gewicht sollten bevorzugt in mittlerer Greifhöhe platziert werden, wobei diese etwa einem Meter entspricht (vgl. Abb. 6.11).

Werden zum Kommissionieren Picklisten verwendet, so ist darauf zu achten, dass die wichtigsten Informationen hervorgehoben sind, ein hoher Kontrast realisiert wurde, für die Kommissionierung unwichtige Elemente minimiert dargestellt sind und eine Möglichkeit zum Abzeichnen vorgesehen ist. Eine ergonomische Gestaltung von Picklisten verringert die Totzeit und steigert somit die Kommissionierleistung.

Die Europalette erweist sich nicht nur für die Bereitstellung von Gütern als problematisch, sondern kann auch bei der Sammlung von Artikeln ein ergonomischer Schwachpunkt sein. Die großen Greifabstände und ein hohes Ladege wicht können ggf. zu einer hohen Belastung der Muskulatur im Wirbelsäulenbereich führen. Die niedrige Ladehöhe stellt ein weiteres Problem dar. Abhilfe schaffen in diesem Fall z. B. ein Gabelhochhubwagen, bei dem die Ladehöhe angepasst werden kann, oder in Abhängigkeit vom Artikelspektrum verfahrbare Kommissionierwagen mit Sammelbehältern. In der manuellen Kommissionierung werden als Sammelfahrzeuge häufig auch Handhubwagen eingesetzt. Durch die Anfahr- und

Abbremsvorgänge stellen sich für den Kommissionierer negative Belastungen ein. Wird ein Kommissionierstapler verwendet, müssen ergonomische Gesichtspunkte wie Übersichtlichkeit, Verstellbarkeit der Sitze, Fahrverhalten und einfache Handhabung berücksichtigt werden. Erfolgt keine strikte Trennung von Geh- und Fahrwegen, gelten für Fördermittel beim innerbetrieblichen Transport Geschwindigkeitsbegrenzungen von 5 km/h, um die Sicherheit der Mitarbeiter nicht zu gefährden. Verkehrsregeln sind in jedem Fall eine unabdingbare Voraussetzung zur Gewährleistung eines sicheren Arbeitsablaufs. Weiterhin ist eine ausreichende Arbeitsgangbreite sicherzustellen, die es ermöglicht, Arbeitsabläufe, wie z. B. Kommissionierung und Nachschub, ohne etwaige Beeinträchtigungen parallel nebeneinander auszuführen [HEW93].

Ein Prozess, der nicht vernachlässigt werden sollte, ist der Umgang mit Leerbehältern, Kartonagen oder leeren Paletten. Eine nicht geregelte Entsorgung führt zwangsläufig zu Behinderungen im Kommissionierbereich und in besonderen Fällen auch zur Gefährdung der Sicherheit. Zur Vereinfachung der Arbeitsabläufe sollten demnach entsprechende Vorkehrungen, z. B. markierte Stellflächen für Leerbehälter, getroffen werden [HEW93]. In Abb. 6.13 führt der Kommissionierer in seinem Rundgang einen Behälter für leere Kartonagen mit sich.

Ware-zur-Person-Kommissionierarbeitsplätze

Auch ein Ware-zur-Person-Arbeitsplatz lässt sich nach einer Vielzahl von ergonomischen Kriterien gestalten.

Die Bereitstellung der Artikel erfolgt meist dynamisch über eine Rollenbahn. Die Greifhöhe kann hierbei leicht für alle Bereitstellplätze dem Optimalwert angepasst werden, da es meist nur einige wenige Bereitstellplätze gibt und der Kommissionierer sich nicht außerhalb eines bestimmten Radius bewegt. Die Gestaltung einer optimalen Ablagehöhe ist ebenfalls möglich. Bei Stapelung der Artikel auf einer Palette kann durch die Installation eines Hubtisches je nach Palettenfüllgrad die Ablagehöhe kontinuierlich angepasst werden, so dass unnötige Bück-Bewegungen vermieden werden.

Durch eine geringe Anzahl von Bereitstell- und Abgabestationen wird dem Kommissionierer ermöglicht, alle Arbeitsaufgaben aus einer Grundposition heraus zu erledigen. Eine Drehbewegung des Oberkörpers kann durch sinnvolle Gestaltung vermieden werden. Die Einhaltung der Abmaße für eine optimale Greifbewegung kann ebenfalls durch eine geschickte Anordnung gewährleistet werden. In Abb. 6.14 ist eine Ware-zur-Person-Kommissionierarbeitsstation dargestellt. Die Bereitstellung des Entnahmehbehälters erfolgt zentral. Rechts und links davon sind jeweils zwei Abgabebehälter in einem leichten Winkel positioniert, so dass unnötige Drehbewegungen umgangen werden können.

Eine Neigung der Bereitstelleinheiten um 30° kann den Greifvorgang erleichtern und ermöglicht eine Einsicht in den Behälter. Ein Spiegel über dem Behälter gewährleistet eine zusätzliche Kontrollmöglichkeit.

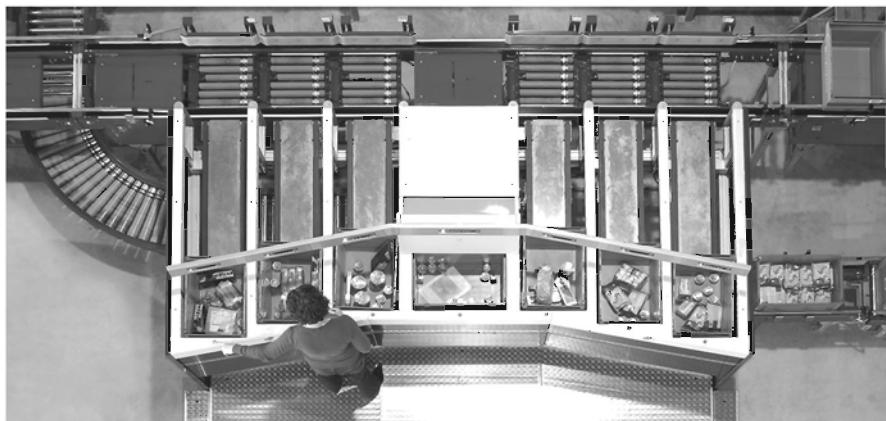


Abb. 6.14 Manuelle Kommissionierstation [Foto: Vanderlande Industries]

Die Informationsbereitstellung findet idealerweise über ein festinstalliertes Terminal, das im Blickfeld des Kommissionierers steht, statt, so dass eine gerade Kopfhaltung ermöglicht wird. Zusätzlich kann durch Pick-by-light-Anzeigen am Bereitstellort die Anzahl der zu entnehmenden Artikel angezeigt werden. Am Abgabebehälter kann mittels Put-to-light-Anzeigen die Abgabemenge signalisiert werden. Alternativ kann durch eine punktuelle Beleuchtung des betreffenden Behälters die gesamte Zielposition markiert werden.

Da diese Arbeitsschritte überwiegend im Stehen ohne Fortbewegung ausgeführt werden, kann jeder Arbeitsplatz mit Trittschutzmatten versehen werden, um Ermüdungen vorzubeugen. Um den unterschiedlichen Körpergrößen der Kommissionierer gerecht zu werden, können Hubeinrichtungen installiert werden, die den Boden anheben und eine belastungsarme Arbeitshöhe schaffen. Eine entsprechende Freiheit im Fußraum und eine ansprechende optische Gestaltung des gesamten Arbeitsplatzes sind weitere Faktoren, die zu einem ermüdfreien Arbeiten beitragen.

6.3.3 Richtlinien und Normen

Die im Folgenden aufgeführten Normen und Richtlinien sind bei der ergonomischen Gestaltung von Kommissionierarbeitsplätzen zu beachten oder liefern Hilfestellungen bei deren Auslegung.

Die VDI-Richtlinie 3657 macht Angaben zur ergonomischen Gestaltung von Kommissionierarbeitsplätzen. Dabei werden verschiedene Teilbereiche untergliedert sowie Abmessungen und Beispiele aufgezeigt. Der erste Abschnitt bezieht sich auf den Wirkraum (= Greiftiefe, Greifraum). Nachfolgend schließen sich der Sehbereich und optische Hilfsmittel an. Grenzen von Blick und Gesichtsfeldern und Neigungen von Bildschirmen an Steharbeitsplätzen sind Inhalte dieses Abschnitts. Zur Kennzeichnung von Bereitstellplätzen mit Signalfarben werden die DIN-Normen

Tabelle 6.3 Gestaltungslösungen für Kommissionierarbeitsplätze nach [DIN 10075-2]

Ebene im Gestaltungsprozess	Folgen psychischer Belastung			
	Ermüdung	Monotonie	Herabgesetzte Wachsamkeit	Sättigung
Aufgabe und/oder Tätigkeit	Aufgabenverteilung Vermelden von gleichzeitiger Aufgabenbearbeitung	Aufgabenverteilung Aufgabenvielfalt	Vermeiden von Daueraufmerksamkeitsanforderungen	Vorsehen von Unterzielen Aufgabenbereicherung
Arbeitsmittel	Eindeutigkeit der Informationsdarstellung	Vermeiden maschinenbestimmten Arbeits-tempos Ermöglichen selbstbestimmten Arbeits-tempos Wechsel in der Darstellungsmodalität von Signalen	Signalauffälligkeit	Ermöglichen individueller Ausführungsweisen von Aufgaben
Arbeitsumgebung	Beleuchtung	Temperatur Farbe	Vermeiden ein-töniger akustischer Reizbedingungen	Vermeiden gleichförmiger Umgebungsbedingungen Abwechslung
Arbeitsorganisation	Vermeiden von Zeitdruck	Aufgabenwechsel Anwesenheit von Mitarbeitern	Aufgaben-erweiterung Aufgabenbereicherung	Aufgabenbereicherung
zeitliche Organisation	Erholungspausen	Erholungspausen	Vermeiden von Schichtarbeit Verringern der Tätigkeitsdauer	Erholungspausen

4818 und 1451 zitiert. Weiterhin werden Angaben zur Beleuchtung, Klima, Schutz gegen Lärm, physische und psychische Leistungsgrenzen, fördertechnische Einrichtungen und Planungsstufen zur Inbetriebnahme neuer Kommissionieranlagen aufgeführt. Insgesamt beschäftigt sich die VDI-Richtlinie 3657 sehr detailliert mit der optimalen ergonomischen Anpassung eines Kommissionierarbeitsplatzes an den Menschen. Grundlage dafür bildet die Anthropometrie [VDI 3657].

An einem Kommissionierarbeitsplatz wirken auf den Mitarbeiter zahlreiche Belastungen ein. Begriffserklärungen zur psychischen Belastung und Beanspruchung werden in der DIN 10075 gegeben. Ebenfalls werden dort mögliche resultierende Folgen dieser Belastung genannt. Im zweiten Teil dieser Norm stehen die Gestal-

tungsgrundsätze im Vordergrund, die beeinträchtigende Auswirkungen des Arbeitssystems vermeiden sollen. Dazu werden Leitsätze, die das Auftreten von Ermüdung, Monotonie, herabgesetzter Wachsamkeit und Sättigung umgehen sollen, aufgestellt. In Tabelle 6.3 werden beispielhafte Gestaltungslösungen aus dieser Norm aufgeführt [DIN 10075-2].

Um die einwirkenden Belastungen auf den Kommissionierer zu verringern, werden in der DIN 6385 grundlegende Leitlinien zur Gestaltung von Arbeitssystemen festgelegt. Dabei wird u. a. Bezug auf Prozesse der Arbeitssystemgestaltung, der Formulierung von Zielen, der Analyse von Funktionen, der Konzeption der Gestaltung, der Gestaltung der einzelnen Elemente, der Realisierung und Bewertung genommen [DIN 6385].

Die Interaktion an der Mensch-Maschine-Schnittstelle an Kommissionierarbeitsplätzen regelt die DIN 9241-2. Für die bildschirmgestützte Informationsverarbeitung nennt die Norm folgende Einzelziele:

- die Durchführung der Arbeitsaufgabe erleichtern
- die Gesundheit und Sicherheit der Mitarbeiter schützen
- das individuelle Wohlbefinden fördern
- die individuellen Fertigkeiten und Fähigkeiten im Rahmen der Aufgabenstellungen weiterentwickeln

Dabei sind Human-Kriterien wie Benutzerorientiertheit, Vielseitigkeit, Ganzheitlichkeit, Bedeutsamkeit, Handlungsspielraum, Rückmeldung und Entwicklungsmöglichkeit zu erfüllen [DIN 9241-2].

Die Sicherheit der Mitarbeiter im Umgang mit den Maschinen wird darüber hinaus in der DIN 12100-2 geregelt. Diese Norm legt technische Leitsätze fest, damit Ingenieure eine Richtlinie zur Konstruktion sicherer Maschinen erhalten. Dazu werden geometrische Faktoren und physikalische Aspekte berücksichtigt, um Gefährdungen auszuschließen. Ergonomische Grundsätze kommen an der Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Tragen. Der Schutz des Menschen vor vermeidbaren Gefahrenstellen an Maschinen steht in dieser Norm im Vordergrund [DIN 12100-2].

Zusätzlich zu den vorhergehenden Normen ist abschließend das Arbeitsschutzgesetz zu nennen. Ziel dieser gesetzlichen Regelung ist es, die Gesundheit aller Beschäftigten durch Maßnahmen des Arbeitsschutzes zu gewährleisten. Es bietet eine Ermächtigungsgrundlage für verschiedene gesetzliche Verordnungen und Anhaltspunkte für wichtige Bestimmungen des Betriebsverfassungsgesetzes. Aus der Nichteinhaltung und/oder der Zuwiderhandlung gegen diese Verordnungen kann ein Bußgeld verhängt werden. Eine vorsätzliche Gefährdung von Leben und Gesundheit der Beschäftigten kann sogar eine Freiheitsstrafe nach sich ziehen [ASG96].

Kapitel 7

Leistungsermittlung von Kommissioniersystemen

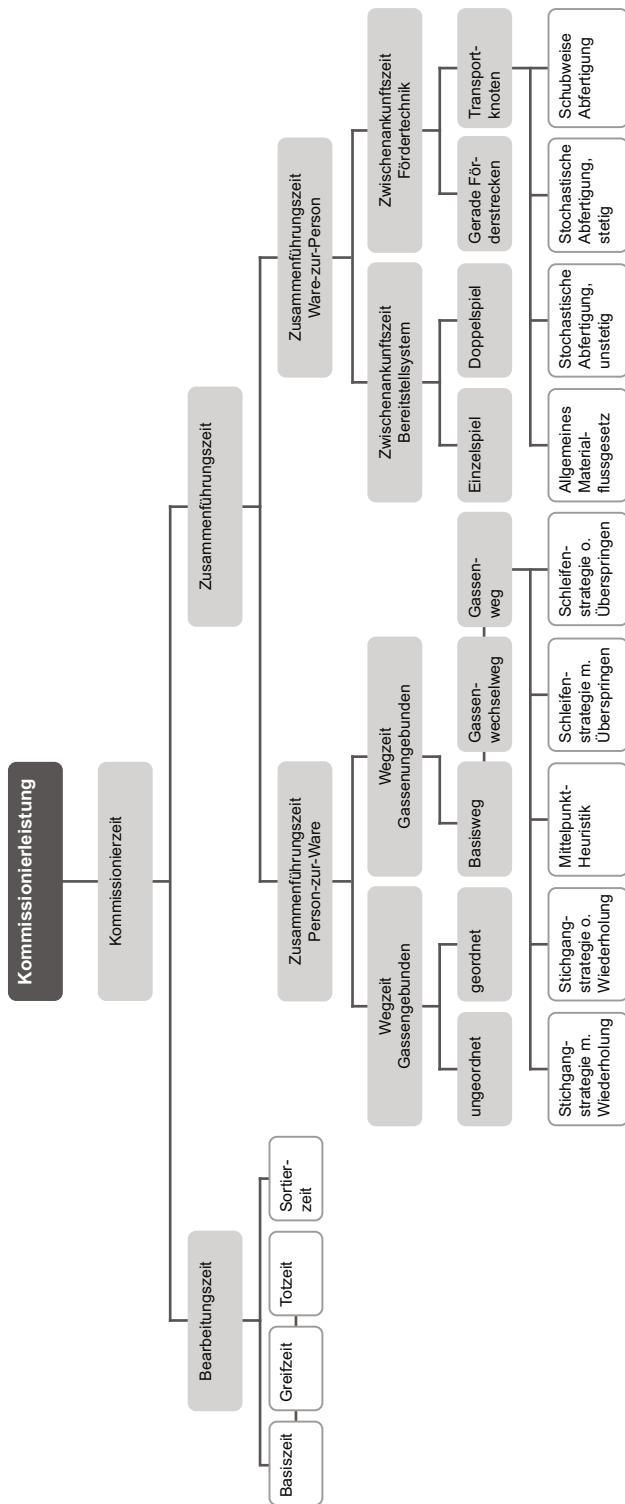
Die Bestimmung der Kommissionierleistung ist der wichtigste Teil einer Neu- oder Änderungsplanung. Die Auswahl und Dimensionierung der Abläufe und Techniken für Materialfluss, Organisation und Informationsbereitstellung in einem Kommissioniersystem führen zusammen mit den individuellen Artikel- und Auftragsgrößen dieses Systems zu einer spezifischen Systemleistung. Diese Leistung kann in vielen Fällen durch analytische Verfahren ermittelt werden.

Im Folgenden wird die Leistungsermittlung anhand eines allgemeinen Berechnungsverfahrens näher erläutert. Die Berechnung aller hierin einfließenden Teilspekte erfolgt in den daran anschließenden Abschnitten. Einen Überblick über die betrachteten Fälle liefert Abbildung 7.1.

7.1 Allgemeiner 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. Im einfachsten Fall bewegt sich dabei der Kommissionierer von einem Entnahmestandort zum nächsten. Man spricht dann von einem Person-zur-Ware-System (PzW). Bewegt sich dagegen die Ladeeinheit des zu kommissionierenden Artikels zum Kommissionierer, spricht man von Ware-zur-Person-Systemen (WzP). 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 im Weiteren allgemein als *Bearbeitungsprozess* bezeichnet. Die benötigte Zeit pro Auftragsposition ist durch die Bearbeitungszeit t_B charakterisiert.

**Abb. 7.1** Übersicht allgemeiner Berechnungsansatz

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 nacheinander ausgeführt (PzW), oder die Prozesse laufen gleichzeitig ab (WzP).

Laufen die Prozesse nacheinander ab, 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

$$t_K = \begin{cases} t_Z + t_B & \text{für PzW} \\ \max(t_Z; t_B) & \text{für WzP} \end{cases} \quad (7.1)$$

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

$$P_K = \frac{1}{t_K} \left[\frac{\text{Pos}}{h} \right] \quad (7.2)$$

Zur Ermittlung der Pickleistung P_P , also der Anzahl Picks pro Stunde, muss die Kommissionierleistung mit der durchschnittlichen Anzahl Picks pro Position n_p multipliziert werden.

$$P_P = P_K \cdot n_p \left[\frac{\text{Pick}}{h} \right] \quad (7.3)$$

Im PzW-System entspricht die Zusammenführungszeit t_Z der Wegzeit t_s , die der Kommissionierer durchschnittlich für die Bearbeitung einer Auftragsposition zurücklegen muss. In WzP-Systemen ergibt sich t_Z aus dem Maximum der Zwischenankunftszeit des Bereitstellsystems t_{ZAZ-B} , das häufig 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 parallel durchgeführt werden. Die Zwischenankunftszeit bezeichnet die Zeit zwischen dem Eintreffen zweier aufeinanderfolgender Artikel. Für die Zusammenführungszeit t_Z gilt entsprechend

$$t_Z = \begin{cases} t_s & \text{für PzW} \\ \max(t_{ZAZ-B}; t_{ZAZ-FT}) & \text{für WzP} \end{cases} \quad (7.4)$$

Mit Einsetzen von (7.4) in (7.1) ergibt sich die Kommissionierzeit zu

$$t_K = \begin{cases} t_s + t_B & \text{für PzW} \\ \max(t_{ZAZ-B}; t_{ZAZ-FT}; t_B) & \text{für WzP} \end{cases} \quad (7.5)$$

Mit Hilfe des oben beschriebenen Berechnungsansatzes lassen sich auch mehrstufige Kommissioniersysteme berechnen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Berech-

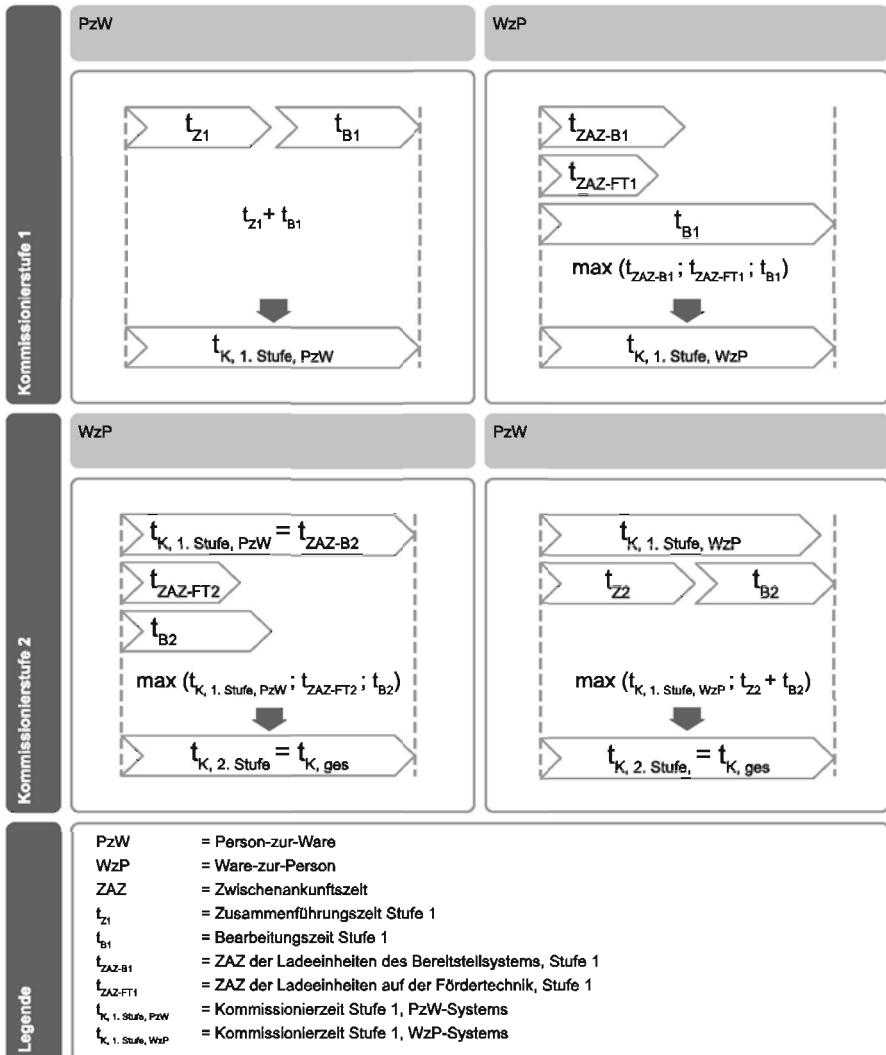


Abb. 7.2 Anwendung des Berechnungsansatzes auf zweistufige Kommissioniersysteme

nung immer mit der Stufe $i = 1$ beginnt, da die Kommissionierzeit der Stufe $i - 1$ in die Berechnung der Stufe i einfließt. Das bedeutet, dass die Leistung eines i -stufigen Systems durch die Leistung der i -ten Stufe festgelegt ist. Es gilt

$$t_{K, \text{System}} = t_{K,i} \quad (7.6)$$

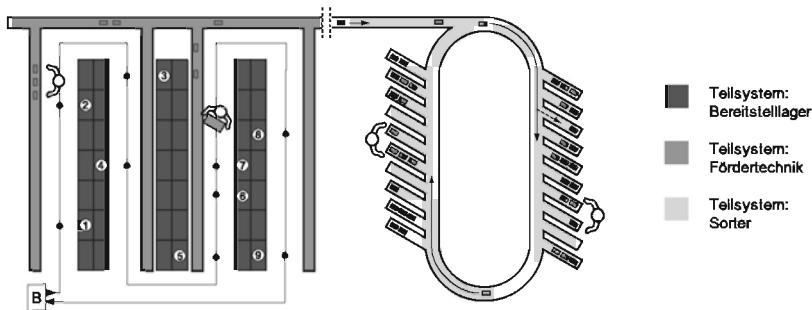


Abb. 7.3 Beispiel eines zweistufigen Kommissioniersystems mit Pick-to-belt und anschließender Sortierung

Bestimmung der Kommissionierzeit am Beispiel eines zweistufigen Kommissioniersystems

Dieser Zusammenhang soll anhand eines zweistufigen Pick-to-belt-Systems (PtB) gemäß Abb. 7.3 näher erläutert werden. In Abb. 7.2 wird die Anwendung des allgemeinen Berechnungsansatzes auf ein zweistufiges Kommissioniersystem beispielhaft dargestellt.

Die erste Stufe wird durch den Kommissionierer repräsentiert, der sich von Entnahmestelle zu Entnahmestelle bewegt, die entsprechenden Entnahmeeinheiten aus dem Lagerfach entnimmt und sie auf dem Förderband ablegt (PzW). Die zweite Kommissionierstufe ist ein WzP-System. Die Bereitstellung wird durch das PzW-System der ersten Stufe gewährleistet. Darauf folgen der Transport der Bereitstelleneinheiten, also der bereits in der ersten Stufe kommissionierten Artikel, zum Sortiersystem und die Zuordnung der Artikel auf die Endstellen des Sorters. Betrachtet man einen Sorter, so erfolgt der Prozess der Sortierung, also die Zuordnung des Artikels zur entsprechenden Endstelle, in einer durch die technische Ausgestaltung des Sorters vorbestimmten Zeit. Im Mittel ist diese Zeit durch den Kehrwert der Sortierleistung gegeben. Der Sortievorgang kann daher durch einen Bearbeitungsprozess beschrieben werden.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass hier die Leistung eines Packers an einer Endstelle als unendliche Senke betrachtet und nicht in der Berechnung berücksichtigt wird.

Die Kommissionierzeit der ersten Stufe ergibt sich gemäß (7.5) für ein PzW-System zu

$$t_{K,1} = t_{s,1} + t_{B,1} \quad (7.7)$$

Für die zweite Stufe (WzP) ergibt sich aus (7.5)

$$t_{K,2} = \max(t_{ZAZ-B,2}; t_{ZAZ-FT,2}; t_{B,2}) \quad (7.8)$$

Gemäß (7.6) ist die Kommissionierzeit des Gesamtsystems $t_{K,System}$ gleich der i -ten, in diesem Fall der zweiten Stufe.

$$t_{K,System} = t_{K,i} = t_{K,2}$$

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

$$t_{K,1} = t_{ZAZ-B,2} \quad (7.9)$$

Die Zeit $t_{K,1}$ ist durch (7.7) gegeben. Einsetzen von (7.7) in (7.8) liefert

$$t_{K,2} = \max ((t_{s,1} + t_{B,1}) ; t_{ZAZ-FT,2} ; t_{B,2}) \quad (7.10)$$

Die Bearbeitungszeit $t_{B,2}$ ist durch die Sortierzeit t_{sort} , die für eine Position benötigt wird, gegeben. Damit ergibt sich die Kommissionierzeit des Gesamtsystems mit (7.9) 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 dann zu

$$P_{K,System} = \frac{1}{\max (t_{s,1} + t_{B,1} ; t_{ZAZ-FT,2} ; t_{sort,2})} \quad (7.11)$$

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. Im Weiteren werden die verschiedenen Fälle zur Berechnung der Zusammenführungszeit dargelegt. Dabei werden die PzW- und die WzP-Systeme getrennt voneinander betrachtet.

Mehrstufige Kommissioniersysteme setzen sich in der Regel aus PzW- und WzP-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.

7.2 Ermittlung von Bearbeitungszeiten

Die Bearbeitungszeit beinhaltet alle Prozesse, die der Kommissionierer oder eine Maschine ohne Fortbewegung durchführen. Je nach Anwendungssystem sind unterschiedliche Zeitanteile zu berücksichtigen. In manuellen Kommissioniersystemen werden die Kommissionier-Basiszeit, die Kommissionier-Greifzeit, und die Kommissionier-Totzeit unterschieden ([VDI 3590a], [SCH96], [FÜR74], [GUD05]). Es gilt der Zusammenhang

$$t_B = t_{basis} + t_{greif} + t_{tot} \quad (7.12)$$

Die **Kommissionier-Basiszeit** t_{basis} umfasst Vorgänge wie z. B.

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

Die anteilige (mittlere) Basiszeit wird ermittelt, indem die an der Basis verbrachte Gesamtzeit durch die Anzahl der n Auftragspositionen dividiert wird. Es gilt

$$t_{basis} = \frac{t_{basis,n}}{n} \quad (7.13)$$

Die **Kommissionier-Greifzeit** t_{greif} ist die Zeit von der Entnahme bis zum Ablegen der entsprechenden Artikelmengen 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 mittlere Greifzeit ergibt sich aus der mittleren Entnahmemenge pro Auftragsposition multipliziert mit der Zeit für einen Entnahmevergong.

Die **Kommissionier-Totzeit** t_{tot} ist unproduktive, aber nicht zu vermeidende Zeit beim manuellen Kommissionieren. Die Totzeiten entstehen an den Entnahmestellen 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.

Sortierzeit

Werden Sortieranlagen in Kommissioniersystemen eingesetzt, muss die zur Durchführung des Sortierprozesses erforderliche Zeit in der Leistungsberechnung berücksichtigt werden. Der Prozess des Sortierens wird, wie bereits in Kap. 7.1 beschrieben, als stationärer Prozess betrachtet und ist somit der Kategorie der Bearbeitungszeiten zuzuordnen. Die Sortierzeit t_{sort} , also die Zeit für die Zuordnung eines Artikels zu einer Endstelle, lässt sich direkt aus dem Kehrwehrt der Sortierleistung ermitteln. Die Sortierleistung kann dabei berechnet werden [JtH06], oder es werden die vom Hersteller angegebene Leistungsdaten verwendet. Es gilt

$$t_{sort} = \frac{1}{P_{sort}} \quad (7.14)$$

Die Bestimmung der mittleren Zeitbedarfe für manuelle Tätigkeiten in Kommissioniersystemen kann durch verschiedene Methoden der Zeitermittlung erfolgen. Die Vor und Nachteile sowie das Vorgehen werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Methoden der Zeitermittlung

Für die Zeitermittlung manueller Prozesse, wie der Kommissionier-Basiszeit oder der Kommissionier-Greifzeit, können zum einen Zeitaufnahmen im Unternehmen durchgeführt werden, zum anderen werden Systeme vorbestimmter Zeiten zur Zeitermittlung angewandt. 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 (SvZ) zurückgegriffen, um die Zeitanteile für die jeweiligen Prozesse zu ermitteln.

Nach REFA [REF97] 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.

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 [HEI98]. 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 und bei MTM zusätzlich qualitative Einflussgrößen wie eine Fallunterscheidung der einzelnen Bewegungselemente berücksichtigt werden [REF97].

Die Vorteile dieser Systeme liegen beispielsweise in der Möglichkeit, Zeitdaten schon im Planungsstadium zu bestimmen, wobei bereits komplexe Bewegungsabläufe und deren zeitbestimmenden 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 deutschsprachigem Raum mit Abstand gebräuchlichere Verfahren [HEI98], und die Entwicklung von Standarddaten ist bei diesem Verfahren weit vorangeschritten. 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:

- das MTM-Grundverfahren
- die MTM Standarddaten-Verfahren
- das MTM-2-Verfahren
- das 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, Ablaufenalyse 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 Ablaufenalyse 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 Ablaufenalyse wird ein Modell menschlicher Bewegungen verwendet, die beeinflussbar und für die Arbeit relevant sind. Es können eine Reihe von Bewegungselementen 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, so dass die nächste Grundbewegung ausgeführt werden kann.
- *Vorrichten* ist das Drehen eines Arbeitsgegenstands, um ihn in eine einbaugerechte Lage zu bringen [REF97].

- *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 ausgetüpfte 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 Bewegungszeittabellen 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 Gegenstands 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 Gegenstands, 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 Gegenstands 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 die Gewichtskraft 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

$$(18,4 + 7,3 + 19,0 + 2,0) \text{ TMU} = 46,7 \text{ TMU} = 1,68 \text{ s} \quad (7.15)$$

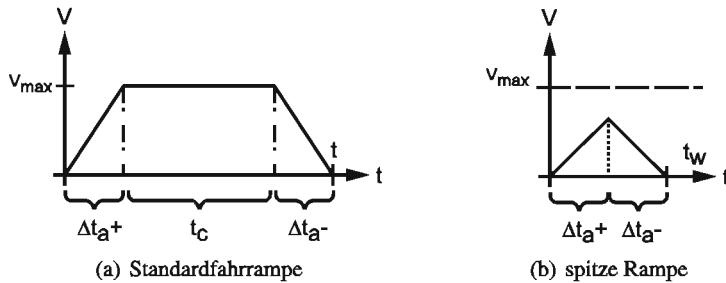


Abb. 7.4 Fahrrampen

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 im nächsten Schritt die Zusammenführungszeit ermittelt werden, die den Weg des Kommissionierers zu den Artikeln (PzW) bzw. den Weg der Artikel zum Kommissionierer (WzP) beschreibt.

7.3 Ermittlung der Zusammenführungszeit – Person-zur-Ware

Die Berechnungen der Zusammenführungszeit in PzW- und WzP-Systemen sind zwei grundsätzlich verschiedene Probleme. Daher werden sie im Weiteren getrennt voneinander betrachtet.

Die Zusammenführungszeit in PzW-Systemen stellt den Zeitanteil dar, den ein Kommissionierer im Mittel benötigt, um sich von einem Entnahmestandort 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-Profilen unterschieden (Abb. 7.4). 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 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 Fahr-

rampen ergibt sich gemäß (7.16) zu

$$t = \begin{cases} \underbrace{\frac{s}{v}}_{t_c} + \underbrace{\frac{v}{a}}_{t_a} & \text{für } s \geq \frac{v^2}{a} \quad \text{Standardfahrrampe} \\ 2 \cdot \sqrt{\frac{s}{a}} & \text{für } s < \frac{v^2}{a} \quad \text{spitze Rampe} \end{cases} \quad (7.16)$$

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 Entnahmestellen so klein, dass die maximale Geschwindigkeit nicht erreicht wird, berücksichtigt man nur den Beschleunigungszeitanteil. Die Fahrzeit ergibt sich dann zu

$$t_n = \begin{cases} \underbrace{\frac{s_n}{v}}_{t_c} + n_a \cdot \underbrace{\frac{v}{a}}_{t_a} & \text{für } \frac{s_n}{n} \geq \frac{v^2}{a} \\ n_a \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{s_n}{n \cdot a}} & \text{für } \frac{s_n}{n} < \frac{v^2}{a} \end{cases} \quad (7.17)$$

Die mittlere 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

$$t_s = \frac{t_n}{n} \quad (7.18)$$

Die Wegstrecke s_n ist von vielen Parametern abhängig. Um eine analytische Lösung mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Kombinatorik zu formulieren, werden folgende 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 artikelreich.
- Die Anzahl der Lagerplätze pro Artikel ist gleich.
- Die Anfahrtshäufigkeiten 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 mittlere Wegstrecke s_n bestimmt, die bei der Bearbeitung eines Kommissionierauftrags zurückgelegt werden muss. Die Division von s_n und der Anzahl Positionen pro Kommissionierauftrag n ergibt die Wegstrecke pro Position. Es gilt

$$s_{pos} = \frac{s_n}{n} \quad (7.19)$$

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

7.3.1 Gassengebundene Betrachtung

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 (vgl. Kap. 3.1, Abb. 3.2(a)). Des Weiteren kann zwischen einem ungeordneten und einem geordneten Anlaufen der Auftragspositionen differenziert werden. Bei der gassengebundenen Betrachtung lassen sich demnach insgesamt vier Fallunterscheidungen vornehmen, die im Folgenden dargestellt werden.

Fall 1: 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 Entnahmestellen sortiert, muss der Kommissionierer innerhalb der Gasse zufällig von einem Lagerplatz zu einem anderen laufen. Abb. 7.5 zeigt sechs Entnahmestellen, die der Kommissionierer in der Reihenfolge von 1–6 bearbeiten muss. Startet und endet der Kommissionierer an einem beliebigen Punkt der Gasse, ist die mittlere Wegstrecke s_{ij} , die er zwischen zwei Entnahmen zurücklegt, gleich dem Erwartungswert für den Abstand zweier beliebiger Entnahmestellen $|x_i - x_j|$.

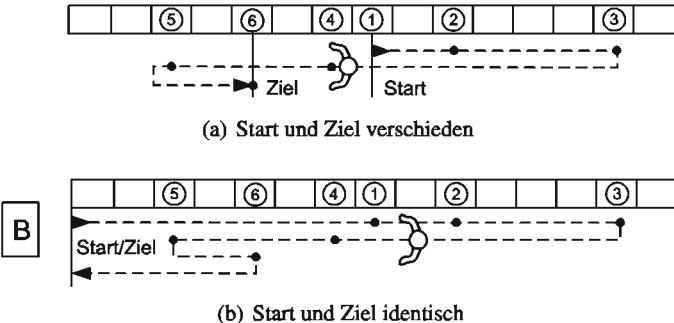


Abb. 7.5 Zufällige Reihenfolge der Auftragspositionen bei der Kommissionierung in einer Gasse

Definiert man die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Weges s_{ij} mit p_{ij} , gilt für die mittlere Wegstrecke s_n bei m Lagerplätzen

$$s_n = E(s_{ij}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m s_{ij} \cdot p_{ij} \quad (7.20)$$

$$= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m |x_i - x_j| \cdot p_{ij} \quad (7.21)$$

Ist die Zugriffshäufigkeit auf alle Lagerplätze der Gasse ungefähr gleich groß (Abb. 7.7(a)), 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}

$$p_{ij} = \frac{1}{k} \quad (7.22)$$

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

$$k = \frac{m!}{(m-z)!} \quad (7.23)$$

ermitteln [BGG00]. Die Anzahl der kombinatorischen Möglichkeiten für $z = 2$ Lagerfächer in einer Gasse mit m Lagerfächern ergibt sich damit zu

$$k = \frac{m!}{(m-2)!} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (m-2) \cdot (m-1) \cdot m}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (m-2)} = (m-1) \cdot m \quad (7.24)$$

Durch Einsetzen von (7.24) in (7.22) ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für eine beliebige Strecke zu

$$p_{ij} = \frac{1}{m \cdot (m-1)} \quad (7.25)$$

Der Erwartungswert $E(s_{ij})$ ergibt sich durch Einsetzen von (7.25) in (7.21) allgemein zu

$$E(s_{ij}) = \frac{1}{m \cdot (m-1)} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m |x_i - x_j| \quad (7.26)$$

Der Parameter L entspricht der Länge aller Lagerfächer m . Mit $m \rightarrow \infty$ lässt sich die Doppelsumme durch ein Doppelintegral ersetzen und der Term $m \cdot (m-1)$ wird zu L^2 [ARF07]. Der Erwartungswert für die Wegstrecke zwischen zwei beliebigen Positionen ist nach [ARF07]

$$E(s_{ij}) = \frac{1}{L^2} \cdot \int_0^L \int_0^L |x_i - x_j| dx dx' = \frac{1}{3} \cdot L \quad (7.27)$$

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

$$s_n = n \cdot \frac{1}{3} \cdot L \quad (7.28)$$

Wird die Standardfahrrampe vorausgesetzt, ergibt sich die Wegzeit t_n mit (7.17) für den Fall, dass Start und Ziel verschieden sind (vgl. Abb. 7.5(a)), zu

$$t_n = \frac{1}{3} \cdot \frac{n \cdot L}{v} + n_a \cdot \frac{v}{a} \quad (7.29)$$

Beispiel:

Bei im Mittel $n = 15$ Auftragspositionen und einer Gassenlänge von $L = 15m$, einer Geschwindigkeit von $v = 1 \frac{m}{s}$ und einer Beschleunigung von $a = 2 \frac{m}{s^2}$, ergibt sich für die Wegzeit beim Kommissionieren mit Basis ein Wert von

$$t_n = \frac{1}{3} \cdot \frac{15 \cdot 15}{1} + 16 \cdot \frac{1}{2} = 83s \quad (7.30)$$

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

$$n_a = n \longrightarrow \text{Kommissionieren ohne Basis} \quad (7.31)$$

$$n_a = n + 1 \longrightarrow \text{Kommissionieren mit Basis} \quad (7.32)$$

Für den Fall, dass eine Basis vorliegt (Abb. 7.5(b)), 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 $\frac{1}{3} \cdot L$ wird dann nur noch $n - 1$ Mal zurückgelegt. Für die Wegstrecken von der Basis bis zum ersten Entnahmestandort und vom letzten Entnahmestandort bis zur Basis ist bei einer gleichverteilten Zugriffshäufigkeit auf die Lagerfächer jeweils eine Länge von $\frac{1}{2} \cdot L$ zu veranschlagen (Das Anfahren eines beliebigen Punktes in der Gasse entspricht dem Fall, dass genau eine Position in einer Gasse gepickt wird. Bei einer Gleichverteilung der Artikel in der Gasse läuft der Kommissionierer im Mittel nur bis zur Hälfte der Gasse.). Die Wegstrecke s_n , die bei n Positionen pro Auftrag zurückgelegt wird, ergibt sich dann zu

$$\begin{aligned} s_n &= \frac{1}{2} \cdot L + (n - 1) \cdot \frac{1}{3} \cdot L + \frac{1}{2} \cdot L \\ &= L + (n - 1) \cdot \frac{1}{3} \cdot L \end{aligned} \quad (7.33)$$

Für den Fall der Standardfahrrampe ergibt sich durch Einsetzen von (7.33) in (7.17) und mit (7.32) die Gesamtfahrzeit zu

$$t_n = \frac{L}{v} + (n - 1) \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{L}{v} + (n + 1) \cdot \frac{v}{a} \quad (7.34)$$

wenn Start und Ziel identisch sind (vgl. Abb. 7.5(b)). Die mittlere Zusammenführungszeit pro Position $t_Z = t_s$ (7.4) ergibt sich durch Division von t_n mit n gemäß (7.18).

Beispiel:

Bei im Mittel $n = 15$ Auftragspositionen und einer Gassenlänge von $L = 15m$, einer Geschwindigkeit von $v = 1\frac{m}{s}$ und einer Beschleunigung von $a = 2\frac{m}{s^2}$, ergibt sich aus (7.34) für die Wegzeit ein Wert von

$$t_n = \frac{15m}{1\frac{m}{s}} + (15 - 1) \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{15m}{1\frac{m}{s}} + (15 + 1) \cdot \frac{1\frac{m}{s}}{2\frac{m}{s^2}} = 93s \quad (7.35)$$

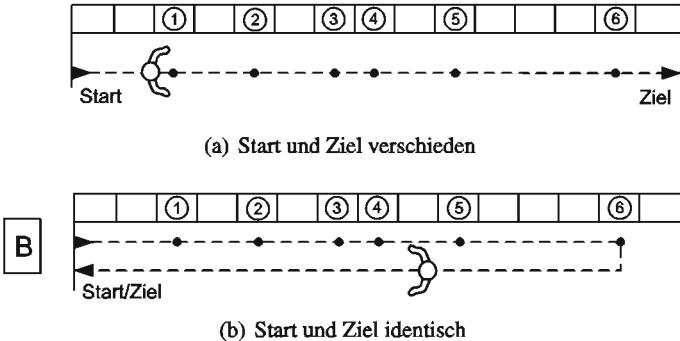


Abb. 7.6 Sortierte Reihenfolge der Auftragspositionen bei der Kommissionierung in einer Gasse

Fall 2: 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. 7.6(a)), oder es ist gleich dem Startpunkt (Abb. 7.6(b)).

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

$$s_n = L \quad (7.36)$$

Die Wegzeit t_n ergibt sich für den Fall, dass Start und Ziel am gegenüberliegenden Gassenende liegen (vgl. Abb. 7.6(a)), durch Einsetzen von (7.32) und (7.36) in (7.17) zu

$$t_n = \frac{L}{v} + (n+1) \cdot \frac{v}{a} \quad (7.37)$$

Die mittlere Wegzeit pro Position ergibt sich erneut durch Division mit n gemäß (7.18).

Beispiel:

Bei im Mittel $n = 15$ Auftragspositionen und einer Gassenlänge von $L = 15m$, einer Geschwindigkeit von $v = 1\frac{m}{s}$ und einer Beschleunigung von $a = 2\frac{m}{s^2}$, ergibt sich aus (7.37) für die Wegzeit ein Wert von

$$t_n = \frac{15m}{1\frac{m}{s}} + (15+1) \cdot \frac{1\frac{m}{s}}{2\frac{m}{s^2}} = 23s \quad (7.38)$$

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 Stichgangstra-

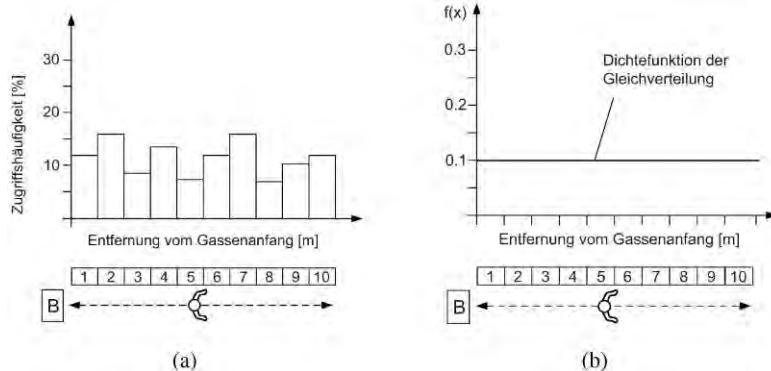


Abb. 7.7 (a) Empirische Häufigkeitsverteilung über die Entfernung vom Gassenanfang (Lagerplätze); Einlagerung ohne Berücksichtigung der Zugriffshäufigkeit; (b) Gleichverteilte Zugriffshäufigkeit über die Entfernung vom Gassenanfang

tegie 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. Abb. 7.7(a) zeigt die mittleren Zugriffshäufigkeiten über die Lagerplätze.

Näherungsweise kann die empirische Verteilung durch eine Gleichverteilung gemäß Abb. 7.7(b) 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 häufig durch einen Typ von Exponentialverteilung zu modellieren sind. Abb. 7.8(a) zeigt eine typische Häufigkeitsverteilung, wenn die Zugriffshäufigkeit bei der Einlagerung berücksichtigt wird.

Diese Häufigkeitsverteilung kann näherungsweise durch eine Exponentialverteilung abgebildet werden (Abb. 7.8(b)). 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 (vgl. Kap. 6.1.2) nur vom Lagerplatz mit der maximalen Entfernung vom Gassenanfang abhängig.

Ist die theoretische Dichtefunktion $f(x)$ der Zugriffshäufigkeit über die Gasse bekannt, 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 ([GEB04], [MGB73]) durch

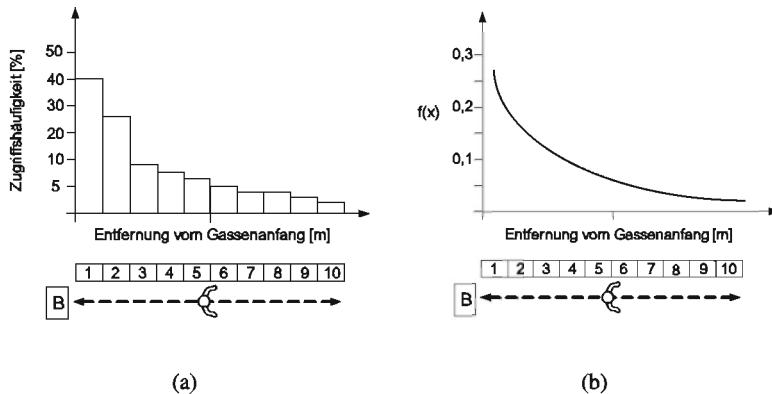


Abb. 7.8 (a) Empirische Häufigkeitsverteilung über die Entfernung vom Gassenanfang (Lagerplätze); Einlagerung mit Berücksichtigung der Zugriffshäufigkeit; (b) Exponentialverteilte Zugriffshäufigkeit über die Entfernung vom Gassenanfang

$$F_{X(n)}(x) = [F(x)]^n \quad (7.39)$$

Die Dichtefunktion $f_{X(n)}(x)$ erhält man durch die Ableitung der Verteilungsfunktion (7.39):

$$f_{X(n)}(x) = n \cdot [F(x)]^{n-1} \cdot f(x) \quad (7.40)$$

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

$$s_n = 2 \cdot E(X(n)) \quad (7.41)$$

Mit der allgemeinen Definition für den Erwartungswert und (7.40) ergibt sich der Erwartungswert $E(X(n))$ 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

$$s_n = 2 \cdot \int_0^\infty x \cdot n \cdot f(x) \cdot [F(x)]^{n-1} dx \quad (7.42)$$

bzw.

$$s_n = 2 \cdot \int_0^\infty 1 - [F(x)]^n dx \quad (7.43)$$

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 (7.17) und $n_a = n$ gilt für den Hinweg

$$t_n^{hin} = \begin{cases} \frac{s_n}{2 \cdot v} + n \cdot \frac{v}{a} & \text{für } \frac{s_n}{2 \cdot n} \geq \frac{v^2}{a} \\ n \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{s_n}{2 \cdot n \cdot a}} & \text{für } \frac{s_n}{2 \cdot n} < \frac{v^2}{a} \end{cases} \quad (7.44)$$

Da beim Rückweg nicht angehalten wird, ergibt sich die Fahrzeit für den Rückweg durch einsetzen von $s_n/2$ in (7.16) zu

$$t_n^{rueck} = \begin{cases} \frac{s_n}{2 \cdot v} + \frac{v}{a} & \text{für } \frac{s_n}{2} \geq \frac{v^2}{a} \\ 2 \cdot \sqrt{\frac{s_n}{2 \cdot a}} & \text{für } \frac{s_n}{2} < \frac{v^2}{a} \end{cases} \quad (7.45)$$

Die Gesamtfahrzeit für n Positionen ergibt sich dann zu

$$t_n = t_n^{hin} + t_n^{rueck} \quad (7.46)$$

Die Fahrzeit pro Position ergibt sich mit (7.18) zu

$$t_s = \frac{t_n^{hin} + t_n^{rueck}}{n} \quad (7.47)$$

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

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & ; \text{ für } a \leq x \leq b \\ 0 & ; \text{ sonst} \end{cases} \quad (7.48)$$

$$F(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & ; \text{ für } a \leq x \leq b \\ 0 & ; \text{ sonst} \end{cases} \quad (7.49)$$

$$E(X) = \frac{a+b}{2} \quad (7.50)$$

Damit ergibt sich die mittlere Wegstrecke durch einsetzen von (7.48) und (7.49) in (7.42) zu

$$s_n = 2 \cdot \int_a^b x \cdot n \cdot \frac{1}{b-a} \cdot \left[\frac{x-a}{b-a} \right]^{n-1} dx \quad (7.51)$$

Liegt die Verteilungsfunktion in der Standardnormalform vor, gilt für die Parameter $a = 0$ und $b = 1$. Durch Multiplikation von (7.51) mit der Länge L gilt für s_n

$$\begin{aligned} s_n &= 2 \cdot L \cdot \int_0^1 x \cdot n \cdot 1 \cdot (x)^{n-1} dx \\ &= 2 \cdot n \cdot L \cdot \int_0^1 x \cdot x^{n-1} dx \\ &= 2 \cdot n \cdot L \cdot \int_0^1 x^n dx \\ &= 2 \cdot L \cdot \frac{n}{n+1} \cdot [x^{n+1}]_0^1 \\ &= 2 \cdot L \cdot \frac{n}{n+1} \end{aligned} \quad (7.52)$$

Die Wegzeit ergibt sich im Fall einer Gleichverteilung durch Einsetzen von (7.52) in (7.44) bzw. (7.45). Wird die Standardfahrrampe vorausgesetzt, ist die Wegzeit gegeben durch

$$t_n = 2 \cdot \frac{n}{n+1} \cdot \frac{L}{v} + (n+1) \cdot \frac{v}{a} \quad (7.53)$$

Beispiel:

Bei im Mittel $n = 15$ Auftragspositionen und einer Gassenlänge von $L = 15m$, einer Geschwindigkeit von $v = 1\frac{m}{s}$ und einer Beschleunigung von $a = 2\frac{m}{s^2}$, ergibt sich aus (7.53) für die Wegzeit ein Wert von

$$t_n = 2 \cdot \frac{15}{15+1} \cdot \frac{15m}{1\frac{m}{s}} + (15+1) \cdot \frac{1\frac{m}{s}}{2\frac{m}{s^2}} = 36,125s \quad (7.54)$$

Für die Berechnung der Wegzeit in einem Lager mit Schnellläuferzone, liefert [GUD05] einen Ansatz.

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

$$f(x) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x} & , \text{ für } x \geq 0 \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (7.55)$$

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda \cdot x} & , \text{ für } x \geq 0 \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (7.56)$$

$$E(X) = \frac{1}{\lambda} \quad (7.57)$$

darstellen, dann ergibt sich die mittlere Wegstrecke durch Einsetzen von (7.56) in (7.43) zu

$$\begin{aligned} s_n &= 2 \cdot L \cdot \int_0^{\infty} [1 - F(x)]^n dx \\ &= 2 \cdot L \cdot \int_0^{\infty} 1 - (1 - e^{-\lambda \cdot x})^n dx \\ &= 2 \cdot L \cdot \lim_{z \rightarrow \infty} \int_0^z 1 - (1 - e^{-\lambda \cdot x})^n dx \\ &= 2 \cdot L \cdot \lim_{z \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} (1 - e^{-\lambda \cdot z})^k \right] \\ &= 2 \cdot L \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \end{aligned} \quad (7.58)$$

Der Parameter λ gibt an, wie schnell die Exponentialfunktion für $x \rightarrow \infty$ gegen 0 geht. Die Fläche unter $f(x)$ ist immer gleich 1.

Eine normierte Exponentialverteilung verläuft in einem Intervall zwischen $[0, 1]$. Im vorliegenden Fall ergibt der Erwartungswert der normierten Exponentialverteilung den Anteil der Gassenlänge, den ein Kommissionierer in einer Gasse zurücklegt.

Die Wegzeit ergibt sich im Fall einer Exponentialverteilung durch Einsetzen von (7.59) in (7.44) bzw. (7.45). Wird die Standardfahrrampe vorausgesetzt, ergibt sich die Wegzeit zu

$$t_n = 2 \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \left[\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \right] \cdot \frac{L}{v} + (n+1) \cdot \frac{v}{a} \quad (7.59)$$

Beispiel:

Wird der Erwartungswert für die normierte Exponentialverteilung mit $E(X) = 0,1244$ und $\lambda = 8,038$ angenommen, entspricht dies dem Fall, dass 20% der Artikel 80% der Zugriffe verursachen. Bei im Mittel $n = 15$ Auftragspositionen und einer Gassenlänge von $L = 15m$, einer Geschwindigkeit von $v = 1\frac{m}{s}$ und einer Beschleunigung von $a = 2\frac{m}{s^2}$, ergibt sich aus (7.59) für die Wegzeit ein Wert von

$$\begin{aligned} t_n &= 2 \cdot \frac{1}{8,038} \cdot \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} + \frac{1}{8} + \frac{1}{9} + \frac{1}{10} + \frac{1}{11} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{12} + \frac{1}{13} + \frac{1}{14} + \frac{1}{15} \right) \cdot \frac{15m}{1\frac{m}{s}} + (15+1) \cdot \frac{1\frac{m}{s}}{2\frac{m}{s^2}} = 20,38s \end{aligned} \quad (7.60)$$

Fall 3: zweidimensional, gassengebunden, ungeordnet

Ein typischer zweidimensionaler Anwendungsfall ist das Kommissionieren an einer Regalwand mit RBG. Die dabei entstehende Form der Fortbewegung wird als Chebychev-Metrik bezeichnet, deren charakteristisches Merkmal das simultane Ausführen der Fahrbewegung in horizontaler und vertikaler Richtung ist [BSS90]. Für die Berechnung der Wegzeit ist der größere Fahrzeitanteil der beiden überlagerten Bewegungen in x- und in y-Richtung der Maßgebende.

$$t_{xy} = \max\{t_x; t_y\} \quad (7.61)$$

Der Fahrweg des RBG hängt auch hier wie im eindimensionalen Fall ausschließlich von der Reihenfolge ab, in der die Entnahmorte angefahren werden. Werden diese in einer beliebigen Sequenz angesteuert, so wird vom Kommissionieren ohne Strategie gesprochen (Abb. 7.9). Wegzeitverkürzungen gegenüber diesem Fall lassen sich durch die Anwendung einer Fahrstrategie erzielen. Bekannte Strategien sind u. a. die geordnete Strategie, die Streifenstrategie, die Band-Insertion-Heuristik sowie die Convex-Hull-Heuristik [BSS90]. In Kap. 6.1.2 sind zwei Fahrstrategien bereits beispielhaft vorgestellt worden.

Analytisch lässt sich die resultierende Fahrzeit bei Anwendung einer der genannten Strategien nur mit einem sehr hohen Rechenaufwand bestimmen. Ansätze zur Berechnung verschiedener Strategien finden sich in [GUD73], [GKM01] und [GUD05]. Lediglich die Fahrzeit des zweidimensionalen Kommissionierens ohne

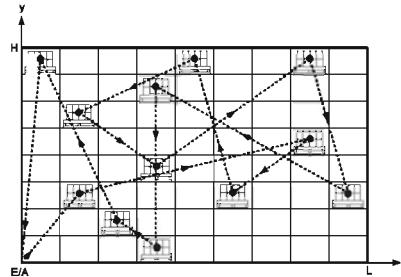


Abb. 7.9 Zweidimensionales Kommissionieren ohne Strategie

Strategie kann ohne große Schwierigkeiten durch eine Adaption der Spielzeitberechnungen (vgl. Kap. 7.4) aufgestellt werden.

Die mittlere Fahrzeit setzt sich beim Kommissionieren ohne Strategie nach [ARF07] wie folgt zusammen:

$$\begin{aligned} t_n &= t_{EP_1} + \sum_{i=2}^n t_{P_{i-1}P_i} + t_{P_nA} + (n+1) \cdot t_a \\ &= \max \left[\frac{x_1}{v_x}; \frac{y_1}{v_y} \right] + \sum_{i=2}^n \max \left[\frac{|x_i - x_{i-1}|}{v_x}; \frac{|y_i - y_{i-1}|}{v_y} \right] \\ &\quad + \max \left[\frac{|L - x_n|}{v_x}; \frac{y_n}{v_y} \right] + (n+1) \cdot \max \left[\frac{v_x}{a_x}; \frac{v_y}{a_y} \right] \end{aligned} \quad (7.62)$$

Die in dieser diskreten Gleichung auftretenden Summanden entsprechen wie im eindimensionalen Fall verschiedenen Zeitanteilen. Dazu zählt die Fahrzeit vom Einlagerpunkt zum ersten Entnahmepunkt (t_{EP_1}) ebenso wie die Fahrzeit vom letzten Entnahmepunkt zum Auslagerpunkt (t_{P_nA}). Sind Ein- und Auslagerpunkt an einem Ort vereint, so sind beide Zeitanteile identisch. Weiterhin ergeben sich ($n-1$) Zeitanteile, die für Fahrten zwischen zwei Positionen anfallen ($\sum_{i=2}^n t_{P_{i-1}P_i}$). Zu allen Fahrzeitannteilen werden abschließend noch ($n+1$) Brems- und Beschleunigungszeitanteile addiert (t_a).

In Kapitel 7.4 wird im Zusammenhang mit der Spielzeitberechnung das Vorgehen zur Lösung der einzelnen Zeitanteile präsentiert. Für die Fahrt vom Einlagerpunkt zum ersten Entnahmepunkt t_{EP_1} ergibt sich die mittlere Fahrzeit nach [ARF07] zu

$$t_{EP_1} = \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{v_x} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v_x}{a_x} \cdot \frac{v_y}{a_y} \right) \quad (7.63)$$

Die Fahrzeit zwischen zwei beliebigen aufeinanderfolgenden Punkten $t_{P_{i-1}P_i}$ ist für den Fall, dass der Regalwandparameter $\omega = \frac{H}{L} \cdot \frac{v_x}{v_y} = 1$ entspricht, nach [ARF07] gegeben durch

$$t_{P_{i-1}P_i} = \frac{14}{30} \cdot \frac{L}{v_x} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v_x}{a_x} \cdot \frac{v_y}{a_y} \right) \quad (7.64)$$

In beiden Zeitkomponenten werden bereits die Beschleunigungs- und Verzögerungszeiten berücksichtigt. Die mittlere Fahrzeit einer Kommissionierrundfahrt ergibt sich dann aus der Summe der einzelnen Teillösungen zu

$$t_n = 2 \cdot t_{EP_1} + (n - 1) \cdot t_{P_{i-1}P_i} \quad (7.65)$$

Die Fahrzeit pro Position ergibt sich zu

$$t_s = \frac{t_n}{n} = \frac{2}{n} \cdot t_{EP_1} + \frac{n - 1}{n} \cdot t_{P_{i-1}P_i} \quad (7.66)$$

Fall 4: zweidimensional, gassengebunden, geordnet

Das zweidimensionale Kommissionieren ohne Strategie führt meist zu einer suboptimalen Lösung, die eine sehr lange Wegstrecke zur Folge hat. Mit Hilfe einer einfachen Approximation lässt sich jedoch die optimale Lösung näherungsweise bestimmen und in die Leistungsrechnung einbeziehen. Der Erwartungswert für die Dauer der optimalen Kommissionierrundfahrt lautet nach [GKM01]

$$t_n^{opt} \approx k \cdot \sqrt{n \cdot A} \quad (7.67)$$

Dabei stellen der Parameter A die Fläche einer Regalwand mit der Höhe H und der Länge L und n die Anzahl Positionen pro Rundfahrt dar. Die Konstante k verändert sich je nach angewandter Metrik sowie für verschiedene Lagen des Ein- und Auslagerpunktes. Im Falle der Chebychev-Metrik ergibt sich die Konstante k aus der Gleichung nach [GKM01]

$$k = p_1 + p_2 \cdot \frac{1}{n} + p_3 \cdot \frac{1}{n^2} + p_4 \cdot \omega + p_5 \cdot n \cdot \omega + p_6 \cdot \frac{1}{n \cdot \omega} \quad (7.68)$$

Die Werte für p_1 bis p_6 variieren je nach Lage des Einlagerpunktes (E) und des Auslagerpunktes (A) und werden in Tabelle 7.1 für den Fall, dass $3 < n \leq 16$ gilt, aufgeführt [GKM01]. Der Regalwandparameter ω fließt in die Gleichung zur Berechnung der Konstante k ein. Er lässt sich anhand folgender Formel berechnen:

$$\omega = \frac{H}{L} \cdot \frac{v_x}{v_y} \quad (7.69)$$

In Kap. 7.4 wird dieser Parameter näher erläutert.

Der Erwartungswert der Tourlänge ist nach Einsetzen von (7.68) in (7.67) mit $A = H \cdot L$ im Falle einer normierten Regalwand (vgl. [LIP03])

$$\begin{aligned} t_n^{opt} &= \left(p_1 + p_2 \cdot \frac{1}{n} + p_3 \cdot \frac{1}{n^2} + p_4 \cdot \omega + p_5 \cdot n \cdot \omega + p_6 \cdot \frac{1}{n \cdot \omega} \right) \sqrt{n \cdot H \cdot L} \\ &= \left(p_1 + p_2 \cdot \frac{1}{n} + p_3 \cdot \frac{1}{n^2} + p_4 \cdot \omega + p_5 \cdot n \cdot \omega + p_6 \cdot \frac{1}{n \cdot \omega} \right) L \cdot \sqrt{n \cdot \omega} \end{aligned} \quad (7.70)$$

Tabelle 7.1 Koeffizienten der Gleichung (7.68) für unterschiedliche Lagen des Einlagerpunktes (E) und Auslagerpunktes (A) nach [GKM01]

Höhe A	Höhe E	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
0	0	0,6923	0,5725	-4,4861	0,0087	1,1382	1,1773
0,25 H	0,25 H	0,6711	0,3361	-3,4669	0,0188	0,7353	1,1994
0,50 H	0,50 H	0,6633	0,0715	-2,5692	0,0450	0,5091	1,2332
0	0,25 H	0,6509	0,5500	-4,3000	0,0660	1,1300	1,2200
0,25 H	0,50 H	0,6369	0,3920	-2,8883	0,0832	0,6583	1,1886
0	0,50 H	0,6297	0,5371	-4,0245	0,1243	1,1201	1,2603
0,25 H	0,75 H	0,6272	0,4000	-2,8639	0,1257	0,8872	1,2189

Die Normierung der Regalwand kann aufgehoben werden, indem L durch $\frac{L}{v_x}$ in (7.70) ersetzt wird. Somit ist die mittlere optimale Fahrzeit

$$t_n^{opt} = \left(p_1 + p_2 \cdot \frac{1}{n} + p_3 \cdot \frac{1}{n^2} + p_4 \cdot \omega + p_5 \cdot n \cdot \omega + p_6 \cdot \frac{1}{n \cdot \omega} \right) \cdot \frac{L}{v_x} \cdot \sqrt{n \cdot \omega} \quad (7.71)$$

Der Erwartungswert berechnet bis zu diesem Zeitpunkt ausschließlich die konstanten Fahrzeitanteile einer Kommissionierrundfahrt ohne Berücksichtigung von Beschleunigungs- und Verzögerungszeiten. Diese müssen noch zur mittleren Fahrzeit addiert werden und lassen sich näherungsweise durch

$$t_a = (n+1) \cdot \frac{\frac{1}{\omega} \cdot \frac{v_x}{2} \cdot \left(\frac{1}{a_x^+} - \frac{1}{a_x^-} \right) + \frac{v_y}{2} \cdot \left(\frac{1}{a_y^+} - \frac{1}{a_y^-} \right)}{\frac{1}{\omega} + 1} \quad (7.72)$$

berechnen [GKM01]. Auswertungen der beiden Näherungsgleichungen haben gezeigt, dass es nur zu geringen Abweichungen (< 2 %) von der optimalen Lösung kommt [GKM01].

Alle hier vorgestellten Berechnungsmethoden setzen eine Gleichverteilung der Entnahmorte über die Regalwand voraus. Durch die Einbeziehung beliebiger Verteilungsfunktionen in die zweidimensionalen Fahrzeitformeln könnten auch unterschiedliche Lagerplatzvergabestrategien abgebildet und deren Einfluss auf die Fahrzeit untersucht werden.

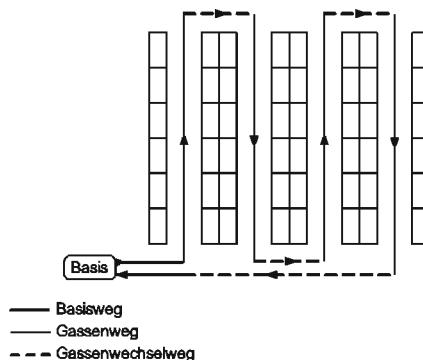


Abb. 7.10 Basisweg, Gassenwechselweg und Gassenweg in einem konventionellen Kommissioniersystem nach dem Person-zur-Ware-Prinzip

7.3.2 Gassenungebundene Betrachtung

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 durchführen muss. 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, ist der Basisweg 0m.

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

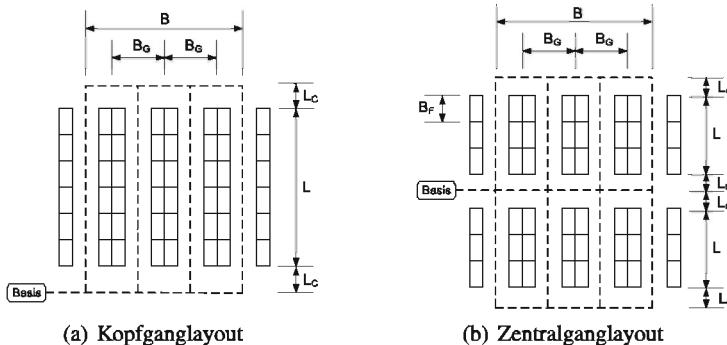


Abb. 7.11 Bezeichnungen im Kopfganglayout und im Zentralganglayout

$$s_n = s_B + s_{GWW} + s_{GW} \quad (7.73)$$

Zur Berechnung der einzelnen Größen müssen Angaben bezüglich der Abmaße des zu berechnenden Kommissioniersystems vorliegen. Abb. 7.11 definiert die im Folgenden verwendeten Größen und Bezeichnungen im Kopfgang- und Zentralganglayout.

Ermittlung des Basisweges

Um den Basisweg zu ermitteln, muss die Art der Basis bekannt sein. Es wird zwischen einer zentralen und einer dezentralen Basis sowie zwischen einer inneren und einer 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, so dass 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 Kommissionierbereichs befindet.

Die Basislage und die Basisform sind die entscheidenden Parameter für die Bestimmung des Basisweges. Die Abb. 7.12(a) stellt eine dezentrale Basis mit äußerer Basislage und einem einseitigem Zonenzugang dar. Aufgrund der äußeren Basislage

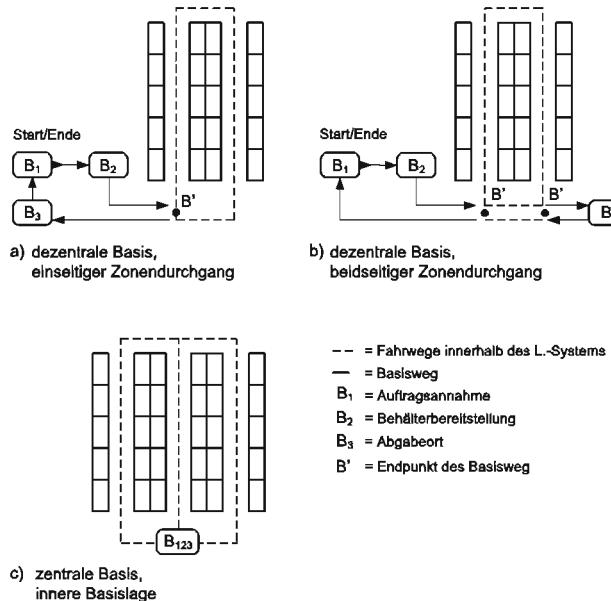


Abb. 7.12 Unterschiedliche Ausführungsformen und Lagen der Basis [Sch96]

ist der Kommissionierer gezwungen, während der Auftragsbearbeitung den Kommissionierbereich ein Mal zu verlassen. Bis zum Erreichen der ersten Gasse muss er einen festen Basisweg zurücklegen, unabhängig davon, welche Wegstrategie innerhalb des Kommissionierbereichs 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:

$$s_B = s_{B_1 B_2} + s_{B_2 B'} + s_{B' B_3} + s_{B_3 B_1} \quad (7.74)$$

Bei einer zentralen Basis entspricht der Basisweg der Gleichung

$$s_B = 2 \cdot s_{BB'} \quad (7.75)$$

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 Basisweg ergibt einen Rundweg, der von Gassenwechselwegen unterbrochen wird, und kann aus den Entfernung im Layout entnommen werden (Abb. 7.12(b)).

Im Fall einer inneren Basislage ist die Basis innerhalb des Kommissioniersystems im Hauptgang angesiedelt. Da der Kommissionierer das Kommissioniersystem nicht verlassen muss, um zur Basis zu gelangen, fallen alle Wege beim Ansteuern der Basis unter Gassenwechselwege. Somit ist bei einer inneren Basislage der Basisweg $s_B = 0 \text{ m}$ (Abb. 7.12(c)).

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. 7.11) multipliziert mit 2. Es gilt

$$s_{GWW} = 2 \cdot B \quad (\text{ohne Überspringen}) \quad (7.76)$$

Weiß der Kommissionierer beim Start des Kommissionierungsgangs, in welchen Gassen sich die zu kommissionierenden Positionen befinden, muss er die übrigen Gassen nicht durchlaufen. Bei einer äußereren 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 (7.42) verwendet werden. Da die Positionen laut Voraussetzung gleichverteilt über N_G Gassen sind, ergibt sich der Gassenwechselweg durch Einsetzen von (7.49) mit $a = 0$ und $b = 1$ in (7.42) und Substitution von L durch B . Für den Gassenwechselweg ergibt sich dann

$$s_{GWW} = 2 \cdot \frac{n}{n+1} \cdot B \quad (\text{mit Überspringen}) \quad (7.77)$$

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].

Berechnung des Gassenweges

Der Gassenweg, der bei der Bearbeitung eines Kommissionierauftrags im Mittel zurückgelegt wird, ist von der verwendeten Wegstrategie (vgl. Kap. 6.1.2) abhängig. Des Weiteren ist das konstante Anfahrmaß L_C (Abb. 7.11) in den Berechnungen zu berücksichtigen. Im Folgenden wird der Gassenweg für die Stichgangstrategie mit und ohne Wiederholung, die Mittelpunkt-Heuristik und die Schleifenstrategie mit und ohne Überspringen ermittelt.

1. 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 dem Produkt des Erwartungswerts der normierten Wahrscheinlichkeitsdichte $f(x)$ und der Länge der Gasse L .

Unter Berücksichtigung des Hin- und Rückwegs gilt

$$\begin{aligned}s_{GW} &= 2 \cdot n \cdot (L_C + L \cdot E(X)) \\ &= 2 \cdot n \cdot \left(L_C + L \cdot \int_0^{\infty} x \cdot f(x) dx \right)\end{aligned}\quad (7.78)$$

Entspricht $f(x)$ einer Gleichverteilung gemäß (7.49) mit $a = 0$ und $b = 1$, dann ergibt sich der Gassenweg durch einsetzen von (7.50) in (7.78) zu

$$s_{GW} = 2 \cdot n \cdot \left(L_C + \frac{1}{2} \cdot L \right) \quad \text{Gleichverteilung} \quad (7.79)$$

Beispiel:

Bei im Mittel $n = 15$ Auftragspositionen, einer Gassenlänge $L = 15m$ und einem konstanten Anfahrmaß von $L_C = 1m$ ergibt sich für den Gassenweg bei einer gleichverteilten Zugriffshäufigkeit ein Wert von

$$s_{GW} = 2 \cdot 15 \cdot \left(1m + \frac{1}{2} \cdot 15m \right) = 255m \quad (7.80)$$

Kann für $f(x)$ eine Exponentialverteilung gemäß (7.56) angenommen werden, dann erhält man den Gassenweg durch Einsetzen von (7.57) in (7.78) zu

$$s_{GW} = 2 \cdot n \cdot \left(L_C + L \cdot \frac{1}{\lambda} \right) \quad \text{Exponentialverteilung} \quad (7.81)$$

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

Beispiel:

Bei im Mittel $n = 15$ Auftragspositionen, einer Gassenlänge $L = 15m$ und einem konstanten Anfahrmaß von $L_C = 1m$ ergibt sich für den Gassenweg bei einer exponentialverteilten Zugriffshäufigkeit mit $\lambda = 8,038$ (entspricht dem Fall, dass 20% der Artikel 80% der Zugriffe verursachen) ein Wert von

$$s_{GW} = 2 \cdot 15 \cdot \left(1m + 15m \cdot \frac{1}{8,038} \right) = 85,98m \quad (7.82)$$

2. 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

$$s_{GW} = 2 \cdot \left(\sum_{r=1}^n p_{ges}(r) \cdot s_r \right) \quad (7.83)$$

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

$$p_{ges}(r) = \sum_{i=1}^{N_G} p_i(r) \quad (7.84)$$

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

$$p_1(r) = p_2(r) = \dots = p_{N_G}(r) = p(r) \quad (7.85)$$

Die Eintrittswahrscheinlichkeit der Wegstrecke s , kann dann durch

$$p_{ges}(r) = N_G \cdot p(r) \quad (7.86)$$

beschrieben werden.

Einsetzen von (7.86) in (7.83) liefert für den Gassenweg s_{GW} den Zusammenhang

$$s_{GW} = 2 \cdot N_G \cdot \sum_{r=1}^n p(r) \cdot s_r \quad (7.87)$$

Die mittlere Wegstrecke s_r , die innerhalb einer Gasse bei der Bearbeitung von r Positionen zurückgelegt werden muss, ergibt sich aus der Addition von (7.42) bzw. (7.43) und dem Anfahrmaß L_C . Es gilt

$$s_r = L_C + L \cdot \int_0^\infty x \cdot r \cdot f(x) \cdot [F(x)]^{r-1} dx \quad (7.88)$$

bzw.

$$s_r = L_C + L \cdot \int_0^\infty 1 - [F(x)]^r dx \quad (7.89)$$

Zur Berechnung von s_{GW} muss gemäß Formel (7.87) 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 in Anlehnung an [BGG00] 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 schwarze 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 $\binom{M_G}{r} \cdot \binom{M - M_G}{n - r}$. 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

$$p(r) = \frac{\binom{M_G}{r} \cdot \binom{M - M_G}{n - r}}{\binom{M}{n}} \quad r = 0, 1, 2, \dots, n \quad (7.90)$$

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

Der Gassenweg s_{GW} für beliebig verteilte Zugriffshäufigkeiten innerhalb der Gassen ergibt sich durch Einsetzen von (7.42) und (7.90) in (7.87) zu

$$s_{GW} = 2 \cdot N_G \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G}{r} \cdot \binom{M - M_G}{n - r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + L \cdot \int_0^\infty x \cdot r \cdot f(x) \cdot [F(x)]^{r-1} dx \right) \right] \quad (7.91)$$

Damit ergibt sich bei gleichverteilter Zugriffshäufigkeit der Gassenweg zu

$$s_{GW} = 2 \cdot N_G \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G}{r} \cdot \binom{M - M_G}{n - r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + L \cdot \frac{r}{r+1} \right) \right] \quad (7.92)$$

Beispiel:

Gegeben ist ein Kommissionierlager mit $N_G = 4$ Lagergassen und insgesamt $M = 100$ verschiedenen Artikel, von denen in jeder Lagergasse $M_G = 25$ Artikel bereitgestellt werden. Bei im Mittel $n = 15$ Auftragspositionen, einer Gassenlänge $L = 15m$ und einem konstanten Anfahrmaß von $L_C = 1m$ ergibt sich für den Gassenweg bei einer gleichverteilten Zugriffshäufigkeit ein Wert von

$$s_{GW} = 2 \cdot 4 \cdot \sum_{r=1}^{15} \left[\frac{\binom{25}{r} \cdot \binom{100 - 25}{15 - r}}{\binom{100}{15}} \cdot \left(1m + 15m \cdot \frac{r}{r+1} \right) \right] = 98,95m \quad (7.93)$$

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

$$s_{GW} = 2 \cdot N_G \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G}{r} \cdot \binom{M - M_G}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{\lambda} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right] \quad (7.94)$$

Beispiel:

Für das im oben genannten Beispiel aufgeführte Kommissionierlager ergibt sich für den Gassenweg bei einer exponentialverteilten Zugriffshäufigkeit mit $\lambda = 8,038$ (entspricht dem Fall, dass 20 % der Artikel 80 % der Zugriffe verursachen) ein Wert von

$$s_{GW} = 2 \cdot 4 \cdot \sum_{r=1}^{15} \left[\frac{\binom{25}{r} \cdot \binom{100-25}{15-r}}{\binom{100}{15}} \cdot \left(1m + \frac{15m}{8,038} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right] = 37,01m \quad (7.95)$$

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

3. 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

$$s_{GW}^C = 2 \cdot (2 \cdot L_C + L) \quad (7.96)$$

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 (Abb. 7.13).

Die verbleibenden Gassen ($N_G - 2$) werden vom Kommissionierer ein Mal von der Vorderseite und ein Mal von der Rückseite betreten und jeweils nur bis zur Mitte der Gasse durchlaufen. Daher werden alle verbleibenden Gassen als zwei unabhängige

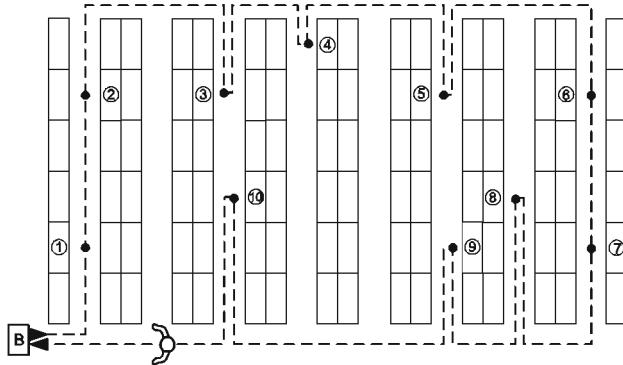


Abb. 7.13 Mittelpunkt-Heuristik

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 (7.96) und (7.91) zu

$$s_{GW} = 2 \cdot (2 \cdot L_C + L) + 2 \cdot N_G^* \cdot \quad (7.97)$$

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

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

$$N_G^* = 2 \cdot (N_G - 2) \quad (7.98)$$

$$M_G^* = \frac{M_G}{2} \quad (7.99)$$

$$L^* = \frac{L}{2} \quad (7.100)$$

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

$$s_{GW} = 2 \cdot (2 \cdot L_C + L) + 4 \cdot (N_G - 2). \quad (7.101)$$

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

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

$$s_{GW}^C = 4 \cdot (2 \cdot L_C + L) \quad (7.102)$$

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^*

$$N_G^* = 2 \cdot (N_G - 4) \quad (7.103)$$

Der Gassenweg im Zentralganglayout ist dann durch den Zusammenhang

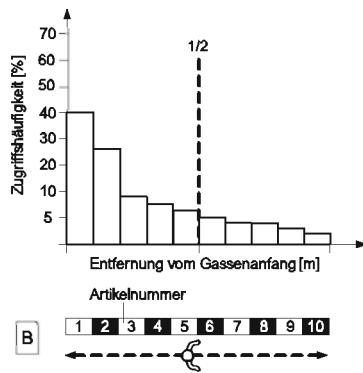
$$s_{GW} = 4 \cdot (2 \cdot L_C + L) + 4 \cdot (N_G - 4) \cdot \dots \quad (7.104)$$

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

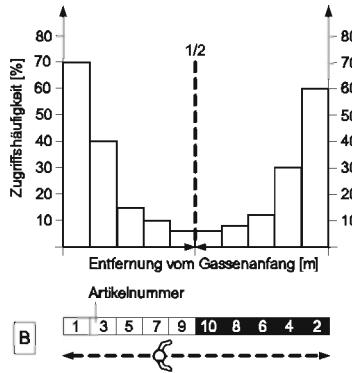
gegeben. Wird die Zugriffshäufigkeit auf einen Artikel bei der Einlagerung berücksichtigt, dann ist es bei Anwendung der Mittelpunkt-Heuristik sinnvoll, die Artikel mit den höchsten Zugriffsralten an den jeweiligen Gassenanfang zu platzieren. Die Zugriffshäufigkeit kann jeweils bis zur Mitte der Gasse durch eine Exponentialverteilung angenähert werden. Abb. 7.14 zeigt das Histogramm und die entsprechende Verteilungsfunktion. Für die Berechnung des Gassenweges muss der Erwartungswert $E(X)^*$, der sich durch die neue Zuteilung der Artikel auf die Lagerplätze ergibt, bekannt sein. In erster Näherung gilt

$$E(X)^* = \frac{E(X)}{2} \quad (7.105)$$

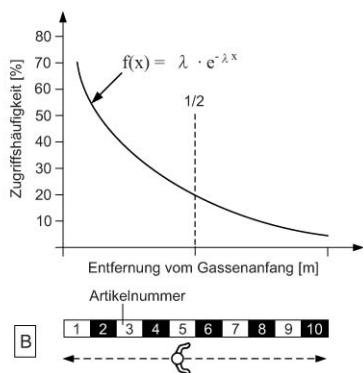
Der Gassenweg bei Einsatz der Mittelpunkt-Heuristik ergibt sich damit in Abhängigkeit vom Layout und der Verteilungsfunktion zu



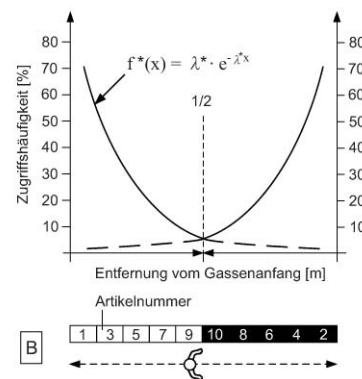
(a) Stichgangstrategie



(b) Mittelpunkt-Heuristik

Abb. 7.14 Histogramm der Zugriffshäufigkeit in einer Gasse bei Berücksichtigung der Zugriffshäufigkeit

(a) Stichgangstrategie



(b) Mittelpunkt-Heuristik

Abb. 7.15 Verlauf der Zugriffshäufigkeit in einer Gasse bei Berücksichtigung der Zugriffshäufigkeit bei unterschiedlichen Wegstrategien

Kopfganglayout/Gleichverteilung

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

$$+ 4 \cdot (N_G - 2) \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G/2}{r} \cdot \binom{M - M_G/2}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{2} \cdot \frac{r}{r+1} \right) \right] \quad (7.106)$$

Kopfganglayout/Exponentialverteilung

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

$$+ 4 \cdot (N_G - 2) \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G/2}{r} \cdot \binom{M - M_G/2}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{\lambda^*} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right] \quad (7.107)$$

Für das Zentralganglayout gilt in analoger Form

Zentralganglayout / Gleichverteilung

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

$$+ 4 \cdot (N_G - 4) \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G/2}{r} \cdot \binom{M - M_G/2}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{2} \cdot \frac{r}{r+1} \right) \right] \quad (7.108)$$

Zentralganglayout / Exponentialverteilung

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

$$+ 4 \cdot (N_G - 4) \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G/2}{r} \cdot \binom{M - M_G/2}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{\lambda^*} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right] \quad (7.109)$$

Beispiel:

Gegeben ist ein Kommissionierlager mit $N_G = 4$ Lagergassen und insgesamt $M = 100$ verschiedenen Artikel, von denen in jeder Lagergasse $M_G = 25$ Artikel bereitgestellt werden. Für die Exponentialverteilung wird $\lambda = 8,038$ (entspricht dem Fall, dass 20 % der Artikel 80 % der Zugriffe verursachen) angenommen. Bei im Mittel $n = 15$ Auftragspositionen, einer Gassenlänge $L = 15m$ und einem konstanten Anfahrmaß von $L_C = 1m$ ergeben sich bei Einsatz der Mittelpunkt-Heuristik in Abhängigkeit vom Layout und der Verteilungsfunktion folgende Werte.

Kopfganglayout/Gleichverteilung

$$\begin{aligned}
 s_{GW} &= 2 \cdot (2 \cdot 1m + 15m) \\
 &+ 4 \cdot (4 - 2) \cdot \sum_{r=1}^{15} \left[\frac{\binom{25/2}{r} \cdot \binom{100 - 25/2}{15-r}}{\binom{100}{15}} \cdot \left(1m + \frac{15m}{2} \cdot \frac{r}{r+1} \right) \right] \\
 &= 75,33m
 \end{aligned} \tag{7.110}$$

Kopfganglayout/Exponentialverteilung

$$\begin{aligned}
 s_{GW} &= 2 \cdot (2 \cdot 1m + 15m) + 4 \cdot (4 - 2) \\
 &\cdot \sum_{r=1}^{15} \left[\frac{\binom{25/2}{r} \cdot \binom{100 - 25/2}{15-r}}{\binom{100}{15}} \cdot \left(1m + \frac{15m}{2} \cdot \frac{1}{8,038} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right] \\
 &= 50,82m
 \end{aligned} \tag{7.111}$$

Zentralganglayout / Gleichverteilung

$$\begin{aligned}
 s_{GW} &= 4 \cdot (2 \cdot 1m + 15m) \\
 &+ 4 \cdot (4 - 4) \cdot \sum_{r=1}^{15} \left[\frac{\binom{25/2}{r} \cdot \binom{100 - 25/2}{15-r}}{\binom{100}{15}} \cdot \left(1m + \frac{15m}{2} \cdot \frac{r}{r+1} \right) \right] \\
 &= 68m
 \end{aligned} \tag{7.112}$$

Zentralganglayout / Exponentialverteilung

$$\begin{aligned}
 s_{GW} &= 4 \cdot (2 \cdot 1m + 15m) + 4 \cdot (4 - 4) \\
 &\cdot \sum_{r=1}^{15} \left[\frac{\binom{25/2}{r} \cdot \binom{100-25/2}{15-r}}{\binom{100}{15}} \cdot \left(1m + \frac{15m}{2} \cdot \frac{1}{8,038} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right] \\
 &= 68m
 \end{aligned} \tag{7.113}$$

4. Schleifenstrategie mit Überspringen

Für den Fall, dass der Kommissionierer Gassen überspringt, in denen keine Positionen zu picken sind, kann der Gassenweg mit (7.87) berechnet werden. Die Wegstrecken s_r entsprechen bei dieser Strategie immer der gesamten Weglänge der Gasse. Das heißt

$$s_r(1) = s_r(2) = s_r(3) = s_r(4) = \dots s_r(N_G) = s_r = 2 \cdot L_C + L \tag{7.114}$$

Damit vereinfacht sich (7.87) zu

$$s_{GW} = N_G \cdot (2 \cdot L_C + L) \cdot \sum_{r=1}^n p(r) \tag{7.115}$$

Mit der Nebenbedingung

$$\sum_{r=0}^n p(r) = 1 \tag{7.116}$$

$$\Leftrightarrow \sum_{r=1}^n p(r) + p(0) = 1 \tag{7.117}$$

$$\Leftrightarrow \sum_{r=1}^n p(r) = 1 - p(0) \tag{7.117}$$

erhält man durch Einsetzen von (7.117) in (7.115)

$$s_{GW} = N_G \cdot (2 \cdot L_C + L) \cdot (1 - p(0)) \tag{7.118}$$

Für p_0 ergibt sich gemäß (7.90) die hypergeometrische Verteilung zu

$$p(0) = \frac{\binom{M_G}{0} \cdot \binom{M-M_G}{n-0}}{\binom{M}{n}} = \frac{\binom{M-M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \tag{7.119}$$

Für die mittlere Wegstrecke bei der Schleifenstrategie mit Überspringen gilt dann

$$s_{GW} = N_G \cdot (2 \cdot L_C + L) \cdot \left[1 - \frac{\binom{M - M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \right] \quad (7.120)$$

Beispiel:

Gegeben ist ein Kommissionierlager mit $N_G = 4$ Lagergassen und insgesamt $M = 100$ verschiedenen Artikel, von denen in jeder Lagergasse $M_G = 25$ Artikel bereitgestellt werden. Bei im Mittel $n = 15$ Auftragspositionen, einer Gassenlänge $L = 15m$ und einem konstanten Anfahrmaß von $L_C = 1m$ ergibt sich für den Gassenweg bei einer gleichverteilten Zugriffshäufigkeit ein Wert von

$$s_{GW} = 4 \cdot (2 \cdot 1m + 15m) \cdot \left[1 - \frac{\binom{100 - 25}{15}}{\binom{100}{15}} \right] = 67,39m \quad (7.121)$$

5. Schleifenstrategie ohne Überspringen

Bei dieser Strategie muss der Kommissionierer jede Gasse mindestens einmal durchlaufen (vgl. Kap. 6.1.2). Liegt eine ungerade Anzahl Gassen vor, wird die letzte Gasse im Mittel nur bis zur letzten Position durchlaufen, bevor der Kommissionierer wieder umkehrt. Wird die Schleifenstrategie ohne Überspringen eingesetzt, liegt meist keine Lagerplatzvergabe nach der Zugriffshäufigkeit der Artikel vor. Deshalb kann an dieser Stelle eine Gleichverteilung angenommen werden. Der Gassenweg ergibt sich zu

$$s_{GW} = \begin{cases} N_G \cdot (2 \cdot L_C + L) & \text{für } N_G \text{ gerade} \\ (N_G - 1) \cdot (2 \cdot L_C + L) + 2 \cdot \left(L_C + \frac{n}{n+N_G} \cdot L \right) & \text{für } N_G \text{ ungerade} \end{cases} \quad (7.122)$$

Beispiel:

Gegeben ist ein Kommissionierlager mit $N_G = 4$ Lagergassen. Bei im Mittel $n = 15$ Auftragspositionen, einer Gassenlänge $L = 15m$ und einem konstanten Anfahrmaß von $L_C = 1m$ ergibt sich für den Gassenweg bei einer gleichverteilten Zugriffshäufigkeit ein Wert von

$$s_{GW} = 4 \cdot (2 \cdot 1m + 15m) = 68m \quad (7.123)$$

Verfügt das Kommissionierlager aus dem oben genannten Beispiel über $N_G = 5$ Lagergassen, ergibt sich für den Gassenweg bei einer gleichverteilten Zugriffshäufigkeit ein Wert von

$$s_{GW} = (5 - 1) \cdot (2 \cdot 1m + 15m) + 2 \cdot (1m + \frac{15}{15+5} \cdot 15m) = 92,5m \quad (7.124)$$

Nachdem nun der Basisweg, der Gassenwechselweg und der Gassenweg für unterschiedliche Wegstrategien ermittelt wurden, kann im Folgenden die Wegzeit berechnet werden.

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 (A.11) zurückzulegen.

Mit der Annahme, dass bei einem Gassenwechsel die Geschwindigkeit des Kommissionierers unverändert bleibt, folgt für die Anzahl der Beschleunigungen $n_a = n + 1$ (7.32). Durch Einsetzen von n_a in (7.17) ergibt sich die Wegzeit t_n zu

$$t_n = \begin{cases} \frac{s_n}{v} + (n+1) \cdot \frac{v}{a} & \text{für } \frac{s_n}{n} \geq \frac{v^2}{a} \\ (n+1) \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{s_n}{n \cdot a}} & \text{für } \frac{s_n}{n} < \frac{v^2}{a} \end{cases} \quad (7.125)$$

Wird bei einem Wechsel der Gassen am Gassenende die Geschwindigkeit in Bewegungsrichtung auf 0 m/s reduziert, ergibt sich bei der Einfahrt wie auch bei der Ausfahrt aus einer Gasse ein Beschleunigungszeitanteil. Die Anzahl der zusätzlichen Beschleunigungen pro Kommissionierauftrag ergeben sich aus dem zweifachen der im Mittel angesprochenen Gassen χ . Diese sind durch den Zusammenhang

$$\begin{aligned} \chi &= N_G \cdot \sum_{r=1}^n p(r) \\ &= N_G \cdot (1 - p(0)) \\ &= N_G \cdot \left[1 - \frac{\binom{M - M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \right] \end{aligned} \quad (7.126)$$

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

$$n_a = n + 1 + 2 \cdot N_G \cdot \left[1 - \frac{\binom{M - M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \right] \quad (7.127)$$

Die Wegzeit pro Kommissionierauftrag ergibt sich durch Einsetzen von (7.127) in (7.17) zu

$$t_n = \begin{cases} \frac{s_n}{v} + \left[n + 1 + 2 \cdot N_G \cdot \left[1 - \frac{\binom{M-M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \right] \right] \cdot \frac{v}{a} & \text{für } \frac{s_n}{n} \geq \frac{v^2}{a} \\ \left[n + 1 + 2 \cdot N_G \cdot \left[1 - \frac{\binom{M-M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \right] \right] \cdot \sqrt{\frac{s_n}{n \cdot a}} & \text{für } \frac{s_n}{n} < \frac{v^2}{a} \end{cases} \quad (7.128)$$

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

Für die Stichgangstrategie mit Gangwiederholung gilt der oben genannte Zusammenhang allerdings nicht. Hierbei werden insgesamt $(2n + 1 + \chi)$ Beschleunigungen durchgeführt.

Beispiel:

Beispielhaft wird an dieser Stelle die erforderliche Wegzeit bei der Stichgangstrategie mit Wiederholung für ein Kommissionierlager mit $N_G = 4$ Gassen (Gassenlänge $L = 15m$, Gassenbreite $B = 3,5m$), einer zentralen Basis (innere Basislage) aufgeführt. Ein Kommissionierer bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von $v = 1 \frac{m}{s}$ und einer Beschleunigung von $a = 2 \frac{m}{s^2}$. Insgesamt werden $M = 100$ verschiedenen Artikel vorgehalten, von denen in jeder Lagergasse $M_G = 25$ Artikel bereitgestellt werden. Bei im Mittel $n = 15$ Auftragspositionen und einem konstanten Anfahrmaß von $L_C = 1m$ ergibt sich für den Wegzeit bei einer exponentialverteilten Zugriffshäufigkeit mit $\lambda = 8,038$ (entspricht dem Fall, dass 20% der Artikel 80% der Zugriffe verursachen) ein Wert von

$$t_n = \frac{105,68m}{1 \frac{m}{s}} + \left[15 + 1 + 2 \cdot 4 \cdot \left[1 - \frac{\binom{100-25}{15}}{\binom{100}{15}} \right] \right] \cdot \frac{1 \frac{m}{s}}{2 \frac{m}{s^2}} = 113,68s \quad (7.129)$$

Nachdem nun die Zusammenführungszeit für verschiedene Fälle innerhalb eines Person-zur-Ware-Systems ermittelt wurde, folgt die Darstellung der Berechnung der Zusammenführungszeit eines Ware-zur-Person-Systems.

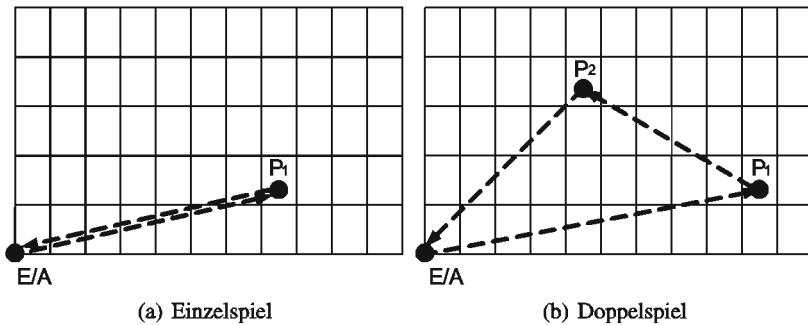


Abb. 7.16 Fahrwege bei einem Einzel- und Doppelspiel in einem vollautomatischen Lager mit Regalbediengerät

7.4 Ermittlung der Zusammenführungszeit – Ware-zur-Person

Kommissioniersysteme, die nach dem Ware-zur-Person-Prinzip aufgebaut sind, bestehen in der Regel aus einem vollautomatischen Lagersystem, in dem die zu kommissionierende Ware bevorratet wird. Zur Auftragszusammenstellung wird der entsprechende Artikel ausgelagert und über eine stetige Fördertechnik zum Kommissionierer transportiert. Die Zusammenführungszeit in WzP-Systemen ist gemäß (7.4) durch die minimalen Zwischenankunftszeiten des Bereitstellsystems t_{ZAZ-B} bzw. des Fördersystems t_{ZAZ-FT} bestimmt.

7.4.1 Zwischenankunftszeit des Bereitstellsystems

Häufig werden AKL eingesetzt, um die Waren zu bevorraten und gleichzeitig in kürzester Zeit für die Kommissionierung verfügbar zu machen. In jedem Behälter wird in der Regel ein Artikel bevorratet. Muss ein Artikel zur Kommissionierung bereitgestellt werden, wird der Behälter ausgelagert und zu dem entsprechenden Kommissionierplatz gefördert. Dort wird die geforderte Teilmenge entnommen. Liegen an den anderen Kommissionierplätzen keine weiteren Anforderungen für diesen Artikel vor und der Behälter ist nicht leer, wird der Behälter zurück zum Lager gefördert und eingelagert.

Jede Ein- bzw. Auslagerung wird als Arbeitsspiel bezeichnet. Die benötigte Zeit zur Durchführung eines Arbeitsspiels wird als Spielzeit definiert. Es werden zwei Arten von Arbeitsspielen unterschieden. Ein Einzelspiel liegt vor, wenn nur eine Ein- oder eine Auslagerung durchgeführt wird. Ein Doppelspiel, oft auch als kombiniertes Spiel bezeichnet, liegt vor, wenn einer Einlagerung eine Auslagerung folgt (Abb. 7.16). Liegt ein Auftragsstrom von Ein- und Auslagerungen gemäß Abb. 7.17 vor, lässt sich jeder Ein- und Auslagerauftrag einem Einzelspiel oder einem Dop-

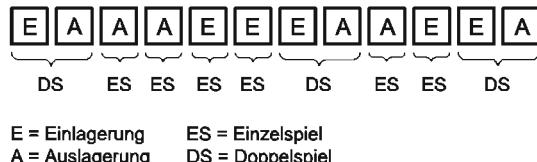


Abb. 7.17 Zuordnung der Ein- und Auslageraufträge zu Einzel- bzw. Doppelspielen

pelspiel zuordnen. Ist der prozentuale Anteil der Doppelspiele p_{DS} in einem Lager bekannt, gilt unter der Voraussetzung $p_{ES} + p_{DS} = 1$ die Formel für die mittlere Spielzeit

$$t_{sp} = p_{ES} \cdot t_{ES} + p_{DS} \cdot \frac{t_{DS}}{2} \quad (7.130)$$

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 (Abb. 7.16). 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. Die Zwischenankunftszeit t_{ZAZ-B} der ausgelagerten Objekte ergibt sich unter dieser Voraussetzung zu

$$t_{ZAZ-B} = 2 \cdot t_{sp} = t_{DS} \quad (7.131)$$

Die Spielzeit t_{sp} setzt sich aus mehreren Zeitanteilen zusammen. Sie werden in fix und variabel unterschieden. Für die Einzelspielzeit t_{ES} gilt

$$t_{ES} = t_c + 2 \cdot t_{gab} + t_{F,ES} \quad (7.132)$$

mit t_c = Konstantanteil für Positionieren, Schalten, Fach besetzt Fühlen

t_{gab} = Gabelspielzeit zur Aufnahme oder Abgabe eines Behälters

$t_{F,ES}$ = Fahrzeit vom E/A-Punkt zum Ein- oder Auslagerplatz und zurück

Das Doppelspiel setzt sich aus den Zeitanteilen

$$t_{DS} = t_c + 4 \cdot t_{gab} + t_{F,DS} \quad (7.133)$$

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

zusammen. Die Gabelspielzeit t_{gab} beinhaltet die Gabelaufahrt, das Heben bzw. Senken der Gabel und die Gabelrückfahrt. Abb. 7.18 zeigt die Abläufe eines Einzel- und eines Doppelspiels. Die Gabelspielzeit und die Totzeit sind bei jedem Arbeitsspiel gleich 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. Die verschiedenen Möglichkeiten der Lagerplatzvergabe wurden bereits in Kap. 6.1.1 ausführlich erläutert.

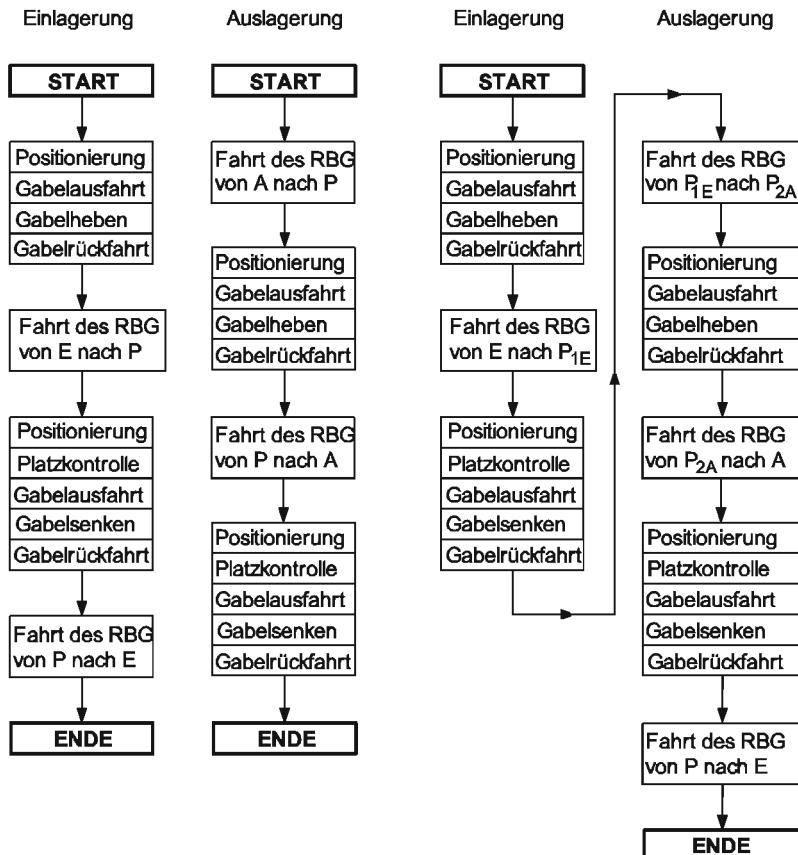


Abb. 7.18 Einzelspiel und Doppelspiel nach [FEM9.851]

Im Folgenden wird zunächst 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 [ARF07] und [GUD05] dargestellt.

Im zweiten Schritt wird dargestellt, wie die Fahrzeit ermittelt werden kann, wenn die Zugriffshäufigkeit auf die Lagerfächer nicht durch eine Gleichverteilung angenähert werden kann, sondern eine beliebig verteilte Zugriffshäufigkeit vorliegt.

Gleichverteilte Zugriffshäufigkeit auf die Lagerplätze

a) Berechnung der mittleren Fahrzeit für ein Einzelspiel

Um die mittlere Fahrzeit $t_{F,ES}$ zur Durchführung eines Einzelspiels zu ermitteln, wird die Summe der Fahrzeiten zu den Lagerfächern multipliziert mit der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit über alle Lagerfächer $1 \rightarrow m$ gebildet. Die Fahrzeit t_i

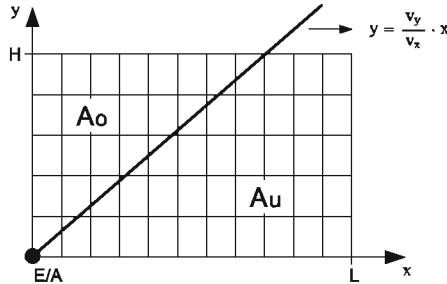
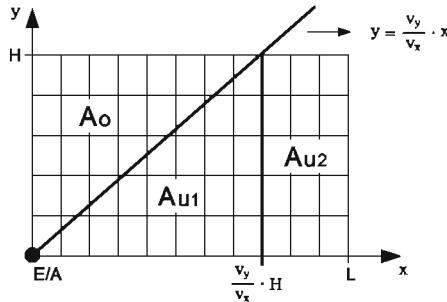
Abb. 7.19 Regalwand mit Geschwindigkeitsgeraden, $\omega \leq 1$ 

Abb. 7.20 Unterteilung des Regals in einzelne Flächen für die Berechnung

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

$$t_{F,ES} = 2 \cdot \sum_{i=1}^m t_i \cdot p_i \quad (7.134)$$

Da während der Fahrt des RBG die Bewegungen in x- und y-Richtung gleichzeitig durchgeführt werden, entsteht eine überlagerte Bewegung, die durch die Fahrdiagonale ausgedrückt wird. Die Fahrdiagonale 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. 7.19). Aufgrund der Überlagerung der Bewegungen ist für die Fahrzeit zu den Lagerfächern, die unterhalb der Fahrdiagonalen 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 Fahrdiagonalen 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 zu

$$p_i = \frac{1}{m} \quad (7.135)$$

Unterscheidet man in (7.134) 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 (7.135) in (7.134) $t_{F,ES}$ zu

$$t_{F,ES} = 2 \cdot \frac{1}{m} \cdot \left(\sum_{i=1}^{m_u} t_i + \sum_{j=1}^{m_o} t_j \right) \quad (7.136)$$

Mit der Definition des Mittelwerts

$$t_u = \frac{1}{m_u} \cdot \sum_{i=1}^{m_u} t_i \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{m_u} t_i = t_u \cdot m_u \quad (7.137)$$

und

$$t_o = \frac{1}{m_o} \cdot \sum_{j=1}^{m_o} t_j \Leftrightarrow \sum_{j=1}^{m_o} t_j = t_o \cdot m_o \quad (7.138)$$

ergibt sich durch Einsetzen von (7.138) in (7.136) die Fahrzeit $t_{F,ES}$ zu

$$\begin{aligned} t_{F,ES} &= 2 \cdot \frac{1}{m} \cdot [(t_u \cdot m_u) + (t_o \cdot m_o)] \\ &= 2 \cdot \left[\frac{m_u}{m} \cdot t_u + \frac{m_o}{m} \cdot t_o \right] \end{aligned} \quad (7.139)$$

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 ergibt sich damit zu

$$t_{F,ES} = 2 \cdot (p_u \cdot t_u + p_o \cdot t_o) \quad (7.140)$$

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

$$p_u = \frac{A_u}{A} \quad (7.141)$$

$$p_o = \frac{A_o}{A} \quad (7.142)$$

Für die Berechnung der mittleren Wegzeiten t_u und t_o wird angenommen, dass immer die Standardfahrrampe gefahren wird. Mit (7.16) gilt dann für die Fahrzeiten

$$t_u = \frac{v_x}{a_x} + \frac{x_u}{v_x} \quad (7.143)$$

$$t_o = \frac{v_y}{a_y} + \frac{y_o}{v_y} \quad (7.144)$$

Die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des RBG werden als bekannt vorausgesetzt. Die Vorgehensweise zur Berechnung der mittleren Wegstrecken x_u und

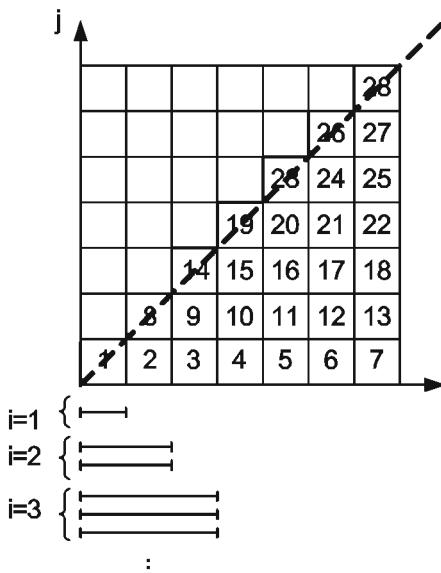


Abb. 7.21 Mittlere Weglänge

y_o soll anhand des Beispiels in Abb. 7.21 veranschaulicht werden. Die abgebildete Regalwand besteht aus i Spalten und j Zeilen. Das Verhältnis der Geschwindigkeiten $\frac{v_x}{v_y}$ entspricht dem Verhältnis von Länge zu Höhe. Damit gilt der Zusammenhang

$$\frac{v_x}{v_y} \cdot \frac{H}{L} = \omega = 1 \quad (7.145)$$

Der Wert $\frac{v_x}{v_y} \cdot \frac{H}{L}$ wird auch als Regalwandparameter ω bezeichnet [ARF07]. Für den Fall, dass $\omega = 1$ ist, entspricht die Fahrdiagonale der Regal diagonalen. Für $\omega < 1$ schneidet die Fahrdiagonale den oberen Rand des Regals; ist $\omega > 1$, so schneidet die Fahrdiagonale den rechten Rand des Regals.

Um die Summe der Fahrwege in x-Richtung unterhalb der Fahrdiagonalen zu bestimmen, werden zunächst alle Fächer i in der Ebene $j = 1$ addiert. Im dargestellten Beispiel werden demnach die 7 Streckenlängen zu den Lagerfächern der untersten Ebene addiert. Bei jeder Erhöhung der Ebenennummer j sinkt die Anzahl der zu addierenden Lagerfächer, die unterhalb der Fahrdiagonalen liegen, um 1. Es werden entsprechend für $j = 2$ nur noch 6 Werte addiert, für $j = 3$ noch 5 Werte usw.

Dieser Zusammenhang lässt sich durch

$$\begin{aligned}
 x_{u,ges}^{\omega=1} = & \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^i x_{ij} = x_{11} \\
 & + x_{21} + x_{22} \\
 & + x_{31} + x_{32} + x_{33} \\
 & + x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} \\
 & + x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} \\
 & + x_{61} + x_{62} + x_{63} + x_{64} + x_{65} + x_{66} \\
 & + x_{71} + x_{72} + x_{73} + x_{74} + x_{75} + x_{76} + x_{77}
 \end{aligned} \tag{7.146}$$

allgemein formulieren. Die Summe der Fächer, die sich insgesamt unterhalb der Fahrdiagonalen befinden, ergibt sich durch den Zusammenhang

$$\sum_{i=1}^7 i = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 = 28 \tag{7.147}$$

Die mittlere Wegstrecke unterhalb der Fahrdiagonalen ergibt sich aus der Division von (7.146) und (7.147) zu

$$x_u = \frac{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^i x_{ij}}{\sum_{i=1}^7 i} = \frac{x_{ges}}{28} \tag{7.148}$$

Durch den Übergang von der diskreten in die infinitesimale Betrachtung geht (7.146) in die allgemeine Form

$$x_{u,ges} = \left[\int_0^{\frac{v_x}{v_y} \cdot H} \int_0^{\frac{v_y}{v_x} \cdot x} x \cdot dy \cdot dx \right] \tag{7.149}$$

über [GRO84]. Für den allgemeinen Fall, dass der Regalwandparameter ω kleiner als 1 ist, wird die Berechnung in zwei Abschnitte unterteilt (vgl. Abb. 7.20). Damit erweitert sich (7.149) zu

$$x_{u,ges}^{\omega \leq 1} = \left[\int_0^{\frac{v_x}{v_y} \cdot H} \int_0^{\frac{v_y}{v_x} \cdot x} x \cdot dy \cdot dx \right] + \left[\int_{\frac{v_x}{v_y} \cdot H}^L \int_0^H x \cdot dy \cdot dx \right] \tag{7.150}$$

Die Summe der Lagerfächer entspricht bei infinitesimaler Betrachtung der Fläche unterhalb der Regaldiagonalen gerade A_u . Für die mittlere Wegstrecke x_u gilt

$$x_u = \frac{x_{u,ges}}{A_u} \tag{7.151}$$

Einsetzen von (7.150) in (7.151) liefert

$$\begin{aligned}
 x_u &= \frac{1}{A_u} \cdot \left[\int_0^{\frac{v_x}{v_y} \cdot H} \int_0^{\frac{v_y}{v_x} \cdot x} x \cdot dy \cdot dx \right] + \frac{1}{F_u} \cdot \left[\int_{\frac{v_x}{v_y} \cdot H}^L \int_0^H x \cdot dy \cdot dx \right] \\
 &= \frac{1}{A_u} \cdot \left[\int_0^{\frac{v_x}{v_y} \cdot H} [x \cdot y]_0^{\frac{v_y}{v_x} \cdot x} \cdot dx + \int_{\frac{v_x}{v_y} \cdot H}^L [x \cdot y]_0^H \cdot dx \right] \\
 &= \frac{1}{A_u} \cdot \left[\int_0^{\frac{v_x}{v_y} \cdot H} x^2 \cdot \frac{v_y}{v_x} \cdot dx + \int_{\frac{v_x}{v_y} \cdot H}^L x \cdot H \cdot dx \right] \\
 &= \frac{1}{A_u} \cdot \left[\left[\frac{1}{3} \cdot x^3 \cdot \frac{v_y}{v_x} \right]_0^{\frac{v_x}{v_y} \cdot H} + \frac{1}{2} \cdot [x^2 \cdot H]_{\frac{v_x}{v_y} \cdot H}^L \right] \\
 &= \frac{1}{A_u} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{v_x^3}{v_y^3} \cdot H^3 \cdot \frac{v_y}{v_x} + \frac{1}{2} \cdot L^2 \cdot H - \frac{1}{2} \left(\frac{v_x}{v_y} \cdot H \right)^2 \cdot H \right] \\
 &= \frac{1}{A_u} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{v_x^2}{v_y^2} \cdot H^3 - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_x^2}{v_y^2} \cdot H^3 + \frac{1}{2} \cdot L^2 \cdot H \right]
 \end{aligned} \tag{7.152}$$

Die mittlere Weglänge oberhalb der Geschwindigkeitsgeraden kann in analoger Weise hergeleitet werden. Es ergibt sich dann für die mittlere Weglänge oberhalb der Fahrdiagonalen

$$\begin{aligned}
 y_o &= \frac{1}{A_o} \cdot \left[\int_0^H \int_0^{\frac{v_x}{v_y} \cdot y} y \cdot dx \cdot dy \right] \\
 &= \frac{1}{A_o} \cdot \int_0^H [y \cdot x]_0^{\frac{v_x}{v_y} \cdot y} \cdot dy \\
 &= \frac{1}{A_o} \cdot \int_0^H \left(y \cdot \frac{v_x}{v_y} \cdot y \right) \cdot dy \\
 &= \frac{1}{A_o} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot y^3 \cdot \frac{v_x}{v_y} \right]_0^H \\
 &= \frac{1}{A_o} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{v_x}{v_y} \cdot H^3
 \end{aligned} \tag{7.153}$$

Einsetzen von (7.141), (7.142), (7.143) und (7.144) in (7.140) liefert

$$t_{F,ES}^{\omega \leq 1} = 2 \cdot \frac{\left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{x_u}{v_x} \right) \cdot A_u + \left(\frac{v_y}{a_y} + \frac{y_o}{v_y} \right) \cdot A_o}{A} \quad (7.154)$$

$$= 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{A_u}{A} \cdot \frac{x_u}{v_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{y_o}{v_y} \right] \quad (7.155)$$

Durch Einsetzen von (7.152) und (7.153) in (7.155) ergibt sich

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

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

$$t_{F,ES}^{\omega \leq 1} = 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{L}{v_x} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{v_x}{v_y} \cdot \frac{H}{L} \right)^2 \right] \right] \quad (7.156)$$

Gilt $\omega > 1$, müssen die Integrationsgrenzen entsprechend angepasst werden. Die Fahrzeit ergibt sich dann zu

$$t_{F,ES}^{\omega > 1} = 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{H}{v_y} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{v_y}{v_x} \cdot \frac{L}{H} \right)^2 \right] \right] \quad (7.157)$$

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

$$t_{F,ES}^{\omega=1} = \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} + \frac{4}{3} \cdot \frac{L}{v_x} \quad (7.158)$$

Die Einzelspielzeit t_{ES} ergibt sich durch Einsetzen von (7.156) bzw. (7.157) in (7.132). Einsetzen von t_{ES} in (7.131) ergibt die Zwischenankunftszeit des Bereitstellsystems

$$\begin{aligned} t_{ZAZ-B}^{\omega \leq 1} &= 2 \cdot (t_o + 2 \cdot t_{gab} \\ &+ 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{L}{v_x} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{v_x}{v_y} \cdot \frac{H}{L} \right)^2 \right] \right]) \end{aligned} \quad (7.159)$$

bzw.

$$\begin{aligned} t_{ZAZ-B}^{\omega > 1} &= 2 \cdot (t_o + 2 \cdot t_{gab} \\ &+ 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{H}{v_y} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{v_y}{v_x} \cdot \frac{L}{H} \right)^2 \right] \right]) \end{aligned} \quad (7.160)$$

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

$$t_{ZAZ-B}^{\omega=1} = 2 \cdot \left(t_o + 2 \cdot t_{gab} + \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} + \frac{4}{3} \cdot \frac{L}{v_x} \right) \quad (7.161)$$

b) Berechnung der mittleren Fahrzeit für ein Doppelspiel

Bei einem Doppelspiel wird, 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. 7.16). Zunächst fährt das 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

$$t_{F,DS} = t_{EP_1} + t_{P_1P_2} + t_{P_2A} \quad (7.162)$$

beschrieben werden. Die mittleren Wegzeiten t_{EP_1} und t_{P_2A} entsprechen – bei gleichverteilten Zugriffshäufigkeiten auf alle Lagerplätze – der mittleren Wegzeit $t_{F,ES}$, die durch (7.156) 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

$$t_{P_1P_2} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m t_{ij} \cdot p_{ij} \quad (7.163)$$

Da die Wahrscheinlichkeit für die Zugriffshäufigkeit auf die Lagerfächer gleichverteilt ist, ergibt sich für jede Kombination eines Lagerfachs mit einem anderen Lagerfach ($i \neq j$) die Wahrscheinlichkeit (vgl. (7.25))

$$p_{ij} = \frac{1}{m(m-1)} \quad (7.164)$$

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

$$t_{ij} = \max[t_{x_i x_j}; t_{y_i y_j}] \quad (7.165)$$

Einsetzen von (7.164) und (7.165) in (7.163) liefert

$$t_{P_1 P_2} = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \max[t_{x_i x_j}; t_{y_i y_j}] \quad (7.166)$$

Mit Annahme der Standardfahrrampe zwischen den Lagerplätzen P_i und P_j ergeben sich die Fahrzeiten mit Gleichungen (7.143) und (7.144) zu

$$t_{x_i x_j} = \frac{|x_i - x_j|}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \quad (7.167)$$

bzw.

$$t_{y_i y_j} = \frac{|y_i - y_j|}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} \quad (7.168)$$

Beim Übergang zur Infinitesimalbetrachtung ergibt sich das Vierfachintegral

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

Die Lösung dieses Integrals liefert [GUD73]

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

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

$$t_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \frac{14}{30} \frac{L}{v_x} \quad (7.169)$$

Die Fahrzeit eines Doppelspiels für den Fall, dass der Regalwandparameter $\omega = 1$ ist, ergibt sich durch Addition von (7.158) und (7.169) zu

$$\begin{aligned} t_{F,DS}^{\omega=1} &= \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} + \frac{4}{3} \cdot \frac{L}{v_x} + \frac{1}{2} \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \frac{14}{30} \frac{L}{v_x} \\ &= \frac{3}{2} \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \frac{54}{30} \frac{L}{v_x} \end{aligned} \quad (7.170)$$

Die Doppelspielzeit und damit auch die Zwischenankunftszeit t_{ZAZ-B} ergibt sich durch Einsetzen von (7.170) in (7.133) zu

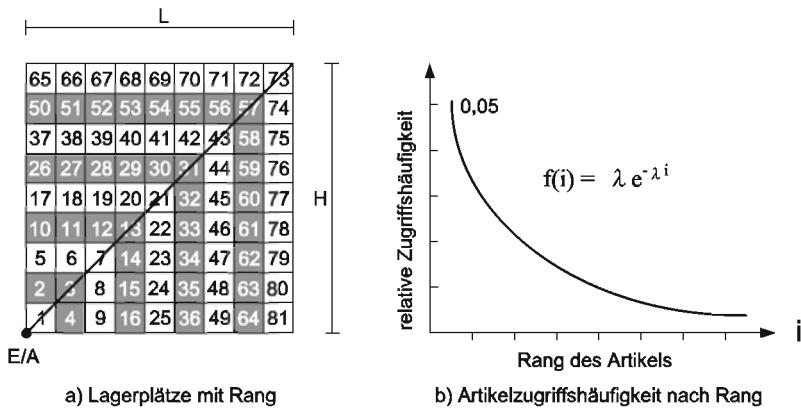


Abb. 7.22 Rang der Lagerplätze und Zugriffshäufigkeit der Artikel nach Rang

$$t_{ZAZ-B} = t_{DS} = t_o + 4 \cdot t_{gab} + \frac{3}{2} \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{v_z}{a_z} \right) + \frac{54}{30} \frac{L}{v_x} \quad (7.171)$$

Beliebig verteilte Zugriffshäufigkeiten

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. A-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 sortiert werden und die Lagerplätze aufsteigend nach der benötigten Fahrzeit zur Erreichung des Lagerplatzes. Anschließend wird jedem Artikel und Lagerplatz ein absoluter Rang R und ein relativer Rang r zugeordnet, der sich aus dem Quotienten des absoluten Rangs R und der Anzahl der Artikel M bzw. Lagerplätze m ergibt. Es gilt:

$$r_{i,M} = \frac{R_i}{M} \quad \text{Artikel} \quad (7.172)$$

$$r_{j,m} = \frac{R_j}{m} \quad \text{Lagerfach} \quad (7.173)$$

In Abb. 7.22(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, ist der Rang in diesen Bereichen willkürlich vergeben. In Abb. 7.22(b) ist die relative Zugriffshäufigkeit der Artikel nach Rang R_i dargestellt. Jedem Artikel wird nun der Lagerplatz zugeordnet, bei dem die Differenz der relativen Ränge minimal wird. Es gilt:

$$|r_{i,M} - r_{j,m}| = \min \quad (7.174)$$

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

$$t_{F,ES} = 2 \cdot \sum_{i=1}^M t_i \cdot p_i \quad (7.175)$$

Lässt sich die relative Zugriffshäufigkeit mit einer Exponentialverteilung gemäß Abb. 7.22(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

$$t_{F,ES} = 2 \cdot \sum_{i=1}^M \max(t_{i,x}; t_{i,y}) \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot i} \quad (7.176)$$

Setzt man eine Standardfahrrampe für alle Fahrbewegungen innerhalb des Lagers gemäß (7.16) voraus, dann gilt für die mittlere Fahrzeit eines Einzelspiels

$$t_{F,ES} = 2 \cdot \sum_{i=1}^M \max \left[\left(\frac{s_{i,x}}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right), \left(\frac{s_{i,y}}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} \right) \right] \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot i} \quad (7.177)$$

Einsetzen von (7.177) in (7.132) 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 Eintrittswahrscheinlichkeiten der unterschiedlichen Wegstrecken aufgrund der zahlreichen zu berücksichtigenden Einflussfaktoren nicht analytisch beschrieben werden können, 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 (7.169) gegeben. Die mittlere Fahrzeit eines Doppelspiels ergibt sich dann zu

$$\begin{aligned} t_{F,DS} &= 2 \cdot \sum_{i=1}^M \max \left[\left(\frac{s_{i,x}}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right), \left(\frac{s_{i,y}}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} \right) \right] \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot i} \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \frac{14}{30} \frac{L}{v_x} \end{aligned} \quad (7.178)$$

Einsetzen von (7.178) in (7.133) liefert die mittlere Doppelspielzeit für $\omega = 1$.

7.4.2 Zwischenankunftszeit der Fördertechnik

a) Gerade Förderstrecken / Eckumsetzer

Für die Berechnung der Kommissionierleistung in Ware-zur-Person-Systemen ist die mittlere Zwischenankunftszeit der Fördertechnik t_{ZAZ-FT} eine weitere maßgebliche Größe. Diese wird durch den Durchsatz der verbindenden Fördertechnik des Lagers vorgegeben. Aus diesem Grund wird folgend die Durchsatzberechnung für Förderstrecken erläutert.

Ein vernetztes Materialflusssystem wird für die Berechnung in einzelne Förderstrecken zerlegt, die getrennt untersucht werden müssen. Für jede Förderstrecke sind die Quelle, die als Ausgangspunkt der Fördereinheiten angesehen wird, sowie die Senke festgelegt. 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. So mit berechnet sich der Durchsatz λ einer Förderstrecke im einfachsten Fall aus der Geschwindigkeit v sowie dem Abstand s der Fördereinheiten [ARF07].

$$\lambda = \frac{v}{s} \left[\frac{1}{ZE} \right] \quad (7.179)$$

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 gerader Strecke entsteht ein Abstand, wenn die Fördereinheiten beispielsweise in einer Kurve auseinandergeschoben werden. Bei Förderstrecken, die in Lagersystemen mehrere Gassen bedienen, 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 ebenfalls bestimmt werden muss. Der maximale Abstand auf der betrachteten Förderstrecke ist für die Durchsatzberechnung maßgeblich.

b) Transportknoten

In WzP-Systemen besteht die eingesetzte Fördertechnik in der Regel nicht nur aus einfachen Förderstrecken, sondern auch aus Kreuzungspunkten von Förderstrecken, die allgemein als Transportknoten bezeichnet werden. An diesen Förderelementen werden einzelne Materialströme zu einem Strom zusammengeführt (Sammelement bzw. Merge), oder ein Materialstrom wird in mehrere Teilströme aufgeteilt (Verteilelement). Es ist zudem möglich, dass mehrere Materialströme in einem Transportknoten auf unterschiedliche Richtungen verteilt werden. In diesem Fall spricht man von einem Komplexknoten.

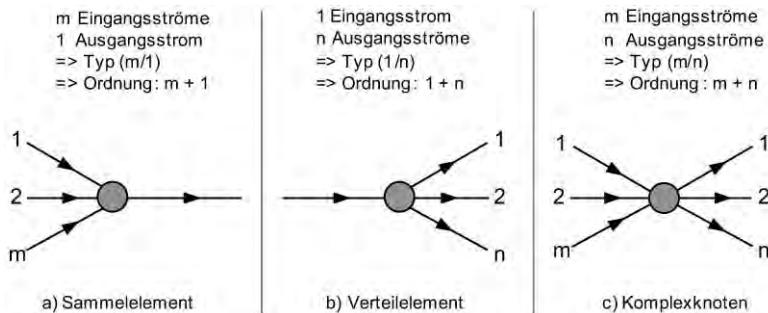


Abb. 7.23 Formen von Transportknoten

Das Verfahren zur Berechnung von Transportknoten wurde von Großeschallau in [GRO84] ausführlich dargestellt. Die folgenden Ausführungen basieren auf dieser Veröffentlichung. Es wird daher im Weiteren von einer Nennung des Autors abgesehen.

Ein Knoten hat E_m Eingangspunkte mit $m = 1, 2, 3, \dots$ und A_n Ausgangspunkte mit $n = 1, 2, 3, \dots$. Alle Ströme durchlaufen einen gemeinsamen Konfliktbereich, wodurch theoretisch jeder Eingang mit jedem Ausgang verbunden sein könnte. So mit 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 .

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 $n = 1$, so liegt ein Sammlelement vor; ist $m = 1$ und $n > 1$, so handelt es sich um ein Verteilelement (Abb. 7.23). Für den Komplexknoten gilt $m > 1$ und $n > 1$. Die Ordnung wird durch die Summe der ein- und ausgehenden Ströme, d. h. $m + n$ definiert.

Transportknoten, die nicht mehr in kleinere Einheiten zerlegt werden können, werden als irreduzible Transportknoten bezeichnet. Jeder reduzible Transportknoten setzt sich aus irreduziblen Transportknoten, also aus Sammel- und Verteilelementen sowie Komplexknoten zusammen. Ein Beispiel für einen reduzierbaren Transportknoten stellt die Kreuzung einer Elektrohängebahn dar (Abb. 7.24).

Allgemein kann ein Transportknoten als Konfliktbereich bezeichnet werden, um dessen Nutzung mehrere Objekte konkurrieren. Betrachtet man m Quellen und n Senken eines Materialflusssystems, 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. Abb. 7.25 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

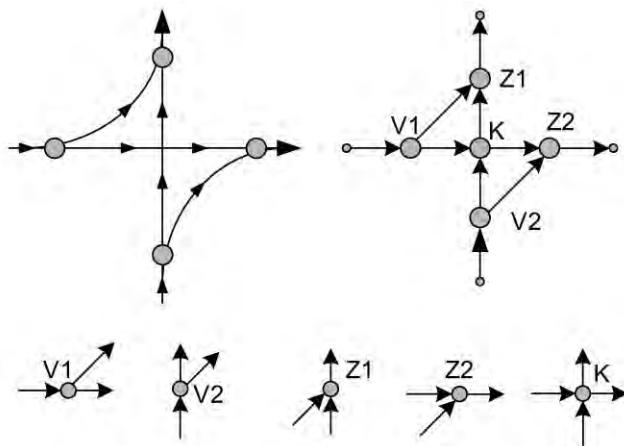


Abb. 7.24 Zerlegung eines reduziblen Komplexknotens in irreduzible Bestandteile

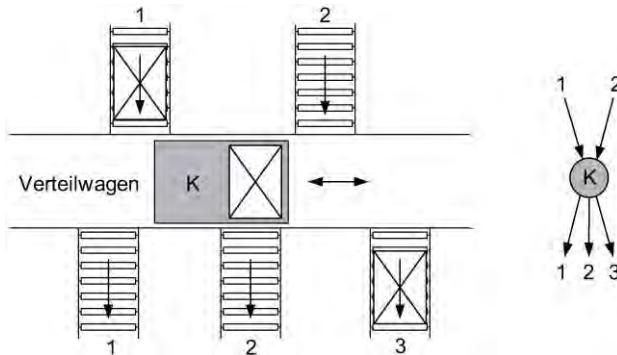


Abb. 7.25 Transportknoten mit Verteilwagen vom Typ (2,3)

theoretisch maximale Durchsatz erreicht. Ziel ist es, die mittlere Zwischenankunftszeit t_{ZAZ-TK} der Objekte zu ermitteln, bei der ein Konfliktbereich gerade zu 100 % ausgelastet ist.

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

- stetig
- unstetig
- halbstetig

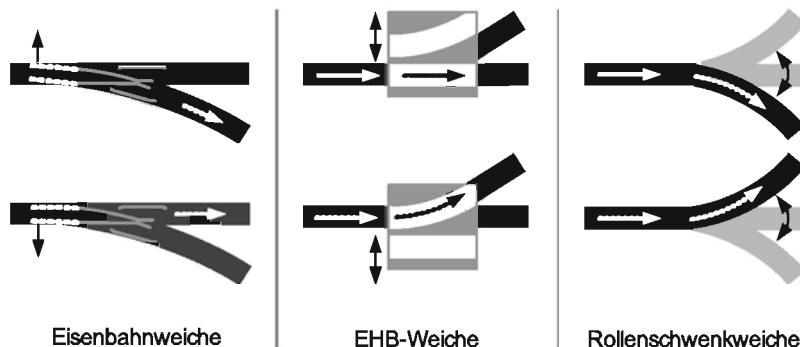


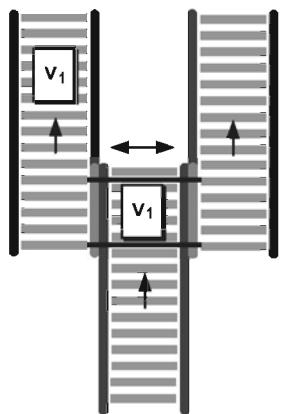
Abb. 7.26 Stetige Transportknoten der Ordnung 3 und 4

Bei der *stetigen Abfertigung* passieren die Objekte aller Richtungen den Konfliktbereich mit konstanter Geschwindigkeit. 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. 7.26).

Die *unstetige Abfertigungsart* zeichnet sich durch eine systembedingte Unterbrechung des stetigen Flusses aus. Das heißt, dass alle Objekte beim Durchlauf des Konfliktbereichs mindestens ein Mal 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.

Abb. 7.27 zeigt ein unstetiges Verzweigungselement in Form eines Kettenauschleusers 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, da sich bei größeren Kapazitäten keine Steigerung des Durchsatzes mehr erzielen lässt. Der Durchsatz kann sich sogar gegenüber $c = 1$ verringern, wenn die volle Kapazität der Weiche nur sehr selten ausgenutzt wird.

Die *halbstetigen Transportknoten* bestehen aus stetigen und unstetigen Transportrichtungen. Sie besitzen in der Regel eine stetige und mindestens eine unstetige Abfertigungsrichtung. Die angegebene Kapazität bezieht sich bei der halbstetigen Abfertigung nur auf die unstetigen Richtungen (Abb. 7.28). Bei allen drei technischen Ausführungen muss bei der Zusammenführung mehrerer Ströme die Reihenfolge, in der die Objekte unterschiedlicher Richtungen den Konfliktbereich nutzen,



Kettenausschleuser

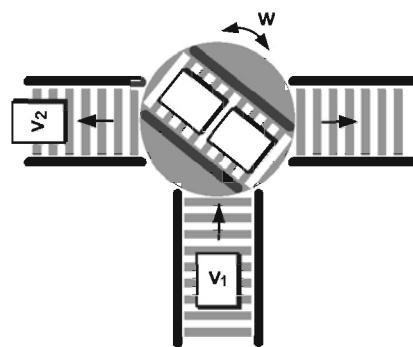
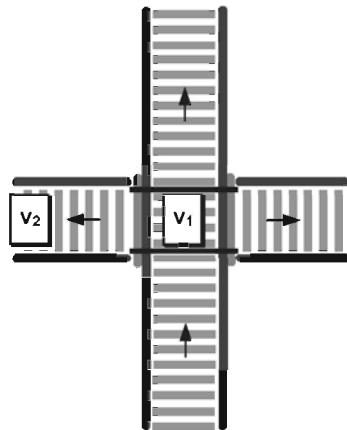
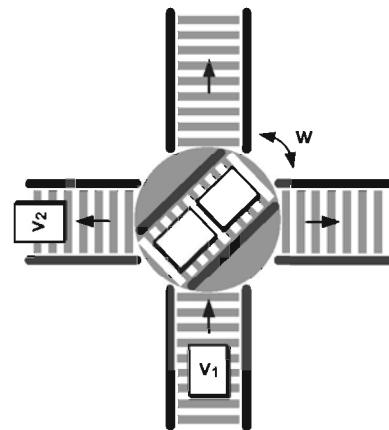
Rollenbahn-Drehtisch mit $c = 2$

Abb. 7.27 Beispiele für die unstetige Abfertigung



Zweiseitiger Kettenausschleuser



Rollenbahn-Verteilwagen

Abb. 7.28 Beispiele für die halbstetige Abfertigung

festgelegt werden. Es werden drei Strategien bei der Reihenfolgebildung unterschieden:

- stochastisch
- schubweise (fest oder variabel)
- Vorfahrt (absolut oder relativ)

Die *stochastische Abfertigung* entspricht dem Prinzip des FIFO. 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

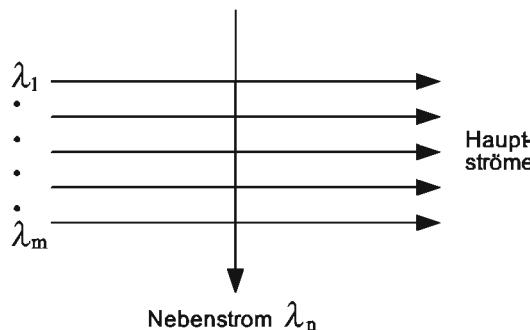


Abb. 7.29 Vorfahrtberechtigte Ströme $\lambda_1 \dots \lambda_m$ und der Nebenstrom λ_n

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 fester Zeitintervall zur Nutzung des Konfliktbereichs zur Verfügung gestellt. Während der zugeteilten 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 zugeteilten Stromes 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 Stromstärken dem Verhältnis der Zuteilungszeiten 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 eingestellte Zeitintervall repräsentiert damit den Zeitpunkt, nach dem dem aktuellen Strom spätestens das Zugriffsrecht entzogen wird und auf den nächsten Strom umgeschaltet wird.

Liegen Ströme mit unterschiedlichen Prioritäten vor, wird häufig die *Vorfahrtstrategie* angewendet. Hierbei werden die Ströme in Haupt- und Nebenströme eingeteilt. Der oder die Hauptströme haben die Priorität eins und sind gegenüber den Nebenströmen vorfahrtberechtigt. Die Abfertigung des oder der Nebenströme kann nur dann erfolgen, wenn kein Objekt der Hauptströme den Konfliktbereich für sich beansprucht (Abb. 7.29). 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 Bruttozeit τ_B zwischen zwei Objekten des Hauptstroms abhängig.

Bei absoluter Vorfahrt ergibt sich die erforderliche Bruttozeitlücke durch die Addition der Durchlaufzeit τ_j eines Objektes des Hauptstroms durch den Konfliktbereich, der Umschaltzeit von der Hauptstromrichtung zur Nebenstromrichtung, die allgemein mit z_{ij} bezeichnet wird, und der Durchlaufzeit des Objektes des Nebenstroms τ_N . Bei relativer Vorfahrt entspricht die Bruttozeitlücke gerade der Durchlaufzeit τ_j eines Objektes des Hauptstroms durch den Konfliktbereich. Es gilt

$$\tau_B = \begin{cases} z_{ij} + \tau_j + \tau_N & \text{absolute Vorfahrt} \\ \tau_j & \text{relative Vorfahrt} \end{cases} \quad (7.180)$$

mit

- τ_B = Bruttozeitlücke
- z_{ij} = Umschaltzeit von der Hauptstromrichtung auf die Nebenstromrichtung und umgekehrt
- τ_j = minimale Durchlaufzeit für das nächste Objekt der Stromrichtung j
- τ_N = Durchlaufzeit für das Objekt des Nebenstroms
- $\tau_B - \tau_j$ = Nettozeitlücke

Abb. 7.30 zeigt den Zusammenhang zwischen der Bruttozeitlücke und den entsprechenden Zeitanteilen für die absolute und die relative Vorfahrt.

Für den Durchlauf von n Objekten der Nebenstromrichtung ergibt sich die Bruttozeitlücke zu

$$\tau_B = \begin{cases} z_{ij} + \tau_j + n \cdot \tau_N & \text{absolute Vorfahrt} \\ \tau_j + (n - 1) \cdot \tau_N & \text{relative Vorfahrt} \end{cases} \quad (7.181)$$

Zur Berechnung der Zwischenankunftszeit t_{ZAZ-TK} , bei der ein Transportknoten gerade zu 100 % ausgelastet ist, 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 Stromes i den Knoten durchlaufen. Dieser maximale Durchsatz wird als partielle Grenzleistung μ_i [1/h] definiert. Die partielle Grenzleistung ergibt sich direkt aus der minimalen mittleren Zwischenankunftszeit τ_i der Objekte des Stromes i .

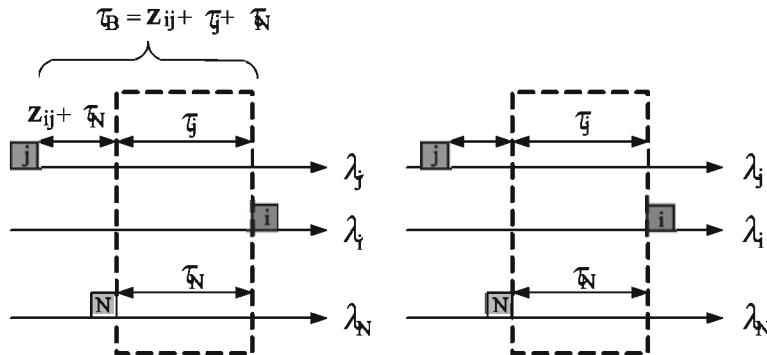


Abb. 7.30 Zeitlücken im Hauptstrom bei Vorfahrt

Es gilt

$$\mu_i = \frac{1}{\tau_i} \quad (7.182)$$

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

$$\frac{\lambda_i}{\mu_i} = \rho_i \quad (7.183)$$

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

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \dots + \frac{\lambda_k}{\mu_k} \leq 1 \quad (7.184)$$

Bei einem Wechsel von der Betriebsart i auf die Betriebsart j entstehen Verlustzeiten durch den Umschaltvorgang. Der Verlustzeitanteil hängt von der Umschaltfrequenz v , 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 in (7.184) berücksichtigt werden. Damit ergibt sich

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \dots + \frac{\lambda_i}{\mu_i} + f \leq 1 \quad (7.185)$$

Dieser Zusammenhang wird auch als das allgemeine Materialflussgesetz bezeichnet. Für den Fall, dass zwei Ströme zusammengeführt werden, lässt sich der Zusammenhang aus (7.184) auch in die Form

$$\lambda_1 \leq \left(1 - \frac{\lambda_2}{\mu_2}\right) \cdot \mu_1 \quad (7.186)$$

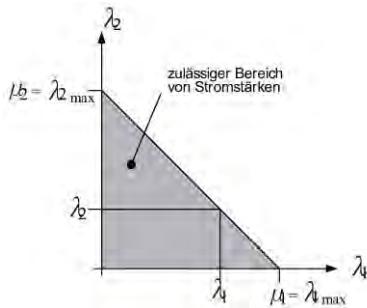


Abb. 7.31 Grenzleistungsdiagramm ohne Verlustzeiten

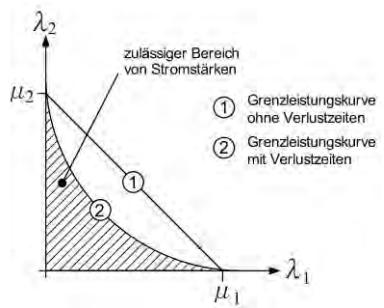


Abb. 7.32 Grenzleistungsdiagramm mit Verlustzeiten

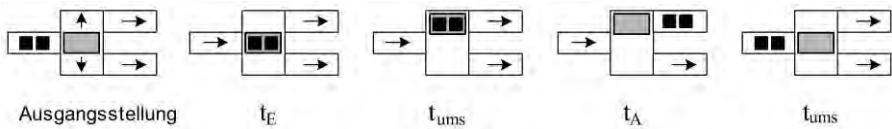


Abb. 7.33 Zyklus eines Verschiebewagens der Kapazität $c=2$

überführen. Sind μ_1 und μ_2 bekannt, lässt sich die Abhängigkeit der Materialstromstärken durch ein Grenzleistungsdiagramm gemäß Abb. 7.31 darstellen. Werden die Verlustzeitanteile berücksichtigt, ergibt sich das Grenzleistungsdiagramm für einen Transportknoten der Ordnung 3 gemäß Abb. 7.32.

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

$$\tau_i = \frac{s_o}{v} \quad (7.187)$$

Bei der unstetigen Abfertigungsart entspricht τ_i der Zykluszeit zur Bearbeitung von c Objekten. Dies soll am Beispiel eines Verschiebewagens (Abb. 7.33) erläutert werden.

Zunächst fahren c Objekte der Stromrichtung 1 in der Zeit t_E in den Verschiebewagen ein. Anschließend verfährt der Verschiebewagen in der Zeit t_{ums} zur Ausgangsrichtung. Die c Objekte fahren in der Zeit t_A aus dem Konfliktbereich heraus. Anschließend verfährt der Verschiebewagen zurück in die Ausgangsstellung. Damit ergibt sich τ_i zu

$$\tau_i = t_E(c) + t_{ums} + t_A(c) + t_{ums} \quad (7.188)$$

Die partielle Grenzleistung eines Stromes ist bei unstetiger Abfertigung von der Kapazität c des Konfliktbereichs 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

- Objekt für Austrittspunkt A1
- Objekt für Austrittspunkt A2

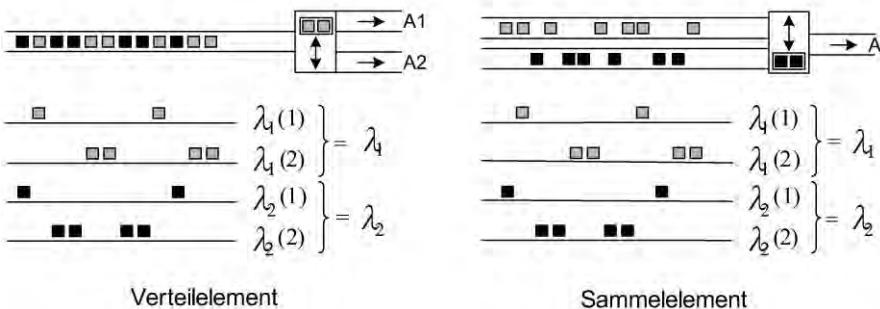


Abb. 7.34 Prinzip der Flusszerlegung am Beispiel eines Verteilwagens mit der Kapazität $c=2$ [GRO84]

$\lambda_i = \sum_{x=1}^{c_i} \lambda_i(x)$ 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 7.34). Für das allgemeine Materialflussgesetz ergibt sich somit

$$\sum_{i=1}^k \sum_{x=1}^{c_i} \frac{\lambda_i(x)}{\mu_i(x)} + f \leq 1 \quad (7.189)$$

Um den Durchsatz eines Transportknotens bestimmen zu können, muss abschließend der funktionale Zusammenhang für f bestimmt werden. Die Verlustzeit ergibt sich aus der Umschaltfrequenz v_{ij} multipliziert mit der Zeit, die beim Wechsel der Betriebsart tatsächlich „verloren“ geht. Diese Zeit wird als charakteristische Zwischenzeit t_{ij}^{ver} bezeichnet. 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

$$t_{ij}^{ver} = \begin{cases} 0 & \text{für } \tau_j \geq t_{ij}^{ums} + t_j^{bel} \\ t_{ij}^{ums} + t_j^{bel} - \tau_j & \text{für } \tau_j < t_{ij}^{ums} + t_j^{bel} \end{cases} \quad (7.190)$$

mit

- 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 Objektes der Richtung j
- τ_j = minimaler Zeitabstand von zwei Objekten der Richtung j

Abb. 7.35 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

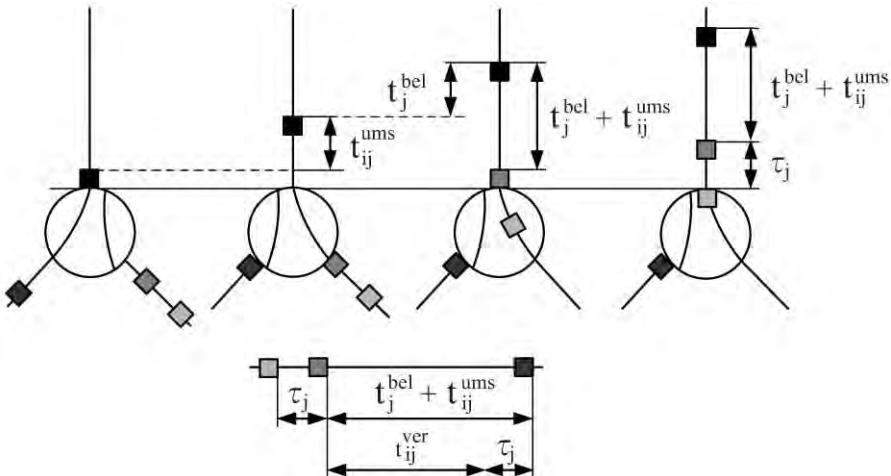


Abb. 7.35 Ermittlung der charakteristischen Zwischenzeit

Materialflussgesetz kann damit durch die Formel

$$\sum_{x=1}^k \sum_{i=1}^{c_i} \frac{\lambda_i(x)}{\mu_i(x)} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k v_{ij} \cdot t_{ij}^{ver} \leq 1 \quad (7.191)$$

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

1. stochastische Abfertigung, unstetig

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

$$\lambda_i(x) = p_i(x) \cdot \lambda \quad (7.192)$$

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: zunächst der Fall, dass die Anzahl der abgefertigten Objekte kleiner ist als die Kapazität c_i , weiterhin der Fall, dass die für den Strom i an kommende Anzahl Objekte größer oder gleich c_i ist.

$$p_i(x) = \begin{cases} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^x \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_i}{\lambda}\right) & \text{für } x < c_i \\ \left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^{c_i} & \text{für } x \geq c_i \end{cases} \quad (7.193)$$

Der Faktor $\left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^x$ gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass x Objekte des Stromes 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. Nach Einsetzen des Terms für $p_i(x)$ in (7.192) ergibt sich

$$\lambda_i(x) = \begin{cases} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^x \cdot (\lambda - \lambda_i) & \text{für } x < c_i \\ \left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^{c_i} \cdot \lambda & \text{für } x \geq c_i \end{cases} \quad (7.194)$$

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

$$v_{ij} = p_{ij} \cdot \lambda \quad (7.195)$$

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

$$p_{ij} = \frac{\lambda_i}{\lambda} \cdot \frac{\lambda_j}{\lambda} \quad (7.196)$$

Für v_{ij} ergibt sich nach dem Einsetzen von p_{ij}

$$v_{ij} = \frac{\lambda_i \cdot \lambda_j}{\lambda} \quad (7.197)$$

Einsetzen von (7.194) und (7.197) in das allgemeine Materialflussgesetz liefert für die stochastische, unstetige Abfertigung

$$\sum_{i=1}^k \left\{ \left[\sum_{x=1}^{c_i-1} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda} \right)^x \cdot \frac{\lambda - \lambda_i}{\mu_i(x)} \right] + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda} \right)^{c_i} \cdot \frac{\lambda}{\mu_i(c_i)} \right\} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_i \cdot \lambda_j}{\lambda} \cdot t_{ij}^{ver} \leq 1 \quad (7.198)$$

Zur Berechnung des maximal möglichen Durchsatzes Q bzw. der minimalen Zwischenankunftszeit t_{ZAZ-TK} eines Knotens müssen die Anteile der Einzelströme p_i am Gesamtstrom bekannt sein. Für den Fall der maximalen Auslastung wird die linke Seite aus (7.198) zu 1. Für den maximalen Durchsatz gilt dann

$$\lambda_{max} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^k \left\{ \left[\sum_{x=1}^{c_i-1} p_i^x \cdot \frac{1-p_i}{\mu_i(x)} \right] + p_i^{c_i} \cdot \frac{1}{\mu_i(c_i)} \right\} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}^{ver} \right\} = 1 \quad (7.199)$$

Mit

$$\lambda_{max} = \frac{1}{t_{ZAZ-TK}} \quad (7.200)$$

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

$$t_{ZAZ-TK} = \cdot \sum_{i=1}^k \left\{ \left[\sum_{x=1}^{c_i-1} p_i^x \cdot \frac{1-p_i}{\mu_i(x)} \right] + p_i^{c_i} \cdot \frac{1}{\mu_i(c_i)} \right\} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}^{ver} \quad (7.201)$$

2. stochastische Abfertigung, stetig

Bei stetiger Abfertigung entfällt eine Betrachtung der Kapazität c , wodurch sich (7.191) zu

$$\sum_{i=1}^k \frac{\lambda_i}{\mu_i} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_i \cdot \lambda_j}{\lambda} \cdot t_{ij}^{ver} \leq 1 \quad (7.202)$$

vereinfacht. Für die maximale Stromstärke λ_{max} gilt bei bekannten Materialstromanteilen p_i der Zusammenhang

$$\lambda_{max} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}^{ver} \right\} = 1 \quad (7.203)$$

Mit (7.200) ergibt sich die minimale Zwischenankunftszeit zu

$$t_{ZAZ-TK} = \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}^{ver} \quad (7.204)$$

3. 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

$$T_z = \sum_{i=1}^k T_i + \underbrace{\sum_{j=1}^{k-1} z_{j,j+1} + z_{k,1}}_{Umschaltzeit pro Zyklus} \quad (7.205)$$

mit

- T_i = konstanter Zeitanteil, der der Richtung i zur Verfügung steht
- $z_{j,j+1}$ = Umschaltzeit zwischen der Abfertigung des Stromes j und des Stromes $j+1$
- $z_{k,1}$ = Umschaltzeit des letzten Stromes k auf den ersten Strom

Der Kehrwert der Zykluszeit T_Z wird als Umschaltfrequenz v bezeichnet. Es gilt

$$v = \frac{1}{T_Z} \quad (7.206)$$

Der Belegungsanteil eines Stromes 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

$$\frac{\lambda_i}{\mu_i(c_i)} \leq \frac{T_i}{T_Z} \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, k \quad (7.207)$$

Mit (7.206) ergibt sich

$$\frac{\lambda_i}{\mu_i(c_i)} \leq v \cdot T_i \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, k \quad (7.208)$$

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 (7.208) für jeden Strom i erfüllt, dann gilt auch der Zusammenhang

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

Auf beiden Seiten der Gleichung sind bisher die Umschaltzeiten gemäß (7.205) 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 (7.206) ergibt sich

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

Mit $T_Z \cdot v = 1$ (vgl. 7.206) vereinfacht sich der Term zu

$$\sum_{i=1}^k \frac{\lambda_i}{\mu_i(c_i)} + v \cdot \left(\sum_{j=1}^{k-1} z_{j,j+1} + z_{k,1} \right) \leq 1 \quad (7.209)$$

Sind die Materialstromanteile p_i bekannt, kann die Summe aller Teilströme λ durch

$$1 \geq \lambda \cdot \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i(c_i)} + v \cdot \left(\sum_{j=1}^{k-1} z_{j,j+1} + z_{k,1} \right)$$

$$\Leftrightarrow \lambda \leq \frac{1 - v \cdot \left(\sum_{j=1}^{k-1} z_{j,j+1} + z_{k,1} \right)}{\sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i(c_i)}} \quad (7.210)$$

beschrieben werden. Mit (7.200) ergibt sich die Bedingung für die Zwischenankunftszeit eines Transportknotens t_{ZAZ-TK} zu

$$t_{ZAZ-TK} \geq \frac{\sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i(c_i)}}{1 - v \cdot \left(\sum_{j=1}^{k-1} z_{j,j+1} + z_{k,1} \right)} \quad (7.211)$$

Um die minimale Zwischenankunftszeit t_{ZAZ-TK} zu erreichen, müssen die Zeitannteile $\frac{T_i}{T_Z}$ 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.

4. 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 Nebenstromobjekts die Zeitlücke δt zwischen zwei Objekten des Hauptstroms eine ausreichende Größe aufweisen (vgl. 7.181).

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], [ARF07])

$$\lambda_N \leq \lambda_H \cdot \bar{k} \quad (7.212)$$

Dieser Zusammenhang wird auch als das „allgemeine Materialflussgesetz bei Vorfahrt“ bezeichnet. Liegt beispielsweise ein Hauptstrom $\lambda_H = 100 \text{ [Stk/h]}$ 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 $\lambda_N = 25 \text{ [Stk/h]}$.

Definiert man k als die absolute Anzahl der Nebenstromobjekte, die zwischen zwei Hauptstromobjekten den Konfliktbereich passieren können, und p_k als die zu-

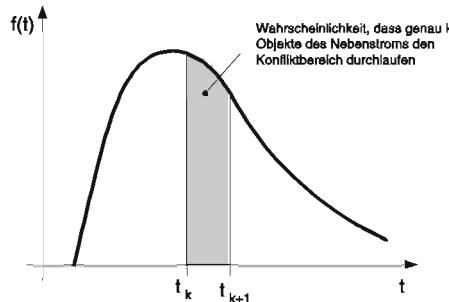


Abb. 7.36 Dichtefunktion der Zwischenankunftszeit des Hauptstroms

gehörige Eintrittswahrscheinlichkeit, dann ergibt sich die mittlere Anzahl der Nebenstromobjekte \bar{k} zu

$$\bar{k} = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot p_k \quad (7.213)$$

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

$$p_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} f(t) dt \quad (7.214)$$

beschrieben werden [ARF07]. Das Zeitintervall von t_k bis t_{k+1} beschreibt dabei die Zeitspanne, in der genau k Nebenstromobjekte den Konfliktbereich durchlaufen können (7.36). Einsetzen von (7.214) in (7.213) ergibt

$$\bar{k} = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot \int_{t_k}^{t_{k+1}} f(t) dt \quad (7.215)$$

Durch Einsetzen von (7.215) in (7.212) ergibt sich die maximale Stromstärke des Nebenstroms zu

$$\lambda_N \leq \lambda_H \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(k \cdot \int_{t_k}^{t_{k+1}} f(t) dt \right) \quad (7.216)$$

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 (7.214) 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], [ARF07]).

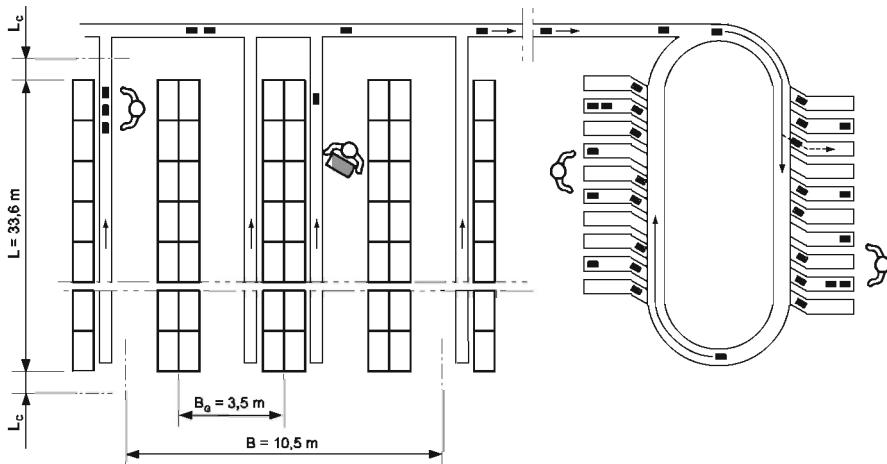


Abb. 7.37 Beispiel eines zweistufigen Kommissioniersystems

7.5 Berechnungsbeispiel

Im Folgenden wird anhand eines konkreten Beispiels ausführlich das in Abschnitt 7.1 beschriebene Berechnungsverfahren erläutert. Bei dem Beispielsystem handelt es sich um ein zweistufiges Kommissioniersystem.

Die erste Stufe wird durch ein konventionelles Person-zur-Ware-System realisiert, bei dem sich der Kommissionierer eindimensional nach der Stichgangstrategie ohne Wiederholung durch das Lager bewegt (Abb. 7.37). 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. Pro Gasse werden entsprechend $M_G = 56$ Artikel gelagert. Jeder Artikel belegt genau eine Palette im Lager. Die Lagerfachbreite beträgt $1,2 \text{ m}$. Damit ergibt sich die Gassenlänge $L = 33,6 \text{ m}$. Die Gassenbreite beträgt $B_G = 3,5 \text{ m}$. Der Abstand von der Mitte der ersten Gasse bis 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 $n = 15$. Die Zugriffshäufigkeit über den Rang der Artikel kann durch eine normierte Exponentialverteilung mit $\lambda = 3,33$ abgebildet werden. Der Erwartungswert der Exponentialverteilung ist gegeben durch $\frac{1}{\lambda} = 0,3$.

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

Tabelle 7.2 Parameter des zweistufigen Kommissioniersystems

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_G	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	0,5 $\frac{m}{s}$
mittlerer Paketabstand	s	0,7 m
Kapazität der Zusammenführungselemente	c	1
Einfahrzeit unstetige Richtung	t_{Ein}	0,5 s
Ausfahrzeit unstetige Richtung	t_{Aus}	0,5 s
Umschaltzeit unstetige Richtung	t_{Ums}	1 s
Geschwindigkeit des Kippschalensorters	v_S	2,0 $\frac{m}{s}$
Teilung des Kippschalensorters	e_S	0,6 m
Greifzeit	t_{greif}	3 s

von $v_S = 2 \text{ m/s}$ betrieben wird. Die Stückgüter belegen jeweils eine Kippschale. Die Teilung der Kippschalen beträgt $e_S = 0,6 \text{ m}$. Alle Daten sind in Tabelle 7.2 zusammenfassend dargestellt.

Berechnung der Kommissionierleistung

Die Kommissionierleistung des Kommissioniersystems ergibt sich gemäß (7.2) zu

$$P_K = \frac{1}{t_{K, System}} \quad \left[\frac{\text{Pos}}{h} \right]$$

Die Kommissionierzeit t_K eines i-stufigen Kommissioniersystems wird durch die Kommissionierzeit der Stufe k bestimmt. Es gilt gemäß (7.6)

$$t_{K, System} = t_{K,i}$$

Für $k = 2$ ergibt sich entsprechend

$$t_{K, System} = t_{K,2}$$

Die zweite Kommissionierstufe besteht aus dem Fördersystem, das die Entnahmeeinheiten aus dem Kommissionierbereich 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 Kommissionierzeit $t_{K,2}$ wie folgt berechnet werden:

nierstufe als ein WzP-System beschrieben werden. Die Bereitstellung der Entnahmeneinheiten dieses WzP-Systems wird durch die erste Kommissionierstufe realisiert. Für die Kommissionierzeit eines WzP-Systems gilt gemäß (7.5)

$$t_K = \max(t_{ZAZ-B}; t_{ZAZ-FT}; t_B) \quad (7.217)$$

Die maximale Zwischenankunftszeit des Bereitstellsystems t_{ZAZ-B} entspricht bei dem betrachteten Beispiel der Kommissionierzeit der ersten Kommissionierstufe $t_{K,1}$. Die maximale 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

$$\begin{aligned} t_{ZAZ-B} &= t_{K,1} \\ t_B &= t_{Sort} \end{aligned} \quad (7.218)$$

Damit ergibt sich die Kommissionierzeit der zweiten Stufe $t_{K,2}$ durch Einsetzen der Zusammenhänge aus (7.218) in (7.217) zu

$$t_{K,2} = \max(t_{K,1}; t_{ZAZ-FT}; t_{Sort}) \quad (7.219)$$

Berechnung von t_{Sort}

Für den gegebenen Kippschalensorter ergibt sich die Leistung zu [JtH06]

$$P_{Sort} = \lambda_{Sort,max} = \frac{v_S}{e_s} = \frac{2 \frac{m}{s}}{0,6 m} = 3,33 \frac{1}{s}$$

Die Sortierzeit pro Position erhält man durch den Kehrwert der berechneten Leistung. Damit ergibt sich t_{Sort} zu

$$t_{Sort} = 0,3 s \quad (7.220)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die Leistung des Packers an einer Endstelle als unendliche Größe angesehen wird und daher in der Berechnung keine Berücksichtigung findet.

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 (7.201)

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

Mit $k = 2$ und $c = 1$ vereinfacht sich dieser Term zu

$$t_{ZAZ-TK} = \sum_{i=1}^2 \left\{ p_i \cdot \frac{1}{\mu_i} \right\} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}^{ver}$$

Die charakteristischen Zwischenzeiten t_{12}^{ver} und t_{21}^{ver} 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 Stromes am betrachteten Knoten zu $\frac{1}{4}$. Wird die unstetige Stromrichtung mit 1 bezeichnet, dann ergibt sich

$$t_{ZAZ-TK} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\mu_1} + \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{\mu_2}$$

Die partielle Grenzleistung in stetiger Richtung ist durch die Fördergeschwindigkeit v_B und den mittleren Paketabstand s gegeben. Es gilt

$$\mu_2 = \frac{v_B}{s} = \frac{0,5 \frac{m}{s}}{0,7 m} = 0,71 \frac{1}{s}$$

Die partielle Grenzleistung des unstetigen Stromes ergibt sich aus der Einfahrzeit, der Umschaltzeit und der Ausfahrzeit. Es gilt

$$\mu_1 = \frac{1}{t_{Ein} + t_{Ums} + t_{Aus} + t_{Ums}} = \frac{1}{0,5 s + 1 s + 0,5 s + 1 s} = 0,33 \frac{1}{s}$$

Damit ergibt sich t_{ZAZ-TK} bzw. t_{ZAZ-FT} zu

$$t_{ZAZ-FT} = t_{ZAZ-TK} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{0,33} s + \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{0,71} s = 1,81 s \quad (7.221)$$

Das entspricht einer Förderleistung von 1.988 Paketen pro Stunde.

Berechnung von $t_{K,1}$

Für die Berechnung der Kommissionierzeit der ersten Stufe $t_{K,1}$ gilt die Berechnungsformel für PzW-Systeme gemäß (7.1).

$$t_K = t_Z + t_B$$

Die Zusammenführungszeit t_Z entspricht bei PzW-Systemen gemäß (7.4) der mittleren Wegzeit pro Position t_s . Die Wegzeit pro Position ist gemäß (7.18) definiert als

$$t_s = \frac{t_n}{n}$$

Die mittlere Anzahl Positionen pro Auftrag $n = 15$ 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 (A.11) aus dem Basisweg, dem Gasenweg 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 normierte Exponentialverteilung mit $\lambda = 3,33$ approximiert werden. Durch die Form der Exponentialverteilung ergibt sich damit, 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 (7.95) 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 7.2 liefert

$$s_{GW} = 2 \cdot 4 \cdot \sum_{r=1}^{10} \left[\frac{\binom{56}{r} \cdot \binom{224 - 56}{15 - r}}{\binom{224}{15}} \cdot \left(1 \text{ m} + 33,6 \text{ m} \cdot 0,3 \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right]$$

$$= 164,37 \text{ m}$$

Der Gassenwechselweg ergibt sich unabhängig von der Wegstrategie aus (7.77) zu

$$s_{GWW} = 2 \cdot \frac{n}{n+1} \cdot B = 2 \cdot \frac{15}{16} \cdot 10,5 \text{ m}$$

$$= 19,69 \text{ m}$$

Die zurückzulegende Wegstrecke ergibt sich durch Addition des Gassenweges und des Gassenwechselweges zu

$$s_n = s_{GW} + s_{GWW} = 164,37 \text{ m} + 19,69 \text{ m}$$

$$= 184,06 \text{ m}$$

Mit den berechneten Wegstrecke kann die Wegzeit ermittelt werden. Geht man davon aus, dass das Geschwindigkeit-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

$$t_n = \frac{184,06 \text{ m}}{1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}} + 15 \cdot \frac{1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2,0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 191,56 \text{ s}$$

Die Wegzeit pro Position ergibt sich durch Division mit der mittleren Anzahl Positionen pro Auftrag $n = 15$ zu

$$t_s = \frac{t_n}{n} = \frac{191,56 \text{ s}}{15} = 12,77 \text{ s}$$

Die Bearbeitungszeit t_B pro Position setzt sich gemäß (7.5) 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 ist gemäß Tabelle 7.2 mit 3 s zu kalkulieren. Die Basiszeit besteht in diesem Fall nur aus der Übernahmezeit eines neuen Auftrags. Da der Kommissionierer mit einem mobilen Datenterminal arbeitet, wird als Basiszeit eine Sekunde angenommen. Einsetzen der Werte liefert

$$t_B = 1 \text{ s} + 3 \text{ s} + 0 \text{ s} = 4 \text{ s}$$

Damit ergibt sich die Kommissionierzeit der Kommissionierstufe 1 $t_{K,1}$ aus der Addition der Wegzeit und der Bearbeitungszeit. Es gilt

$$t_{K,1}^* = t_s + t_B = 12,77 \text{ s} + 4 \text{ s} = 16,77 \text{ s} \quad (7.222)$$

Einsetzen von (7.220), (7.221) und (7.222) in (7.219) liefert die Kommissionierzeit pro Position des Systems

$$\begin{aligned} t_{K,2} &= \max (t_{K,1}^* ; t_{ZAZ-FT} ; t_{Sort}) = \max (16,77 \text{ s} ; 1,81 \text{ s} ; 0,3 \text{ s}) \\ &= 16,77 \text{ s} \end{aligned}$$

Damit ergibt sich eine Kommissionierleistung von

$$P_{K,system} = 214,67 \frac{1}{\text{h}}$$

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.

Kapitel 8

Planung von Kommissioniersystemen

Die Vorgehensweise bei der Planung von Kommissioniersystemen entspricht in ihrer Grundstruktur dem stufenweisen Ablauf zur Planung von Materialflusssystemen. Die Grundlagen der Materialflussplanung werden ausführlich in [tHSN07] behandelt. In diesem Kapitel werden die spezifischen Aspekte bei der Planung von Kommissioniersystemen themenbezogen betrachtet. Neben der Basisdatenermittlung als Grundstein jeder Planung werden relevante Kennzahlen und Parameter von Kommissioniersystemen, die im Rahmen einer Datenanalyse herausgearbeitet werden, vorgestellt. Eine Beschreibung potenzieller organisatorischer Prozessabläufe sowie verschiedener Arbeitsmittelvarianten bzw. Systemtypen ist bereits ausführlich in Kap. 5 erfolgt. Im Mittelpunkt dieses Kapitels sollen Anregungen zur geeigneten Systemauswahl in Bezug auf Technik und Organisation gegeben werden. Darüber hinaus wird für ausgewählte gängige Systemtypen eine Vorgehensweise zur Dimensionierung und Auslegung vorgestellt. Wesentlicher Parameter zur Auslegung des Systems ist die Leistung. Die analytische Berechnung der Kommissionierleistung wurde bereits in Kap. 7 umfassend behandelt. Stoßen analytische Methoden an ihre Grenzen, z. B. zur Abbildung des Zusammenspiels mehrerer komplexer Systembausteine, kann die Materialflusssimulation herangezogen werden. Sie kann in verschiedenen Stufen des Planungsprozesses eingesetzt werden und wird einführend in diesem Kapitel behandelt. Um das Prinzip der permanenten Planungsbereitschaft vollständig zu erfassen, ist ein fortwährender Systemvergleich des realisierten Kommissioniersystems mit anderen etablierten Systemen durchzuführen. Dies kann mit Hilfe des Benchmarkings von Kommissioniersystemen erfolgen. Dieser Themenkomplex wird abschließend in diesem Kapitel betrachtet.

8.1 Basisdatenermittlung und Datenanalyse

In jedem Planungsprozess, so auch in der Planung von Kommissioniersystemen, steht die Schaffung einer Planungsdatenbasis am Anfang des Projektes und ist mit erheblichem Aufwand an Personal und Kosten verbunden. Einschlägige Untersu-

Datenanalyse	
Vorgehensweise	Einflussfaktoren
1. Schritt Definition der notwendigen Datenumfänge	
2. Schritt Festlegung des Erhebungszeitraums	saisonale Einflüsse, zur Verfügung stehende Vergangenheitswerte
3. Schritt Auswahl der Erhebungsmethode: Zeltaufnahme, Multimomentstudie, Inventuranalyse, Interviewmethode, Stücklisten-, Arbeitsplan-, Absatzstatistikauswertung	Erhebungsaufwand, Datenqualität
4. Schritt Erhebungsvorbereitung: Erhebungsunterlagen, Personal, Information des Betriebes, Zeitplan	
5. Schritt Datenverdichtung und -auswertung	
6. Schritt Plausibilitätsprüfung	
7. Schritt Festschreibung als Planungsbasis durch Entscheidungsträger	

Abb. 8.1 Vorgehensweise bei der Durchführung einer Datenanalyse

chungen ergeben, dass bis zu 50 % des Aufwands beim Industriepartner auf die Datenbeschaffung entfallen [RAH01]. Erschwerend kommt hinzu, dass der Planer bis heute kaum methodische Unterstützung für die Sicherstellung der Qualität der zu verwendenden Daten einerseits sowie die Bestimmung der richtigen Menge und DetAILierung der zu verwendenden Daten andererseits erhält. Entsprechende Checklisten, Regelwerke, Handlungsanleitungen sowie Vorgehensmodelle zur gezielten Datenbeschaffung stehen meist gar nicht oder nur für spezifische Anwendungsfälle zur Verfügung. Aus diesem Grunde bietet sich eine strukturierte Vorgehensweise zu einer zielorientierten Basisdatenermittlung und Datenanalyse an. Hierbei sind bestimmte Prozessschritte zu durchlaufen, die in Abb. 8.1 aufgeführt sind und im Folgenden erläutert werden.

Zu Beginn der Basisdatenermittlung steht die Definition der notwendigen Daten sowie deren Umfänge. Hierbei stellt sich die Frage, welche Kenngrößen für den weiteren Planungsprozess entscheidend sind und welche Daten zur Ermittlung dieser Kenngrößen erforderlich sind. Wichtige Kenngrößen zur Planung von Kommissioniersystemen werden in Kapitel 8.2 thematisiert. Neben der Identifikation der erforderlichen Daten zur Ermittlung der Kenngrößen muss in einem weiteren Schritt der Betrachtungs- bzw. Erhebungszeitraum festgelegt werden. Hierbei müssen insbesondere saisonale Einflüsse und die Menge an zur Verfügung stehenden Vergangen-

Tabelle 8.1 Datenerhebungsmethoden

Methoden der Datenerhebung							
Primärerhebung					Sekundärerhebung		
Befragung			Beobachtung		Dokumentanalyse		
mündlich			manuell		automatisch		
Interview	Fragebogen	Fragebogen EDV-gestützt	Selbst-beobachtung	Messung	optisch	elektronisch	
			Fremd-beobachtung	Zählung	zeichen-orientiert	zeichen-orientiert	
				Identifikation	grafik-orientiert	grafik-orientiert	

heitswerten berücksichtigt werden, um im Zuge der Datenanalyse aussagekräftige Kenngrößen zu erzeugen. Nach der Zieldefinition und Informationsidentifikation wird die Datenerhebungsmethode ausgewählt. Bei der Auswahl einer geeigneten Methode stehen der erforderliche Erhebungsaufwand und die erzielbare Datenqualität im Vordergrund. Dabei müssen vorhandene Quellen und bestehende Anforderungen berücksichtigt werden. Die zahlreichen Methoden der Datengewinnung sind in Tabelle 8.1 aufgelistet. Für die Datenerhebung in der Kommissionierung können prinzipiell alle vorgestellten Befragungsmethoden angewandt werden. Diese müssen in einem nächsten Schritt entsprechend vorbereitet werden, damit eine gezielte Informationsgewinnung durchgeführt werden kann. Typische Fragen zur Informationsgewinnung im Bereich der Kommissionierung sind:

- Wie ist die ABC-Struktur der Artikel?
- Gibt es große Schwankungen im Zugriffsverhalten?
- Wie sieht die Lebensdauerkurve eines Artikels aus?
- Wie ist die Auftragsstruktur? (Anzahl Aufträge pro Zeiteinheit, durchschnittliche Anzahl Positionen pro Auftrag, etc.)
- Wie ist die derzeitige Kommissionierleistung pro Stunde pro Kommissionierer?
- Auf wie viele Artikel wird mehrfach zugegriffen bei einem Rundgang?
- Wie sind die Arbeitszeiten in der Kommissionierung?
- Gibt es spezielle Reihenfolgevorschriften aufgrund der Artikelstruktur bzw. Ver-sandbedingungen? (Mindesthaltbarkeitsdatum (MHD), schwere vor leichten Artikeln, etc.)
- Gibt es Vorgaben für die Durchlaufzeit eines Auftrags?
- Müssen alle Aufträge am Ende des Tages abgearbeitet sein?
- Wie sieht die Verteilung der Auftragseingänge im Tagesverlauf aus?
- Welche Tätigkeiten muss der Kommissionierer neben dem Greifvorgang durchführen?

Die Beantwortung dieser Fragen sollte sorgfältig und präzise erfolgen, da die hierbei erfolgten Angaben eine Grundlage für die Systemfindung bilden. Falsche oder sehr unspezifische Aussagen können direkte Auswirkungen auf das Lösungskonzept haben und ggf. ein System hervorrufen, das die geforderte Leistung nicht erbringen kann. Je genauer die Fragen beantwortet wurden, um so exakter können bedarfsspezifische Lösungskonzepte erarbeitet werden. Ist eine vollständige Beantwortung aller Fragen nicht möglich, so bietet sich die Beobachtung als eine weitere Methode zur Datengewinnung an.

Alle im Rahmen der Informationsgewinnung ermittelten Rohdaten müssen in einem nächsten Schritt verdichtet, analysiert und entsprechend der Aufgabenstellung gezielt ausgewertet werden. Erforderliche Rohdaten für die Durchführung einer Datenanalyse zur Planung von Kommissioniersystemen sind

- Artikelstammdaten,
- Auftragsdaten,
- Wareneingangsdaten und
- Lagerbestandsdaten.

Die Auswertung kann mittels entsprechender PC-Programme erfolgen. Zumeist werden in diesem Bereich Tools zur Tabellenkalkulation (z. B. Excel) oder Datenbankmanagementsysteme (z. B. Access oder Oracle) verwendet.

Durch die Verknüpfung von Artikelstamm- und Auftragsdaten können wichtige Kenngrößen, Zeitverläufe und Verteilungen ermittelt werden, die für die Auslegung und Dimensionierung des Kommissioniersystems ausschlaggebend sind. Die Durchführung einer Datenanalyse sollte immer auch eine Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse beinhalten, um mögliche Fehlinterpretationen und daran anschließende Fehlentscheidungen zu umgehen. Vor der Weiterführung des Planungsprozesses sollte in dieser Phase abschließend eine Festschreibung der Planungsbasis durch den Entscheidungsträger stattfinden. Aufbauend auf der Planungsbasis können dann geeignete Arbeitsmittelvarianten zusammengestellt und dimensioniert werden.

Im Folgenden werden wichtige Kennzahlen zur Planung von Kommissioniersystemen vorgestellt. Diese Kennwerte können im Rahmen einer Datenanalyse ermittelt werden und dienen als Ausgangsgrößen für den weiteren Planungsprozess.

8.2 Kenngrößen zur Planung von Kommissioniersystemen

Neben den externen Einflussgrößen, die mittelbar auf ein System einwirken (vgl. Kap. 2.8), bilden zahlreiche unternehmensspezifische Anforderungen eine wesentliche Entscheidungsgrundlage bei der Planung, Dimensionierung und Leistungsberechnung von Kommissioniersystemen. Diese Bedingungen stellen den strukturellen, kapazitiven und leistungsbezogenen Rahmen und somit die Vorgaben und Zielsetzungen bei der Planung eines Kommissioniersystems. Sie lassen sich überwiegend anhand von quantifizierbaren Kenngrößen veranschaulichen und resul-

tieren zum einen aus wirtschaftlichen Zielgrößen eines Unternehmens zur Erfüllung des Geschäftszwecks. Zum anderen werden aufgrund des großen Wettbewerbs zahlreiche servicerelevante Anforderungen hinsichtlich Zeit und Qualität gestellt. Zusätzlich zu den quantifizierbaren Betriebskenngrößen eines Kommissioniersystems gibt es weitere qualitativ ausgeprägte Kriterien, die ebenfalls Berücksichtigung bei der Planung von Kommissioniersystemen finden müssen.

8.2.1 Quantitative Kenngrößen

Strukturelle Kennzahlen

Die Anforderungen an den Systemaufbau und -ablauf beim Kommissionieren werden maßgeblich durch die Artikel- und die Auftragsstruktur gestellt. Diese Parameter beeinflussen im Wesentlichen das Lösungskonzept. In Abb. 8.2 sind die relevanten strukturellen Kenngrößen in drei verschiedenen Kategorien aufgelistet. Der Großteil dieser Kennwerte weist sowohl in Bezug auf spezifische Artikel und Aufträge als auch im zeitlichen Verlauf ihres Auftretens variierende Ausprägungen auf. Es sind neben vorhersehbaren auch zufällig auftretende und dynamische Variablen zu berücksichtigen. Die Auslegung von Kommissioniersystemen ist aufgrund der vielen variierenden Kenngrößen deshalb nur in seltenen Fällen durchgängig mit analytischen Methoden durchzuführen.

Zu den Kenngrößen aus dem Bereich der Auftragsstruktur zählen u. a. die Anzahl eingehender Kundenaufträge pro Zeiteinheit (z. B. pro Stunde oder pro Tag) sowie die Anzahl daraus erzeugter Kommissionieraufträge. Aus diesen Daten lässt sich wiederum die Anzahl der Positionen pro Kommissionierauftrag ermitteln. Neben der Kennzahl Position pro Kundenauftrag ist auch die Entnahmemenge, also die Anzahl Picks pro Position, ein planungsbestimmender Kennwert. Die Kenngröße Picks pro Position gibt die Anzahl der Greifvorgänge bei der Kommissionierung eines Artikels eines Kommissionierauftrags wieder.

Weitere wichtige Auftragsstrukturdaten sind Gewichts- und Volumenangaben eines Auftrags. Anhand dieser Angaben kann die Anzahl erforderlicher Sammelbehälter zur Kommissionierung des Auftrags abgeleitet werden. Informationen über die Kontinuität des Auftragseingangs, die gesamte Durchlaufzeit und die Terminierung eines Auftrags sind nicht zu vernachlässigen. Bei der Terminierung des Auftrags muss beispielsweise berücksichtigt werden, ob es sich um einen Eilauftrag handelt und dieser ggf. bevorzugt behandelt werden muss.

Die Artikelstruktur umfasst Angaben über die zahlenmäßige Größe des gesamten Artikelstamms sowie Informationen über spezifische Eigenschaften der einzelnen Artikel. Dazu zählen Gewichts- und Volumenangaben für jeden Artikel sowie deren Oberflächenbeschaffenheit, Chargeninformationen und Informationen über die Art des Artikels (Gefahrgut, verderbliche Güter oder hochwertige Güter). Spezifische Artikeleigenschaften erfordern eine gesonderte Behandlung bei der Planung von Kommissioniersystemen.

Tabelle 8.2 Kenngrößen für die Analyse und Gestaltung von Kommissioniersystemen (angelehnt an [VDI 3590a])

Kenngrößen von Kommissioniersystemen		
Auftragsstruktur	Artikelstruktur	Kommissionier- / Lagertechnik
Anzahl der Entnahmepositionen pro Position	Größe des Artikelstamms (Artikelanzahl)	Informationsbereitstellung (Terminal, Pickliste ...)
Anzahl der Positionen pro Auftrag	Gewicht pro Entnahmeeinheit	Fläche pro Ladeeinheit
Anzahl der Aufträge pro Zeiteinheit	Abmessung pro Entnahmeeinheit	Höhe pro Ladeeinheit
Auftragsvolumen	Umschlaghäufigkeit (Gängigkeit)	Art der Ladehilfsmittel
Auftragsgewicht	Oberfläche der Artikel	Art der Lagermittel
Wiederholhäufigkeit	Chargen	Möglichkeiten des Zugriffs
Kontinuität des Auftragseingangs (Beispiele: Express, Abholer, Terminauftrag)	Verfallbarkeit	Abmessungen (Gangbreite etc.)
Auftragsdurchlaufzeit	Gefahrgut	Greiftiefe
Terminierung der Aufträge	etc.	Greifhöhe
		Anzahl der Entnahmeeinheiten pro Ladeeinheit
etc.		Anzahl der Zugriffe pro Ladeeinheit
		etc.

Im Bereich der Kommissionierung sind darüber hinaus Angaben über die Umschlaghäufigkeit (Gängigkeit) eines Artikels relevant. Der Anteil gepickter Artikel am Gesamtbestand kann beispielsweise in Form einer ABC-Klassifizierung dargestellt werden. Der Verlauf der sogenannten Pareto-Kurve lässt für die Planung eines Gesamtsystems wichtige Schlüsse zu. Sehr häufig umgeschlagene Artikel zählen zur A-Klasse und werden auch als Schnelldreher bezeichnet. In dieser Kategorie ist meist nur ein geringer Teil des gesamten Sortiments enthalten. Der Großteil der Artikel zählt zu den sogenannten Mittel- und Langsamdrehern.

Für die Gestaltung und Auslegung von Kommissioniersystemen sind weiterhin Informationen über die Art der verwendeten Ladehilfsmittel, die Art des Lagermittels sowie die erforderliche Fläche und Höhe pro Ladeeinheit hilfreich. Hierdurch werden auch die Möglichkeiten für den Zugriff auf eine Ladeeinheit, die Greifhöhe und -tiefe sowie die Abmessungen des Kommissionierlagers vorgegeben. Weitere wichtige Kennwerte sind die Anzahl der Entnahmeeinheiten pro Ladeeinheit und die Anzahl der Zugriffe pro Ladeeinheit. Mittels der oben aufgeführten Kennwerte

lassen sich im Rahmen der Datenanalyse weitere, im Einzelfall erforderliche Kenndaten ableiten. So kann beispielsweise neben der Angabe Volumen pro Auftrag auch das Volumen pro Position oder pro Pick ermittelt werden.

Im Planungsprozess lassen sich anhand der Analyse der Auftragsstrukturdaten wichtige Schlüsse für die Auswahl des organisatorischen Systemablaufs ziehen, beispielsweise dahingehend, ob eine Sammelauftragsbearbeitung sinnvoll ist oder die Mehrzahl der Aufträge eine hohe Anzahl an Positionen hat und sich diesbezüglich für eine Einzelbearbeitung von Aufträgen eignet.

Einige aufbauorganisatorische Fragestellungen können anhand einer Auswertung der Artikelstammdaten gelöst werden. Das Sortiment kann Aufschluss über die Erfordernis unterschiedlicher Temperaturbereiche oder Handhabungsvorgänge geben. Variieren beispielsweise die Artikelabmessungen sehr stark, ist es meist schwierig, einen Systemtypen zu finden, der allen Anforderungen gerecht wird. In diesem Fall sind unter Umständen verschiedene Techniken mit unterschiedlichen Kommissionierprinzipien sinnvoll.

Betriebswirtschaftliche Kennzahlen

Die Wirtschaftlichkeit eines Kommissioniersystems sollte ebenso wie die reibungslose Funktion gewährleistet sein. Aussagen über die ökonomische Leistungsfähigkeit können Kennwerte liefern, die Informationen über die anfallenden Systemkosten beinhalten. Dazu zählen u. a. die Kommissioniekosten. Sie ergeben sich aus der Summe aller Kosten, die im Kommissionierbereich anfallen. Dazu zählen

- die Personalkosten,
- Technikkosten,
- Materialkosten,
- Raum- und Energiekosten,
- sonstige Gebäudekosten,
- Instandhaltung und
- Kapitalkosten.

Darüber hinaus können die Kommissioniekosten auch an einer festgelegten Größe gemessen werden. Anhand der Auftrags- und Artikelstrukturdaten lassen sich beispielsweise die Kommissioniekosten pro Kunden- oder Kommissionerauftrag, pro Position, pro Pick, pro Volumen- oder Gewichtseinheit berechnen.

Eine betriebswirtschaftliche Kennzahl, die zu restriktiven Vorgaben im Vorfeld einer Planung führt, ist die Höhe der geplanten Investitionskosten. Darüber hinaus sind auch die maximal beabsichtigten Betriebskosten von Bedeutung. Diese Angabe wird i. A. über die Kosten pro Pick ausgedrückt. Im späteren Verlauf der Planung kann durch diese Kennzahl der Vergleich mit anderen Systemvarianten vereinfacht durchgeführt werden.

Qualitätskennzahlen

Die Vermeidung von fehlerhaft kommissionierten Aufträgen und damit die Sicherstellung der Kommissionierqualität ist eine in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewinnende Größe. Denn eine Kommissionierung mit einer hohen Fehlerrate kann zum Vertrauensverlust der Kunden führen. Die Folge sind direkte und indirekte Kosten. Direkte Kosten entstehen durch die Rücknahme und die Retourenabwicklung der falsch kommissionierten Waren sowie der Neukommissionierung und Nachlieferung der korrekten Artikel. Indirekt entstehen dem Unternehmen Kosten durch die verringerte Anzahl an eingehenden Kundenaufträgen.

Zu Beginn einer Planung ist es sinnvoll, eine maximale Fehlerquote vorzugeben. Die Einhaltung der vorgegebenen Kommissionierqualität kann mittels verschiedener Kennzahlen erfolgen. Dadurch lässt sich ebenfalls eine Qualitätsminderung in der Kommissionierung frühzeitig erkennen.

Nach [VDI 4490] kann die Kommissionierqualität mit folgenden Kenngrößen quantifiziert werden:

- Kommissionierfehler
- Fehlmengenquote
- Trefferquote für das Zeitfenster der vorgegebenen Auftragsdurchlaufzeit
- durchschnittliche Abweichung von der vorgegebenen Durchlaufzeit

Fehler können während des gesamten Kommissionierprozesses entstehen, hauptsächlich aber bei der Entnahme von Artikeln. Es lassen sich vier verschiedene Kommissionierfehlerarten unterscheiden, die in Abb. 8.2 bildhaft dargestellt sind.

Ein Typfehler entsteht, wenn ein falscher Artikel kommissioniert wurde. Von Mengenfehlern wird gesprochen, wenn eine zu hohe oder zu geringe Anzahl eines Artikels kommissioniert wurde. Fehlt ein Artikel komplett, wurde er also beim Kommissionervorgang ausgelassen, ist ein Auslassungsfehler aufgetreten. Zustandsfehler entstehen bei falscher Artikeldeklaration, z. B. im Wareneingang, oder bei Beschädigung des Artikels.

Die Erfassung solcher Fehler erfolgt in der Regel unternehmensintern durch regelmäßige Kontrollen oder erfasste Retouren. Gemessen werden die Fehler entweder stückweise oder anteilmäßig an der Gesamtzahl der durchgeführten Kommissionieraufträge.

Nicht nur Fehlmengen oder falsch kommissionierte Artikel sind ein Maß für die Qualität in der Kommissionierung, auch der zeitliche Aspekt spielt eine wichtige Rolle. Abweichungen der tatsächlichen Durchlaufzeit von der vorgegebenen Zeit mindern ebenfalls die erbrachte Kommissionierqualität. Zeitüberschreitungen in der Kommissionierung können möglicherweise Verzögerungen bei der Auslieferung der Waren zum Kunden zur Folge haben und zum Vertrauensverlust des Kunden führen. Die durchschnittliche Abweichung von der vorgegebenen Durchlaufzeit wird anhand der Differenz der tatsächlichen durchschnittlichen Bearbeitungszeit eines Vorgangs und der vorgegebenen Bearbeitungszeit berechnet.



Abb. 8.2 Kommissionierfehler

Leistungskennzahlen

Für die Auslegung und Dimensionierung eines Kommissioniersystems ist die Vorgabe über die erforderliche Systemleistung unabdingbar. Die Leistung eines Kommissioniersystems drückt aus, wie viele Aufträge, Positionen oder Picks in einem bestimmten Zeitfenster abgearbeitet werden müssen. Überlicherweise wird die Leistung in Positionen pro Stunde angegeben.

$$\text{Kommissionierleistung} = \frac{1}{\text{Kommissionierzeit}} \left[\frac{\text{Positionen}}{\text{Stunde}} \right] \quad (8.1)$$

Zur Überprüfung, ob das geplante System den Vorgabewert seitens des Unternehmens tatsächlich einhält, kann die Leistung für bestimmte Systemtypen mittels analytischer Methoden berechnet werden. Die Ermittlung der spezifischen Leistung von Kommissioniersystemen wird in Kap. 7 vertiefend behandelt. Beeinflusst wird das zu erzielende Leistungsergebnis durch verschiedene Faktoren. Leistungsbestimmende Kennwerte sind beispielsweise die Anzahl der Mitarbeiter im Bereich der Kommissionierung und deren tägliche Arbeitszeit. Die benötigte Zeit für die Entnahme eines Artikels, auch Greifzeit genannt, spielt ebenfalls eine einflussreiche Rolle, ebenso wie die Wegzeit, d. h. die Zeit, die der Kommissionierer für die Wege zwischen den Entnahmestellen braucht und die sogenannte Basiszeit, die er zur Abgabe der Artikel und Übernahme neuer Auftragsinformationen benötigt. In automatisierten Systemen bestimmt die Anzahl durchführbarer Ein- und Auslagerspiele innerhalb einer Zeitperiode die erzielbare Kommissionierleistung.

8.2.2 Qualitative Kriterien

Die Erzielung der vorgegebenen Leistung, die Einhaltung der gesetzten Qualitätsziele und die strukturellen Vorgaben können anhand von quantifizierbaren Kennwerten ausgedrückt werden. Bei der Planung von Kommissioniersystemen sind zudem weitere Vorgaben zu berücksichtigen, deren Ausprägung jedoch nur schlecht mittels Zahlenwerten wiedergegeben werden kann, deren Erfüllung durch das geplante Kommissioniersystem aber durchaus gegeben sein sollte. Zu diesen qualitativen Kriterien zählen u. a.

- die Flexibilität,
- die Funktionssicherheit,
- die Kompatibilität und
- die Personalintensität bzw. der Automatisierungsgrad.

Um auf stark varierende Auftragsschwankungen im Verlauf einer Zeitperiode entsprechend reagieren zu können, sind flexible Kommissioniersysteme erforderlich. Die Flexibilisierung kann dabei auf mehreren Ebenen und mit verschiedenen Zeithorizonten erfolgen. Kurzfristig ist es zum einen möglich, durch eine flexible Personaleinsatzplanung die Systemleistung bedarfsgerecht anzupassen. Zum anderen kann die angewendete Kommissionierstrategie im Rahmen der Ablauforganisation (vgl. Kap. 3.3.2) entsprechend gewechselt werden.

Die Gewährleistung der Funktionssicherheit, also der Verfügbarkeit aller Systembestandteile, ist unabdingbar, da nur so die erforderliche Systemleistung erzielt werden kann. Die Funktionalität eines Kommissioniersystems wird vor der Inbetriebnahme einer Anlage mehrfach getestet.

Ein Kommissioniersystem ist, wie in Kap. 2 bereits beschrieben, ein Baustein eines kompletten Materialflusssystems. Es gibt verschiedene angrenzende Bereiche mit unterschiedlichsten Schnittstellen. Die Kompatibilität des Kommissioniersystems mit vor- und nachgelagerten Funktionsbereichen ist zwingend erforderlich, da für die Versorgung des Nachschubs im Kommissioniersystem ebenso wie für die Zusammenführung der Teilaufträge im Warenausgangs- und Versandbereich die Notwendigkeit der Vereinbarkeit von verschiedenen Techniken und Informationsflüssen besteht.

Bei der Festlegung von Zielgrößen für die Planung eines Kommissioniersystems werden auch Vorgaben für die Personalintensität bzw. den Grad der Automatisierung des Systems definiert.

Das Wissen um eine Kenngröße allein ist jedoch nicht ausreichend, um ein Kommissioniersystem zielführend zu planen. Erst das Zusammenspiel von mehreren Kennwerten ermöglicht die Erstellung eines entsprechenden Anforderungsprofils für das gesamte Kommissioniersystem und schließlich eine optimale Systemgestaltung durch eine gezielte Entscheidungsfindung.

8.3 Entscheidungsfindung in der Kommissionierung

Wie sich bereits in den vorhergehenden Kapiteln andeutete, gibt es für nahezu jedes Kommissioniersystem eine Vielzahl von Planungsvarianten. Entscheidungsgrundlage für die richtige Auswahl von Technikelementen und Organisationsform bilden Strukturdaten, die bereits im vorangehenden Kap. 8.2 ausgeführt und erläutert wurden. Anregungen für die Auswahl einer geeigneten Organisationsform anhand verschiedener Kriterien wie z. B. Auftrags- und Sortimentsgröße gibt Tabelle 8.3. In diesem Abschnitt sollen Anregungen und Hilfestellungen für die Grobplanung zur technischen Systemauswahl gegeben werden. Eine allgemeingültige Lösung zur Auswahl eines Kommissioniersystems kann jedoch nicht gegeben werden, da keine unternehmensspezifischen Anforderungen Berücksichtigung finden. In Tabelle 8.4 ist eine Eignungsmatrix dargestellt. Dort werden die in Kap. 5 vorgestellten Systemtypen in einer zweidimensionalen Matrix in Bezug auf ihre Eignung für bestimmte Systemanforderungen angeordnet. Als Kriterien wurden dabei die Umschlaghäufigkeit (Schnell-, Mittel- und Langsamdreher) sowie die Artikeldimensionen (sehr klein, klein, mittel und groß) zugrunde gelegt. Die Sortimentsgröße und die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Artikels in einem Kommissionierauftrag sind hierbei in der Kenngröße Umschlaghäufigkeit impliziert:

- *Schnelldreher* sind Artikel, die sehr häufig kommissioniert werden, aber einen geringen Anteil am gesamten Sortiment ausmachen.
- *Mitteldreher* sind Artikel, die weniger häufig gepickt werden und einen mittelgroßen Anteil am gesamten Sortiment ausmachen.
- *Langsamdreher* sind Artikel, die selten nachgefragt werden, jedoch den Großteil des Sortiments ausmachen.

Eine feinere Segmentierung der Matrix und damit eine noch detailliertere Zuordnung der Systemtypen kann durch das Hinzuziehen weiterer Kriterien erzeugt werden. Die Anzahl zu bearbeitender Positionen pro Stunde ist beispielsweise ein sinnvolles Kriterium für die Ausweitung der Eignungsmatrix in eine dritte Dimension. Um für diesen Fall Aussagen über eine sinnvolle Auswahl der Systemtypen zu treffen, müssen jedoch noch weitere Untersuchungen vorgenommen werden.

Betrachtet man die Eignungsmatrix, kann grundsätzlich festgehalten werden, dass sich personalintensive Systemtypen mit statischer Artikelbereitstellung für leistungsstarke Systeme eignen. Dies ist auf ihre Flexibilität in Bezug auf variierende und steigende Leistungsanforderungen zurückzuführen, denn die Leistung des Systems kann hier leicht durch eine Aufstockung des Personals gesteigert werden.

Eine dynamische Artikelbereitstellung ist für Schnelldreher eher ungeeignet, da es sich in den meisten Fällen aus zeitlichen Gesichtspunkten nicht lohnt, Schnelldreher wieder mittels Fördertechnik zurückzulagern. Diese Artikel müssen ständig in ausreichender Menge verfügbar und in Reichweite des Kommissionierers vorhanden sein. Diese Restriktion ist für Schnelldreher nur in Kommissioniersystemen mit statischer Artikelbereitstellung gewährleistet. Für sehr kleine Artikel eignen sich in diesem Segment Kommissioniernester. Hier werden alle Artikel in Reichweite des Kommissionierers bereitgestellt und können binnen kurzer Zeit kommissioniert

Tabelle 8.3 Leistungsmerkmale der Organisationsform [JÜS99]

		Organisationsform					
		Aufbau		Ablauf			
		einzig	mehrzönig	auftragsweise	artikelweise	serial	parallel
Kriterium							
Unterschiede in Artikeleigenschaften und Anforderungen	Sortiment	klein		■	■	■	■
		groß		■	■	■	■
kurze Auftragsdurchlaufzeit			■	■	■		■
Auftragsvolumen je Auftrag	Positionen pro Auftrag	wenige	■	■	■	■	■
		viele	■	■	■	■	■
Auftragseingang	Auftragseingang	kontinuierlich	■	■	■	■	■
		diskontinuierlich	■	■	■	■	■
Einbeziehung von Eilaufträgen			■	■	■	■	■
hohe Wiederholhäufigkeit einzelner Artikel			■	■	■	■	■
organisatorischer Aufwand			■	■	■	■	■
hohe Entnahmefreileistung			■	■	■	■	■
Möglichkeit des Bezugs zum Kundenauftrag			■	■	■	■	■
				■ günstig	■ indifferent	□ ungünstig	

werden. Für Artikel mit kleinen bis mittleren Abmessungen sind Durchlaufregalfronten geeignet. Die Artikel können hier übersichtlich und griffbereit gelagert werden. Der Nachschub ist bei diesem Systemtyp durch die Lagerung in sortenreinen Kanälen gewährleistet. Zudem kann mittels visueller Unterstützung durch Pick-by-light-Anzeigen und durch eine Begrenzung des Arbeitsbereichs eines Kommissionierers eine hohe Pickleistung realisiert werden. Für größere Ladungsträger, z. B. Paletten, bieten sich im Schnelldrehersegment die Bodenzeilenlagerung oder der sogenannte Kommissioniertunnel an. Ein Kommissioniertunnel mit integriertem automatisiertem Nachschublager garantiert die ständige Verfügbarkeit eines Artikels. Ein weiteres Kommissioniersystem aus dem Hochleistungssektor ist der sogenannte Schachtkommissionierer. Er eignet sich allerdings nur für die Kommissionierung von kleinen formstabilen Gütern mit einem geringen Gewicht und wird oftmals im Pharmagroßhandel eingesetzt.

Ein leistungsstarker Systemtyp ist darüber hinaus das zweistufige Kommissionieren mit Pick-to-belt. Diese Methode eignet sich für Unternehmen mit einem breiten Sortiment und vielen Aufträgen (> 1.000 pro Tag) mit wenigen Positionen (2 bis 5 Positionen pro Auftrag) und kleinen Entnahmemengen (bis 10 Stück) [GUD05].

Eine sehr einfach und ohne hohen technischen Aufwand umzusetzende Variante ist das konventionelle Kommissionieren aus Fachbodenregalen. Hier kann eine Vielzahl von Artikeln in geringen Mengen im Kommissioniersystem bevorratet werden. Die Anordnung der Regale erfolgt nach dem Prinzip der Zeilenlagerung. Da sich der Kommissionierer oft gassenweise durch das System bewegt, um alle Positionen in einem Rundgang zu kommissionieren, ist in solchen Systemen die erforderliche Wegzeit zur Auftragsfertigstellung der leistungsbeschränkende Faktor. Ein unmittelbarer, schneller Zugriff auf alle Positionen eines Auftrags ist hier nicht gewährleistet, deshalb empfiehlt sich ein Einsatz für Mittel- bis Langsamdreher. Schnelldreher können durch eine Kombination von Durchlauf- und Fachbodenregalen integriert werden. Weiterhin können durch Implementierung von Steigfördertechnik und einzelnen Arbeitsstationen die langen Wegzeiten reduziert werden.

Nachteile von Person-zur-Ware-Systemen sind zum einen die hohen Betriebskosten und zum anderen der hohe Flächenbedarf. Da die Mehrzahl der Artikel jedoch oft nicht zum Segment der Schnelldreher gehört und damit eher selten umgeschlagen wird, ist es in vielen Fällen nicht sinnvoll, das Kommissioniersystem in der Fläche auszudehnen. In diesem Zusammenhang ist es für die Mittel- bis Langsamdreher günstiger Systeme zu realisieren, die auf geringem Raum eine hohe Lagerkapazität vorweisen und deren Fördertechnik in der Lage ist, die zu kommissionierenden Artikel bei Bedarf zur Verfügung zu stellen. In der Eignungsmatrix kommen prinzipiell alle Ware-zur-Person-Kommissioniersysteme, wie sie in Kap. 5 vorgestellt wurden, im Mittel- bis Langsamdrehersegment infrage. Liftsysteme und Paternosterregale bieten sich für sehr kleine Artikel an. Für kleine bis mittelgroße Artikel, die in Behältern gelagert werden, eignet sich ein AKL oder ein Horizontal-Umlaufregal. Artikel, die auf Paletten gelagert werden, können in einem Hochregallager mit automatischer Regalbedienung und Anbindung an mehrere Kommissionierarbeitsstationen bereitgehalten werden.

Tabelle 8.4 Eignungsmatrix für Systemtypen

Gängigkeit der Artikel	Artikeldimensionen	groß (auf Palette)				
sehr klein (in Behälter)	klein bis mittel (in Behälter)	Kommissionieren im Hochregal (Person-zur-Ware)	Kommissionierstation mit Palettenregal-Anbindung (Ware-zur-Person)			
Langsamdreher	Liftsystem / Vertikal-Umlaufregal (Ware-zur-Person)	Regalfront an AKL (Person-zur-Ware)				
Mitteldreher	Kommissionierstation mit Behälterregal-Anbindung (Ware-zur-Person)					
Schnelldreher			zweistufige Kommissionierung mit Pick-to-Belt (Person-zur-Ware)	Regalfront an AKL (Person-zur-Ware)		
		Durchlaufregal (Person-zur-Ware)			Kommissioniertunnel (Person-zur-Ware)	
				Kommissionierrest (Person-zur-Ware)		Schachtkommissionierer (automatisches System)

Als restriktive Größe bei Systemen, die nach dem Ware-zur-Person Kommissionierprinzip arbeiten, ist jedoch die geringe Flexibilität in Bezug auf Leistungsschwankungen zu sehen. Die maximale erzielbare Leistung ist durch die Leistung der installierten Fördertechnik fest vorgegeben. Eine Aufstockung der Leistung bedeutet gleichzeitig einen Ausbau des gesamten Kommissionierungsbereichs und ist kurzfristig fast nie möglich.

Müssen Artikel nur sehr selten kommissioniert werden, besteht auch die Möglichkeit der direkten Kommissionierung im Hochregal nach dem Person-zur-Ware-Prinzip. Die Installation eines separaten Kommissionierungsbereichs ist in diesem Fall nicht zweckmäßig.

Ein Systemtyp, der in Bezug auf die Gängigkeit alle Artikelklassen, die in Behältern bevorratet werden können, vereint, ist die Kommissionierung entlang der Regalfront eines AKL. Neben der dynamischen Bereitstellung von Artikeln aus dem Mittel- bis Langsamdreherbereich können auch Schnelldreher statisch in Durchlaufkanälen entlang der Regalfront bereitgestellt und automatisch mit Nachschub versorgt werden.

8.4 Dimensionierung typischer Arbeitsmittelvarianten

Die Planungsphase der Dimensionierung schließt an die Phase der Konzeptionierung an, in der sowohl Aufbau- als auch Ablauforganisation sowie Arbeitsmittelvarianten definiert werden. Die Dimensionierung ist wesentliche Grundlage für die Durchführung einer Kostenvergleichsrechnung sowie einer Nutzwertanalyse, mit deren Hilfe Arbeitsmittelvarianten sowohl qualitativ als auch quantitativ gegenübergestellt werden können, um eine Vorzugsvariante zu bestimmen.

An dieser Stelle soll exemplarisch die Grobdimensionierung von vier typischen Arbeitsmittelvarianten in der Kommissionierung erläutert werden. Aus der Gruppe der Person-zur-Ware-Kommissioniersysteme werden Fachbodenregalanlagen und Durchlaufregalmodule betrachtet. Das Automatische Kleinteilelager (AKL) mit Kommissionier-U's wird als häufig realisierter Ware-zur-Person Systemtyp erläutert. Des Weiteren wird das Vorgehen bei der Auslegung eines Sorters für die zweistufige Kommissionierung beschrieben.

Für die Durchführung der Dimensionierung muss zunächst die erforderliche Bereitstellungskapazität im Kommissioniersystem festgelegt werden. Darauf aufbauend kann dann die Auslegung einer Arbeitsmittelvariante erfolgen.

Bestimmung der Bereitstellungskapazität

Die räumliche Dimension eines Kommissioniersystems wird hauptsächlich durch die Bereitstellungskapazität sowie die Anzahl erforderlicher Bereitstellfächer bestimmt. Ein Bereitstellfach kann mehrere Bereitstellplätze beinhalten (z. B. in einem Fachbodenregal). Die Bereitstellungskapazität ist definiert als die Anzahl aller Bereitstellplätze im Kommissioniersystem. Sie ergibt sich unmittelbar aus der Anzahl Bereitstelleinheiten zur Lagerung des Kommissionierbestands aller Artikel. Bei der Bereitstelleinheit handelt es sich in der Regel um einen Ummkarton oder Ladungsträger (z. B. Behälter oder Tablar), der eine oder mehrere Einheiten eines Artikels umfasst. Beim AKL ist meist aufgrund des automatischen Handlings der Einsatz eines standardisierten Ladungsträgers erforderlich. Die Bereitstellung von Artikeln im Kommissioniersystem erfolgt stets in ganzen Bereitstelleinheiten.

Grundlage für die Bestimmung der Bereitstellungskapazität ist der Bestand eines Artikels B_i im Kommissionierlager. Dieser ergibt sich aus der vorgesehenen Lagerreichweite eines Artikels R_i und dem mittleren Verbrauch pro Artikel V_i .

$$B_i = R_i \cdot V_i \quad (8.2)$$

Die Anzahl erforderlicher Bereitstelleinheiten N_{BE} wird anhand des Lagerbestands eines Artikels B_i und des Fassungsvermögens der Bereitstelleinheit V_{BE} berechnet. Es wird vorausgesetzt, dass das Fassungsvermögen einer Bereitstelleinheit für jeden Artikel bekannt ist. Die Anzahl aller Artikel im Sortiment wird durch den Parameter M bestimmt.

$$N_{BE} = \sum_{i=1}^M \frac{B_i}{V_{BE}} \quad (8.3)$$

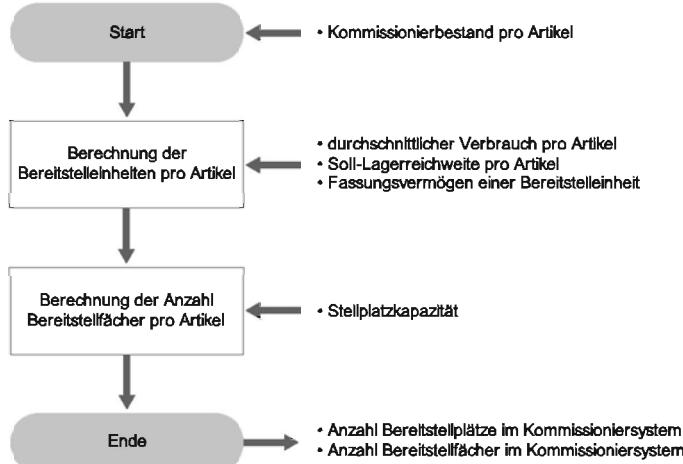
Die durchschnittliche Anzahl Bereitstelleinheiten pro Artikel N_{BE-A} ergibt sich aus der Division der Summe aller erforderlichen Bereitstelleinheiten und der Artikelanzahl M im Kommissionierlager.

$$N_{BE-A} = \frac{N_{BE}}{M} \quad (8.4)$$

Die Anzahl Bereitstellfächer N_{Fach} ergibt sich wiederum aus der Anzahl Bereitstelleinheiten pro Artikel und der Kapazität eines Bereitstellfachs c_{Fach} .

$$N_{Fach} = \frac{N_{BE-A}}{c_{Fach}} \quad (8.5)$$

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Bereitstellungskapazität ist unabhängig vom eingesetzten System und in Abb. 8.3 aufgeführt.

**Abb. 8.3** Bestimmung der Bereitstellkapazität

Dimensionierung einer Fachbodenregalanlage

Das Fachbodenregal stellt ein Regal dar, in dem die Bereitstelleneheiten meist auf geschlossenen Fachböden aus Blech nebeneinander und in mehreren Ebenen übereinander vorgehalten werden. Typischerweise besitzt ein Fachbodenregalmodul eine Breite b_{Fach} von 1 m, eine Fachhöhe h_{Fach} von 0,5 m, eine Gesamthöhe h_{FBR} von 2 m sowie eine Fachtiefe t_{Fach} von ca. 0,3 m bis 0,5 m.

Eine Fachbodenregalebene wird in der Regel in mehrere Lagerplätze eingeteilt. Eine physische Unterteilung mit Hilfe von Trenneinsätzen ist dabei seltener vorzufinden. Wesentlich flexibler ist eine optische Einteilung, bei der lediglich die Lagerplatznummern, oft zusätzlich in Form eines Barcodes kodiert, nebeneinander an der Frontseite der Bodenbleche angebracht werden. Eine Fachbodenregalanlage besteht wiederum aus mehreren hintereinander zu Regalzeilen und -gassen angeordneten Fachbodenregalen. Die Arbeitsgangbreiten A_{ST} variieren zwischen 1 m und 2,5 m je nachdem, ob Begegnungsverkehr oder der Einsatz von mechanisierten Fortbewegungsmitteln vorgesehen ist.

Bei einem Fachbodenregal wird auf jedem Bereitstellplatz eine Bereitstelleneheit bevorratet. Demnach entspricht die Anzahl erforderlicher Bereitstellplätze der Fachbodenregalanlage der Gesamtanzahl der Bereitstelleneheiten N_{BE} .

Zur Vereinfachung des weiteren Vorgehens bei der Grobdimensionierung von Fachbodenregalen werden alle folgenden Angaben pro laufendem Fachbodenregalmeter gemacht.

Die Anzahl Bereitstellplätze pro Fachbodenregalmeter N_{BE-FBR} ergibt sich aus der Anzahl horizontal nebeneinander liegender Bereitstellplätze pro Fachbodenmeter m_H und der Anzahl vertikal übereinander liegender Fachbodenebenen m_V zu

$$N_{BE-FBR} = m_H \cdot m_V \quad (8.6)$$

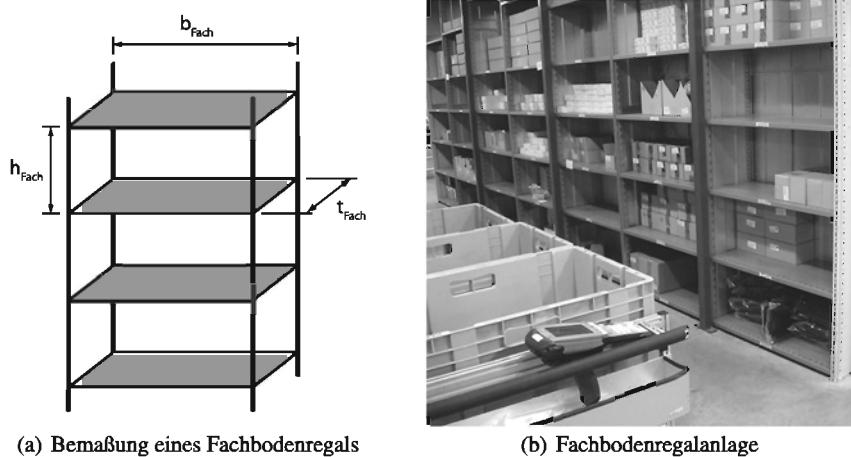


Abb. 8.4 Fachbodenregale [Foto: Vanderlande Industries]

Daraus lässt sich wiederum die Anzahl der erforderlichen Fachbodenregalmeter N_{FBR} ermitteln. Sie ergibt sich durch Division der Anzahl aller erforderlichen Bereitstelleinheiten N_{BE} mit der Anzahl Bereitstellplätze pro Fachbodenregalmeter zu

$$N_{FBR} = \frac{N_{BE}}{N_{BE-FBR}} \quad (8.7)$$

Die gesamte Bereitstelllänge L_{BL} ist dann gegeben durch (8.7) in Metern.

$$L_{BL} = N_{FBR} \quad (8.8)$$

Die Schwierigkeit bei der Dimensionierung einer Fachbodenregalanlage (Abb. 8.4) besteht darin, die Anzahl Gassen bzw. das Verhältnis von Systemlänge zu Systembreite so zu wählen, dass der Kommissionierweg minimiert wird. In der Praxis spielen Grundstücksgrenzen oder die zur Verfügung stehende Hallenfläche bei der Anordnung und Wahl der Gassenlänge eine entscheidende Rolle. Für die Grobdimensionierung ist es zunächst ausreichend, die Fachbodenregale gassenförmig auf einer Fläche mit einem Längen-Breitenverhältnis von 2 : 3 anzurufen. Die endgültige Gassenanzahl und die genaue Anordnung werden in späteren Planungsphasen festgelegt.

Dimensionierung einer Durchlaufregalanlage

Mit Hilfe von Durchlaufregalen lässt sich eine kompakte Lagerung der Bereitstellseinheiten erzielen. Die Bereitstelleinheiten werden auf zur Entnahmefront geneigten Röllchenbahnen in mehrfachtiefen artikelreinen Kanälen vorgehalten. Dadurch verfügen Durchlaufregale über eine höhere Zugriffsreserve, so dass Nachschub-

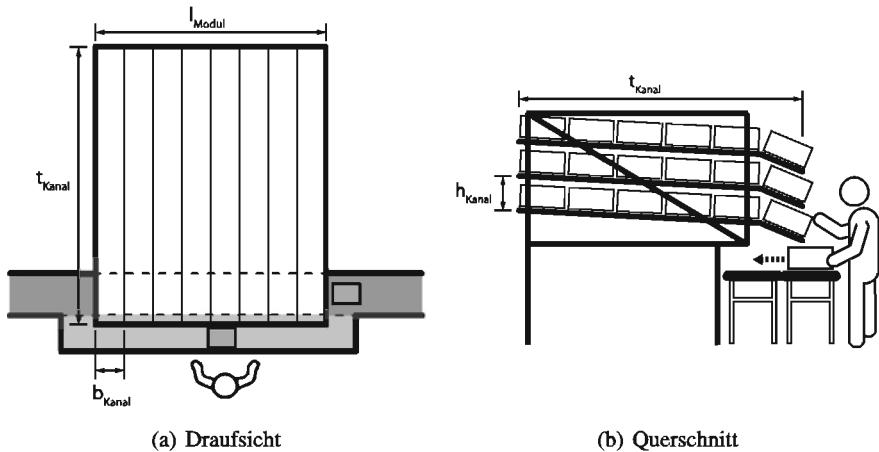


Abb. 8.5 Durchlaufregalmodul

prozesse seltener ausgelöst werden. Die Bereitstelleinheiten gleiten im geneigten Regal selbsttätig nach vorne zur Entnahmestelle. Durchlaufregalmodule bestehen aus mehreren neben- und übereinander angeordneten Durchlaufkanälen und werden oft bei der zonenseriellen auftragsweisen oder der artikelweisen Kommissionierung eingesetzt. Ein Modul, das jeweils von einem Kommissionierer bedient wird, ist in der Regel je nach Entnahmepunktdichte auf eine Länge l_{Modul} von 5 m bis 15 m beschränkt. Die Tiefe der Kanäle t_{Kanal} beträgt typischerweise ca. 3 m. Ein Kanal ist b_{Kanal} ca. 0,4 m breit und h_{Kanal} ca. 0,3 m hoch. Ein Kanal ist sortenrein belegt, d. h. alle Bereitstelleinheiten eines Artikels werden nach Möglichkeit in einem Durchlaufkanal gelagert. Müssen im Kommissioniersystem mehr Bereitstelleinheiten eines Artikels vorgehalten werden, als Plätze in einem Durchlaufkanal zur Verfügung stehen, wird ein Artikel in mehreren sortenreinen Durchlaufkanälen gelagert.

Der Kommissionierer bewegt sich entlang einer Entnahmefront, greift die geforderten Artikel aus den Bereitstelleinheiten und legt diese je nach Kommissionierprinzip entweder in einen Auftragsbehälter oder direkt auf eine angetriebene Fördertechnik (Abb. 8.5).

Da in einem Durchlaufkanal mehrere Bereitstelleinheiten gelagert werden können, kann die Anzahl der erforderlichen Bereitstellkanäle nicht direkt aus der Anzahl Bereitstelleinheiten N_{BE} abgeleitet werden. Ein Durchlaufkanal wird sortenrein belegt und verfügt über eine Kapazität c_{Kanal} . Die Kapazität eines Durchlaufkanals ergibt sich durch Division der Kanaltiefe t_{Kanal} mit der Länge einer Bereitstelleinheit l_{BE} .

$$c_{Kanal} = \frac{t_{Kanal}}{l_{BE}} \quad (8.9)$$

Im einfachsten Fall entspricht die Anzahl erforderlicher Durchlaufkanäle der Anzahl Artikel M im Kommissioniersystem. Je nachdem wie viele Bereitstelleinhei-

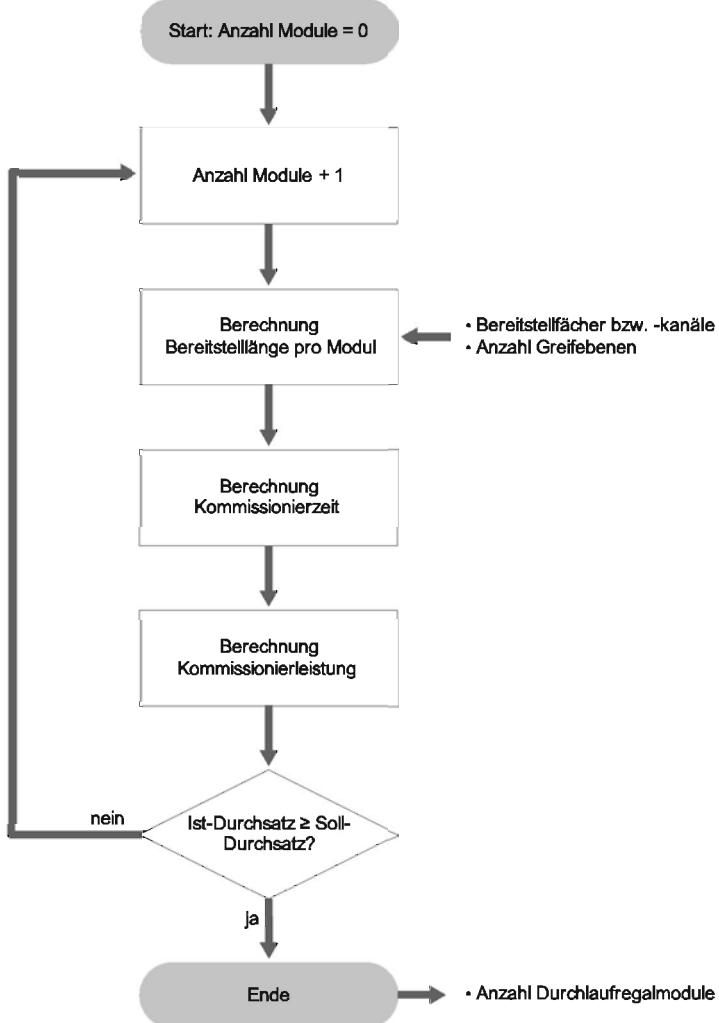


Abb. 8.6 Ablauf der Dimensionierung von Durchlaufregalmodulen

ten durchschnittlich für einen Artikel im Kommissioniersystem vorgehalten werden müssen, werden mehrere Kanäle mit einem Artikel sortenrein belegt. Es ist also eine Fallunterscheidung zur Ermittlung der erforderlichen Menge an Durchlaufkanälen notwendig.

$$N_{Kanal} = \begin{cases} M & \text{für } N_{BE-A} \leq c_{Kanal} \\ M \cdot \frac{N_{BE-A}}{c_{Kanal}} & \text{für } N_{BE-A} > c_{Kanal} \end{cases} \quad (8.10)$$

Ein Durchlaufregalmodul besteht aus m_H Kanälen nebeneinander und m_V Kanalebenen übereinander. Die Anzahl Bereitstellkanäle in einem Durchlaufregalmodul N_{BE-DLR} ergibt sich zu

$$N_{BE-DLR} = m_H \cdot m_V \quad (8.11)$$

Die Anzahl aller erforderlichen Durchlaufregalmodule N_{DLR} ergibt sich zu

$$N_{DLR} = \frac{N_{Kanal}}{N_{BE-DLR}} \quad (8.12)$$

Die gesamte Bereitstelllänge L_{BL} ist dann gegeben durch

$$L_{BL} = N_{DLR} \cdot l_{Modul} \quad (8.13)$$

Ziel der Dimensionierung von Durchlaufregalanlagen ist es, möglichst wenige Module einzusetzen, da für jedes weitere Modul ein zusätzlicher Kommissionierer erforderlich wird. Es ist naheliegend, im ersten Schritt zu prüfen, ob die vorgegebene Soll-Leistung durch einen einzigen Kommissionierer bzw. in einem Durchlaufregalmodul bewältigt werden kann. Die erforderliche Bereitstelllänge ist dabei ebenfalls zu berücksichtigen, da die Soll-Leistung evtl. durch einen Kommissionierer erbracht werden kann, die Bereitstelllänge aber unter Umständen zu sehr langen Modulen führt. Dies kann wiederum unwirtschaftlich lange Kommissionierwege pro Entnahmeposition zur Folge haben. Im Rahmen einer Iterationsrechnung gilt es, durch sukzessive Steigerung der Modulanzahl die Mindestanzahl an Modulen zu bestimmen, so dass die vorgegebene Soll-Leistung erreicht wird. In Abb. 8.6 wird dieses Vorgehen dargestellt.

Dimensionierung eines AKL

Ein AKL besteht aus einem Regalsystem mit einer oder mehreren Gassen, in denen Regalbediengeräte Artikel in Behältern oder auf Tablaren ein- und auslagern (Abb. 8.9). Ausgelagerte Lagereinheiten werden über Fördertechnik zu Kommissionierstationen, sogenannte Kommissionier-Us, transportiert. Dort entnimmt der Kommissionierer die geforderte Auftragsmenge und veranlasst den Rücktransport des Behälters zum Regalbediengerät, welches den Behälter wieder einlagert. Typische Höhen eines AKLs bewegen sich im Bereich zwischen 4 m und 18 m. Die Systeme sind für Lasten von bis zu 50 kg pro Lagereinheit ausgelegt. Die Regalbediengeräte erreichen Fahrgeschwindigkeiten v_x von max. 5 m/s und Hubgeschwindigkeiten v_y von max. 2 m/s. Die Beschleunigungswerte a_x und a_y betragen ca. 2 m/s² in Fahrtrichtung und ca. 1,5 m/s² in Hubrichtung. Eine Gasse besitzt eine Arbeitsgangbreite A_{ST} von ca. 0,75 m bis 1 m. Die Fachabmaße für einen Lagerplatz ergeben sich aus den Abmessungen des eingesetzten Behälters (b_{BE} , l_{BE} , h_{BE}), einem Fachfreimaß von 50 mm zu jeder Seite und der Steherbreite. Häufig erfolgt in einem

AKL eine Einplatzlagerung, d. h. pro Regalfach wird eine Ladeeinheit bereitgehalten.

Fachbreite:

$$b_{Fach} = b_{BE} + 2 \cdot Fachfreimaß + Steherbreite \quad (8.14)$$

Fachtiefe:

$$t_{Fach} = l_{BE} + Fachfreimaß \quad (8.15)$$

Fachhöhe:

$$h_{Fach} = h_{BE} + Fachfreimaß + Traversenbreite \quad (8.16)$$

Grundlage für die Bestimmung der Anzahl Regalbediengeräte und Gassen in einem AKL ist neben der erforderlichen Bereitstellungskapazität die zu bewältigende Soll-Leistung, gemessen in Arbeitsspielen. Aufgrund der hohen Investitionen pro Regalbediengerät sollten bei Systemen mit gassengebundenen Regalbediengeräten möglichst wenige Gassen realisiert werden. Die Bestimmung der Anzahl Gassen erfolgt im Rahmen einer Iterationsrechnung, bei der die Anzahl Gassen sukzessive erhöht wird, bis die vorgegebene Soll-Leistung erreicht wird (Abb. 8.7). Die Leistung hängt im Wesentlichen von der Spielzeit der Regalbediengeräte ab.

Für die Dimensionierung eines AKL wird zunächst die Anzahl Fächer in einer Gasse N_{FG} berechnet. Diese ergibt sich aus dem Quotienten der Anzahl Bereitstellleinheiten N_{BE} und der Gassenanzahl N_G .

$$N_{FG} = \frac{N_{BE}}{n_G} \quad (8.17)$$

Im ersten Schritt der Iterationsrechnung wird davon ausgegangen, dass alle erforderlichen Bereitstellleinheiten N_{BE} in einer Gasse gelagert werden können. Die Gassenanzahl N_G ist in diesem Fall in (8.17) gleich 1.

In einer Gasse befindet sich jeweils rechts und links eine Regalwand. Die Anzahl Lagerfächer in einer Regalwand N_{FR} ist demnach

$$N_{FR} = \frac{N_{FG}}{2}. \quad (8.18)$$

Die Anzahl Lagerfächer in einer Regalwand besteht aus einer Anzahl Lagerfächer in horizontaler Richtung m_H und einer Anzahl Lagerfächer in vertikaler Richtung m_V .

$$N_{FR} = m_H \cdot m_V \quad (8.19)$$

Das Verhältnis von Regallänge zu Regalhöhe entspricht im Optimalfall dem Verhältnis der Fahr- und Hubgeschwindigkeiten $\frac{v_x}{v_y}$. Dies ist der Fall, wenn der Regalwandparameter $\omega = 1$ ist.

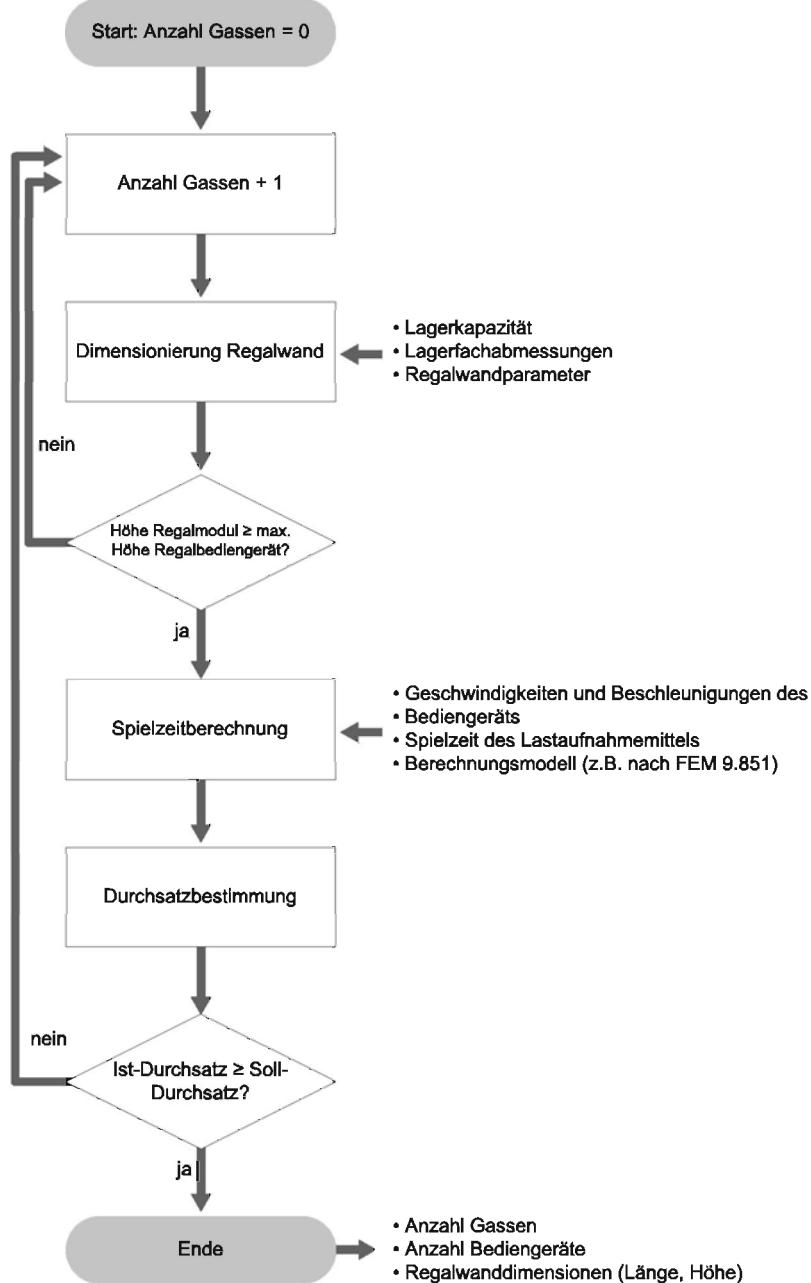


Abb. 8.7 Ablauf der Dimensionierung eines AKLs

Es gilt die Beziehung

$$\frac{L}{H} = \frac{v_x}{v_y} = \frac{m_H \cdot b_{Fach}}{m_V \cdot h_{Fach}} \quad (8.20)$$

Zur Bestimmung der Anzahl Fächer in vertikaler Richtung wird (8.20) nach m_V aufgelöst.

$$m_V = \frac{v_y \cdot m_H \cdot b_{Fach}}{v_x \cdot h_{Fach}} \quad (8.21)$$

Die Unbekannte m_H kann durch Umformen von (8.19) substituiert werden.

$$\begin{aligned} m_V &= \frac{v_y \cdot N_{F_R} \cdot b_{Fach}}{v_x \cdot m_V \cdot h_{Fach}} \Leftrightarrow \\ m_V^2 &= \frac{v_y \cdot N_{F_R} \cdot b_{Fach}}{v_x \cdot h_{Fach}} \Leftrightarrow \\ m_V &= \sqrt{\frac{v_y \cdot N_{F_R} \cdot b_{Fach}}{v_x \cdot h_{Fach}}} \end{aligned} \quad (8.22)$$

Die Anzahl Lagerfächer in horizontaler Richtung ergibt sich durch Einsetzen des Ergebnisses von (8.22) in (8.19) zu

$$m_H = \frac{N_{F_R}}{m_V} \quad (8.23)$$

Nachdem nun die Lagerfachanzahl in horizontaler und vertikaler Richtung ermittelt wurden, können die Regalmodulmaße bestimmt werden. Die Modulmaße in einem AKL sind in Abb. 8.8 und 8.9 eingezeichnet und ergeben sich bei einer Einplatzlagerung wie folgt:

Die Länge des Regalmoduls l_{RM} ergibt sich wie folgt:

$$l_{RM} = m_H \cdot b_{Fach} + \text{Steherbreite} \quad (8.24)$$

Die Breite des Regalmoduls b_{RM} ergibt sich aus den beiden Regalwänden addiert zur Arbeitsgangbreite.

$$b_{RM} = 2 \cdot t_{Fach} + A_{ST} \quad (8.25)$$

Zu Ermittlung der Höhe eines Regalmoduls muss die Anzahl Lagerfächer in vertikaler Richtung m_V mit der Höhe eines Regalfachs multipliziert werden. Zusätzlich muss das untere Anfahrmaß UAM des Regalbediengeräts addiert werden.

$$h_{RM} = m_V \cdot h_{Fach} + UAM \quad (8.26)$$

Wenn die berechnete Höhe des Regalmoduls die maximale Bauhöhe des Regalbediengeräts übersteigt, muss die Anzahl Lagergassen in der Iterationsrechnung um 1 erhöht werden.

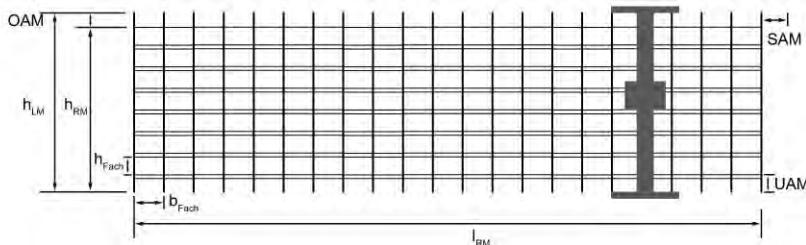


Abb. 8.8 AKL (Seitenansicht)

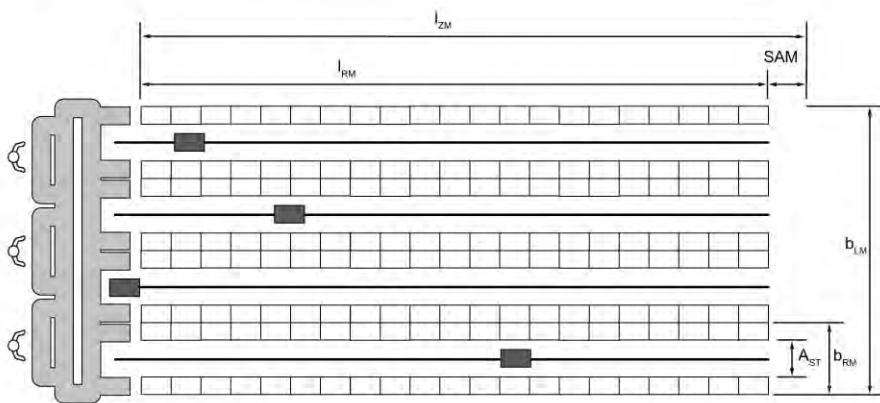


Abb. 8.9 AKL mit Kommissionier-Us (Draufsicht)

Nach der Dimensionierung eines Regalmoduls muss die Ist-Leistung des Regalbediengeräts für die im ersten Durchlauf ermittelten Regalabmessungen berechnet werden. Die Leistung kann durch die Ermittlung der mittleren Fahrzeit eines Regalbediengeräts bestimmt werden. Die mittlere Fahrzeit ist gegeben durch

$$t_F = p_{ES} \cdot t_{ES} + p_{DS} \cdot t_{DS} \quad (8.27)$$

Das Vorgehen zur Berechnung der mittleren Fahrzeit wurde bereits ausführlich in Kap. 7.4 betrachtet. Aus der mittleren Fahrzeit kann nun die Durchsatzleistung pro Stunde berechnet werden. Ist die so ermittelte Ist-Leistung kleiner als die erforderliche Soll-Leistung des Systems, so ist ein Regalmodul ausreichend. Andernfalls muss die Anzahl der Gassen um 1 erhöht und die schrittweise Dimensionierung des AKLs ab (8.17) erneut durchlaufen werden. Dieses Vorgehen muss so lange wiederholt werden, bis die Ist-Leistung des Systems der Soll-Leistung entspricht.

Abschließend können nun die Dimensionen des gesamten Lagermoduls wie folgt bestimmt werden (Abb. 8.8 und 8.9):

Die Lagerbreite ergibt sich aus der Multiplikation der Gassenanzahl mit der Breite eines Regalmoduls zu

$$b_{LM} = N_G \cdot b_{RM} \quad (8.28)$$

Zur Bestimmung der Lagerlänge muss zur Länge des Regalmoduls noch das seitliche Anfahrmaß *SAM* des Regalbediengeräts addiert werden.

$$l_{LM} = l_{RM} + SAM \quad (8.29)$$

Die Lagerhöhe ist die Summe aus der Höhe eines Regalmoduls und dem oberen Anfahrmaß *OAM* des Regalbediengeräts.

$$h_{LM} = h_{RM} + OAM \quad (8.30)$$

Auslegung eines Sorters

Ein zweistufiges Kommissioniersystem besteht aus einem Bereitstellsystem, einem Sortiersystem und einer Fördertechnik, die beide Systeme miteinander verbindet. Das Bereitstellsystem kann mit den in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Vorgehensweisen zur Grobdimensionierung von verschiedenen Regalanlagen ausgelegt werden. Die Grobauslegung des Sorters in einem zweistufigen Kommissioniersystem wird im Folgenden beschrieben. Im Mittelpunkt stehen hierbei die Bestimmung der erforderlichen Sortierleistung und die Festlegung der Anzahl erforderlicher Endstellen. Das gesamte Vorgehen wird am Beispiel eines Kippschalen sorters beschrieben.

Zu Beginn der Grobdimensionierung des Sorters muss die erforderliche Sortierleistung, d. h. die zu bewältigende Systemlast bekannt sein. Für die Bestimmung der erforderlichen Sortierleistung sind die Anzahl Positionen pro Tag N_{Pos} , die durchschnittliche Anzahl Picks pro Position N_{Pick} und die Gesamtbetriebszeit pro Tag t_{BZ} entscheidend. Mit den Angaben zur gesamten Positionsanzahl und der durchschnittlichen Anzahl Picks pro Position ergibt sich die Anzahl zu sortierender Stückgüter. Wird daraus der Quotient mit der gesamten Betriebszeit gebildet, lässt sich die erforderliche Sortierleistung pro Zeiteinheit bestimmen.

$$P_{Soll} = \frac{N_{Pos} \cdot N_{Pick}}{t_{BZ}} \quad (8.31)$$

Die tatsächliche Leistung eines Sorters P_{Sort} ergibt sich wiederum aus der Fördergeschwindigkeit des Sorters v_s und der Schalenteilung e_S . Die Schalenteilung gibt den mittleren Abstand zwischen zwei Schalen eines Sorters an. Dieser Abstand ist abhängig von der eingesetzten Schalengröße. Abhängig vom Produktspektrum des Unternehmens kann für die Wahl der Schalengröße davon ausgegangen werden, dass das größte zu transportierende Stückgut max. 80 % der Schale auslastet. Die Sortierleistung ergibt sich dann zu

$$P_{Sort} = \frac{v_s}{e_s} \quad (8.32)$$

Die Leistung des Sortiersystems ist ausreichend, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$P_{Sort} \geq P_{Soll} \quad (8.33)$$

Ist diese Bedingung nicht erfüllt, kann zum einen die Sortierleistung durch Erhöhung der Fördergeschwindigkeit gesteigert werden. Die maximal erreichbare Fördergeschwindigkeit für Sortiersysteme liegt zur Zeit bei ca. 2,5 m/s. Zum anderen kann die Soll-Leistung pro Stunde durch Erweiterung der Gesamtbetriebszeit verringert werden.

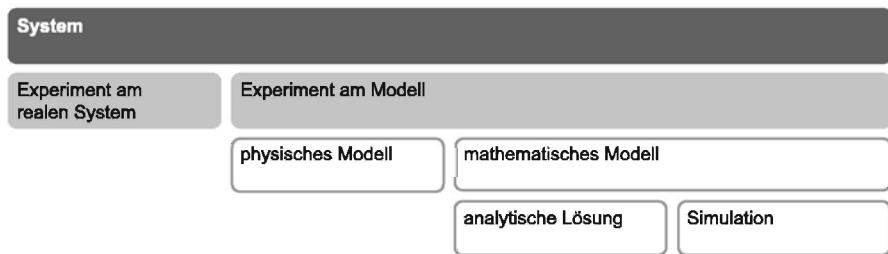
Neben der Auslegung der Sortierleistung ist in einem zweistufigen Kommissioniersystem auch die Anzahl der Endstellen eines Sorters eine entscheidende Größe. Die Anzahl der Endstellen N_E hängt von der Batchgröße, also der Anzahl Kundenaufträge pro Batch, ab. Typischerweise wird pro Batch eine Endstelle nur einmal bzw. von nur einem Kundenauftrag belegt. Für die Grobdimensionierung kann also davon ausgegangen werden, dass die Anzahl erforderlicher Endstellen der Anzahl Kundenaufträge in einem Batch entspricht. Die Batchgröße ergibt sich aus der durchschnittlichen Anzahl Kundenaufträge pro Tag O , der täglichen Gesamtbetriebszeit des Systems t_{BZ} und der Laufzeit eines Batches t_{BLZ} . In der Praxis werden in der Regel für die Batchlaufzeit 30 bis 45 Minuten angesetzt. Die Anzahl erforderlicher Endstellen des Sortiersystems ergibt sich zu

$$N_E = \frac{O}{t_{BZ}} \cdot t_{BLZ} \quad (8.34)$$

Nach der Grobdimensionierung der ausgewählten Arbeitsmittelvarianten erfolgt die Auswahl einer Vorzugsvariante. Die verschiedenen Systemvarianten können anhand einer Nutzwertanalyse miteinander verglichen werden. Einer Nutzwertanalyse sollte immer auch eine Gegenüberstellung von wirtschaftlichen Gesichtspunkten folgen. Neben den Investitionskosten sollten hierbei auch die Betriebskosten sowie die erforderliche Amortisationsdauer miteinbezogen werden.

8.5 Simulation von Materialflusssystemen

Bei der Planung von Materialflusssystemen, aber auch über deren gesamten Lebenszyklus hinweg, ergeben sich immer wieder Fragestellungen in Bezug auf das Systemverhalten, die nur durch eine konkrete Untersuchung des Systems beantwortet werden können. Vor der Realisierung eines Ware-zur-Person-Kommissioniersystems muss z. B. ermittelt werden, ob die Vorzone des AKLs die notwendige Leistung erbringt, ob genügend Pufferplätze an den Kommissionierstationen vorhanden sind oder wie sich Änderungen der Auftragsstruktur auswirken können. Während des Betriebs eines Person-zur-Ware-Kommissioniersystems sind z. B. Vor- und Nachtei-

Tabelle 8.5 Methoden zur Systemuntersuchung nach [LAW07]

le unterschiedlicher Wegstrategien für den Kommissionierer, unterschiedliche Einlastungsreihenfolgen von Aufträgen oder verschiedene Kriterien, nach denen eine Batchbildung erfolgen kann, zu untersuchen.

Für die Untersuchung des Materialflusssystems existieren verschiedene Möglichkeiten (Tabelle 8.5). Zum einen können Experimente am realen System durchgeführt werden. Dieses Vorgehen birgt jedoch in der Praxis meist zahlreiche Nachteile. In der Planungsphase ist eine Untersuchung nicht möglich, da ein reales System noch nicht existiert. In der Betriebsphase können zwar Experimente durchgeführt werden, sie sind aber meist mit einem sehr hohen Aufwand und einer Störung des Betriebablaufs verbunden.

In den meisten Fällen werden deshalb Experimente an einem Modell durchgeführt. Unter einem Modell wird eine durch Abstraktion (Reduzierung und Verallgemeinerung) gewonnene Nachbildung der Realität verstanden [VDI 3633b], wobei diesem Abbild auch die Idee einer Realisierung zugrunde liegen kann (z. B. in der Planungsphase). Weiterhin wird in einem Modell nur der relevante Bereich der Realität abstrahiert, so dass das Modell nur für den relevanten Ausschnitt eine gültige Aussage vermittelt. Modelle werden demnach für einen bestimmten Zweck entwickelt und besitzen auch üblicherweise nur für diesen Gültigkeit. Der Modellzweck leitet sich unmittelbar aus der Problemstellung ab, für die Antworten mit Hilfe des Modells erwartet werden. Antwortbereich und Modellzweck sollten so weit eingegrenzt werden, wie es das Untersuchungsziel zulässt. Mit einem sehr hohen Aufwand können auch allgemeingültige Supermodelle erstellt werden, jedoch ist dieser Aufwand zur Beantwortung konkreter Fragestellungen meist unnötig.

Für Untersuchungen eines Systems durch Experimente am Modell ist als erster Schritt die Modellbildung notwendig. Die Arbeit mit einem physischen Modell ist häufig mit hohem Aufwand, hohen Kosten und möglicherweise ungenauen Ergebnisdaten verbunden. Als problematisch stellt sich auch die mehrmalige Wiederholung gleicher Versuche dar, in denen das Modell jeweils wieder in seinen Ausgangszustand versetzt werden muss. Eine Alternative zum physischen Modell kann ein mathematisches Modell sein. Dieses kann entweder analytisch oder durch Simulationsexperimente gelöst werden. Bei komplexen, dynamischen Wirkzusammenhängen und stochastischen Einflussgrößen stoßen analytische Lösungen an ihre Grenzen. Materialflusssysteme erreichen durch die Kopplung unterschiedlicher Elemente (Fördertechnik, Lagertechnik, Systemlasten, Betriebsstrategien) eine

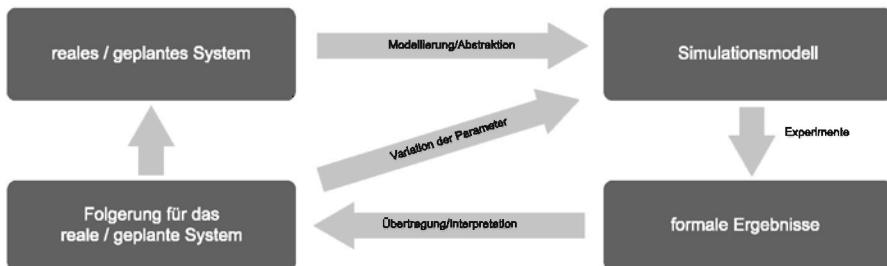


Abb. 8.10 Iteratives Vorgehen bei der Simulation nach [ASI97]

hohe Systemkomplexität. Für Untersuchungen des Zusammenspiels mehrerer Teilsysteme unter Berücksichtigung bestimmter Strategien wird deshalb häufig die Simulation eingesetzt.

Die VDI-Richtlinie 3633 thematisiert die Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Der Begriff der Simulation wird in dieser Richtlinie als „[...] das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. [...]“ definiert [VDI 3633b]. Jedes Materialflusssystem kann durch Angabe der Systemelemente, Objekte, Quellen/Senken, Verbindungselemente, Stationen und Speicher sowie ihrer Eigenschaften, ihrer Beziehungen untereinander und ihres Verhaltens im Zeitablauf in einem Simulationsmodell beschrieben werden.

Abb. 8.10 verdeutlicht das iterative Vorgehen bei der Durchführung einer Simulation. Ausgehend vom realen oder geplanten System muss wie beschrieben zunächst ein Simulationsmodell entwickelt werden. Experimente an diesem Modell mit unterschiedlichen Parametereinstellungen liefern dann formale Ergebnisse. Um hieraus Rückschlüsse für das reale bzw. geplante System zu ziehen, ist die richtige Interpretation der Ergebnisse notwendig. Oftmals ist es erforderlich, das System oder das Modell auf Grundlage der erarbeiteten Rückschlüsse anzupassen.

Dieses iterative Vorgehen kann aufwendig sein und ist der entscheidende Unterschied zur analytischen Lösung eines Sachverhalts. In der Simulation ist es erforderlich, Experimente mit variierenden Parametern durchzuführen, um sich dem Optimum anzunähern. Es müssen Parameter in entsprechenden Grenzen und angemessener Schrittweite variiert werden, um sicherzustellen, dass es sich um das globale und nicht um ein lokales Optimum handelt. Kann das Optimum für eine Problemstellung mit Hilfe einer analytischen Lösung und akzeptablem Aufwand bestimmt werden, ist sie der Simulation vorzuziehen, da ihre Lösung für das zugrunde liegende Problem in jedem Fall exakt ist.

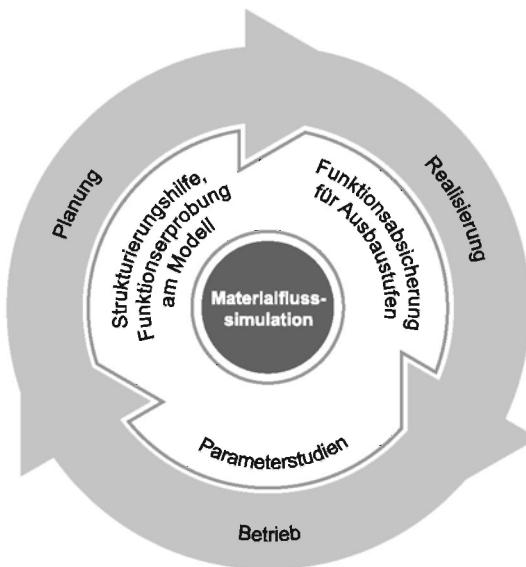


Abb. 8.11 Anwendungsfelder der Simulation nach [VDI 3633b]

8.5.1 Einsatzfelder der diskreten Simulation

Im Bereich von Materialflusssystemen lassen sich Problemstellungen oftmals nur durch den Einsatz eines Simulationsmodells realitätsnah abbilden. Analytische Modelle müssen oftmals durch eine Vielzahl von Restriktionen und Annahmen stark vereinfacht werden, so dass sie nur ein abstraktes Abbild der Realität darstellen. Mittels einer Simulation lassen sich in diesem Fall bessere Ergebnisse erzielen, da eine komplexere und damit genauere Modellierung vorgenommen werden kann. Generell können folgende Leitlinien für den Einsatz von Simulation formuliert werden [VDI 3633b]:

- Simulation vor Investition
- Ausschöpfung aller analytischen Methoden vor der Simulation
- genaue Zieldefinition und Aufwandsabschätzung vor der Simulation
- Simulation ist nur ein Werkzeug
- erforderliche Abbildungsgenauigkeit bei der Modellbildung prüfen
- Ist die Datenbasis fehlerhaft, so sind die Ergebnisse wertlos.
- Simulationsergebnisse richtig interpretieren

Wie einleitend beschrieben, kann die Simulation Anwendung im gesamten Lebenszyklus eines Materialflusssystems finden. In der *Planungsphase*, in der *Realisierungsphase* und in der *Betriebsphase* werden durch den Einsatz einer Simulation unterschiedliche Ziele verfolgt (Abb. 8.11).

In der *Planungsphase* werden Simulationsmodelle entwickelt, um Entwürfe zur Systemrealisierung und zum Prozessablauf abzusichern und zu verbessern. Dies ist

heute einer der wichtigsten Einsatzfälle der Simulation. Grundlegende Ziele sind dabei der Funktionsnachweis geplanter Arbeitsmittelvarianten, aber auch der Nachweis der Leistungserbringung und die Identifizierung von Effizienzsteigerungspotenzialen. Typische Untersuchungskriterien sind in dieser Phase der erreichbare Durchsatz, bestehende Leistungsgrenzen, Engpässe und erforderliche Durchlaufzeiten. Diese Kennzahlen lassen Rückschlüsse auf die richtige Dimensionierung des Materialflusssystems zu und ermöglichen die Erprobung von Steuerungsstrategien und Ablauflogik.

Ist das Ziel einer Planung die Restrukturierung eines vorhandenen Materialflusssystems, so können mit Hilfe einer Simulation Kapazitätsgrenzen und Schwachstellen ermittelt werden, um eine Optimierung des bestehenden Systems zu erzielen.

In der Planungsphase kann auch eine Sensitivitätsanalyse am Simulationsmodell durchgeführt werden. Dadurch werden typischerweise Szenarien mit veränderten Auftragslasten oder Organisationsstrukturen abgebildet, aber auch Veränderungen in der Systemstruktur betrachtet. Anhand einer Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen von veränderten Einflussgrößen auf das Modell untersucht.

In der *Realisierungsphase* wird die Simulation vor allem zur Ermittlung des Anlaufverhaltens eines Materialflusssystems eingesetzt. Dies wird mit Hilfe eines simulierten Probebetriebs durchgeführt. So kann beispielsweise das Systemverhalten bei einer stufenweisen Erhöhung der Systemlast getestet werden. Ergeben sich während der Inbetriebnahme eines Materialflusssystems Veränderungen in den Anforderungen, so kann die Simulation genutzt werden, um die resultierenden Auswirkungen zu überprüfen. Wird z. B. während dieser Phase ein neuer Großkunde gewonnen, so kann per Simulation überprüft werden, ob das geplante System die zusätzlichen Aufträge abarbeiten kann.

Ein weiterer Einsatzfall in der Realisierungsphase ist die Untersuchung der Steuerungssoftware mittels Simulation. Ausgiebige Tests der Steuerungssoftware am realen Materialflusssystem sind in der Regel nicht möglich, da in der Realisierungsphase das physische System zunächst nicht bzw. noch nicht vollständig besteht. Nach Fertigstellung des Systems besteht dann die Anforderung einer schnellen Inbetriebnahme, um hohe Kosten durch unproduktive Zeiten zu vermeiden. In diesem Fall bietet es sich an, das physische System mit einem Simulationsmodell zu emulieren und mit der Steuerungssoftware zu koppeln. Bei einer Emulation steuert die zu testende Steuerungssoftware nicht das reale System, sondern ein Simulationsmodell, welches das reale (technische) System nach außen funktionsgleich nachbildet. Dabei werden im Simulationsmodell Schnittstellen implementiert, die denen des realen Systems zur Steuerung entsprechen. Das gleiche Vorgehen wird in der Betriebsphase gewählt, wenn eine Anpassung der Steuerungssoftware erfolgen muss und ein durchgehender Mehrschichtbetrieb längere Testphasen ohne Umsatzerluste nicht zulässt.

Simulation bietet darüber hinaus eine gute Möglichkeit zur Schulung von Mitarbeitern, sowohl in der Realisierungsphase als auch in der Betriebsphase. Bevor das Personal erstmalig mit einem System konfrontiert wird, z. B. bei Neuplanung, Restrukturierung, neuen Mitarbeitern oder geänderten Aufgabengebieten von Mitarbeitern, bietet sich die Schulung an einem Simulationsmodell an. Die Reaktion des

Materialflusssystems kann mit Hilfe der Simulation bei verschiedenen Tätigkeiten getestet werden. Die Möglichkeiten zum Training von Notfällen und Störungen sind ein typisches Anwendungsfeld der Simulation.

In der *Betriebsphase* wird die Simulation zusätzlich verwendet, um durch Untersuchung verschiedener Prozessablaufvarianten zur operativen Entscheidungsfindung beizutragen. Hier ist beispielsweise die Frage zu klären, in welcher Reihenfolge Kommissionieraufträge bearbeitet werden sollten und welche Aufträge zu einem Batch oder einer Kommissionierwelle zusammengefasst werden. Der oftmals bestehende Zielkonflikt zwischen einer effizienten Systemauslastung und der rechtzeitigen Ankunft der Aufträge am Warenausgang kann in komplexen Kommissioniersystemen häufig nur mit Hilfe der Simulation gelöst werden. Auch notwendige Sofortmaßnahmen, die sich durch Ausfall oder Instandhaltung von Förder- bzw. Lagermitteln ergeben, können vor der Realisierung des Gesamtsystems bezüglich ihrer Auswirkung mittels einer Materialflusssimulation geprüft werden.

Analog zur Realisierungsphase stellt darüber hinaus in der Betriebsphase die Variantenuntersuchung zur Vorhersage von Auswirkungen bei veränderter Auftragsstruktur, verändertem Mitarbeitereinsatz etc. ein Anwendungsfeld der Simulation dar. Abschließend zusammengefasst, bietet der Einsatz der Simulation folgende Vorteile [ASI97]:

- effizientere Planung,
- Aufzeigen von geeigneten Varianten,
- sichere Investition,
- schnellere Realisierung,
- effektiveres Reagieren und
- intensivere Schulung.

8.5.2 Vorgehensweise bei Simulation von Intralogistiksystemen

Im folgenden Abschnitt wird eine Vorgehensweise zur Simulation von Intralogistiksystemen vorgestellt. Sie basiert wesentlich auf der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 sowie auf dem hierauf aufbauenden Vorgehensmodell nach [RSW08]. Die simulative Untersuchung von Systemen erfolgt üblicherweise in Form eines Projektes, der sogenannte Simulationsstudie [VDI 3633a]. Eine solche Simulationsstudie lässt sich in Anlehnung an [VDI 3633b] und [RSW08] in vier Phasen und innerhalb dieser Phasen zu bearbeitende Aufgabenstellungen untergliedern. In Abb. 8.12 ist die Vorgehensweise bei der Durchführung einer Simulationsstudie dargestellt.

Begleitend zu den genannten Aufgaben müssen zwei weitere wichtige Aufgaben über die gesamte Simulationsstudie hinweg durchgeführt werden. Hierbei handelt es sich um die Verifikation und die Validierung. Gemäß [VDI 3633a] bezeichnet der Begriff *Verifikation* die formale Überprüfung der Korrektheit von Daten und Modellen und ist im Sinne einer Widerspruchsfreiheit zu verstehen. Dies deckt sich prinzipiell mit der in [RSW08] definierten Bedeutung als Überprüfung, ob ein Modell von

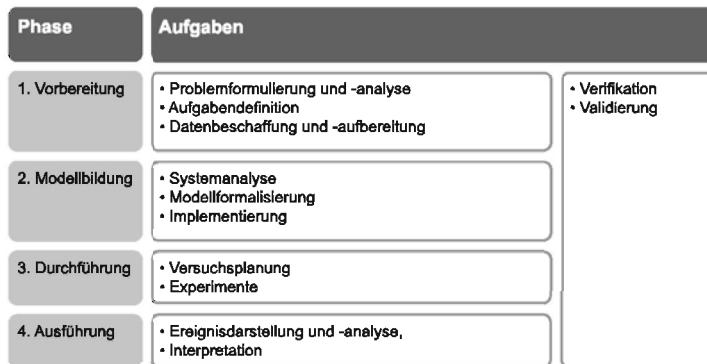


Abb. 8.12 Vorgehensweise bei der Durchführung einer Simulationsstudie

einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde. Der Begriff *Validierung* hingegen beschreibt die hinreichende Übereinstimmung zwischen Modell und (gedachter) Realität in Bezug auf die definierte Zielsetzung. Hinreichend meint in diesem Zusammenhang die ausreichend genaue und fehlerfreie Abbildung. Eine vollständige Übereinstimmung ist, wie bereits beschrieben, üblicherweise aufgrund der notwendigen Abstraktion sowie möglicherweise ungenau beschriebener Systemdaten nicht möglich bzw. nicht anzustreben. Wie zu Beginn dieses Abschnitts bereits erwähnt, sind Verifikation und Validierung als phasenübergreifende Aufgaben zu verstehen. Obwohl die genannten Aufgaben prinzipiell in der dargestellten Reihenfolge durchgeführt werden sollten, kann ein negatives Ergebnis der Verifikation bzw. Validierung einer Aufgabe die Rückkehr zu einer vorherigen Aufgabe bedingen. Hierdurch erhält die Vorgehensweise einen rekursiven Charakter. Die Rekursion ist so lange auszuführen, bis das angestrebte Ergebnis erzielt wird. Im Folgenden werden die einzelnen Aufgaben, die das Vorgehen innerhalb einer Simulationsstudie charakterisieren, näher betrachtet.

1. Vorbereitung

Problemformulierung und Aufgabendefinition Bevor mit der eigentlichen Simulation begonnen werden kann, ist diese in geeigneter Art und Weise vorzubereiten. Im ersten Schritt ist die Problemstellung zu formulieren und zu analysieren. An dieser Stelle muss sichergestellt werden, dass im Rahmen der Studie die gewünschten Ergebnisse mit vertretbaren Kosten erzielt werden können und keine analytische Lösungsmöglichkeit für die Problemstellung existiert. Eine analytische Lösung ist der mit Hilfe eines Simulationsmodells (experimentell) ermittelten Lösung vorzuziehen. Sind die genannten Voraussetzungen erfüllt und damit die Problemstellung als simulationswürdig identifiziert, werden im nächsten Schritt die Aufgabenstellung und das Ziel der Studie weiter spezifiziert.

Datenbeschaffung und -aufbereitung Einer der wichtigsten Schritte innerhalb einer Simulationsstudie stellt die Datenbeschaffung und deren Aufbereitung dar. Die Daten dienen als Ausgangsbasis für alle durchzuführenden Experimente. Ihre Qualität und Plausibilität nimmt damit unmittelbaren Einfluss auf die Qualität der erzielbaren Ergebnisse. Verschiedene Methoden zur Datenbeschaffung und -analyse wurden bereits in Kap. 8.1 vorgestellt. Grundsätzlich lassen sich im Kontext von Simulationsstudien eine Reihe von unterschiedlichen Daten nach ihrer Art unterscheiden. Nach [VDI 3633b] bilden die folgenden Daten die sogenannte Simulationsdatenbasis:

- Systemlastdaten
- Organisationsdaten
- technische Daten

Zu den Systemlastdaten gehören beispielsweise Produkt- und Auftragsdaten. Unter Organisationsdaten sind beispielsweise Arbeitszeitmodelle, Ressourcenzuordnungen und Ablauforganisation zu verstehen. Technische Daten umfassen beispielsweise die Systemtopologie, die Leistungskennwerte der eingesetzten Technik oder Stördaten. Der Umfang der zu beschaffenden Daten kann in Abhängigkeit von der jeweiligen Zielsetzung und der Phase innerhalb des Systemlebenszyklus stark variieren. Dies reicht von der Datenaufnahme in realen Systemen und deren Hochrechnung bis hin zur Erzeugung von Daten auf Basis statistischer Verfahren mit Hilfe sogenannte Datengeneratoren. Letztere Alternative findet z. B. dann Anwendung, wenn keine realen Auftragsdaten vorhanden sind, sondern nur (geschätzte) Kennwerte, die ihre Eigenschaften charakterisieren (z. B. Anzahl Aufträge pro Tag, Anzahl Positionen pro Auftrag, jeweils mit zugehöriger statistischer Verteilung). Auf dieser Basis erstellt ein Systemlastgenerator konkrete Aufträge, die als Eingangsdaten in das Simulationsmodell einfließen. Abschließend sei nochmals angemerkt, dass unabhängig von der Art der Daten und ihrer Herkunft in jedem Fall eine Plausibilitätskontrolle (Stichwort: Verifikation und Validierung) erforderlich ist, um die Voraussetzung für eine hohe Ergebnisqualität zu schaffen.

2. Modellbildung

Systemanalyse Der Prozess der eigentlichen Modellbildung beginnt mit der Systemanalyse. Dabei wird gemäß [RSW08] eine Dokumentation des zu entwickelnden Simulationsmodells mit seinen Zielsetzungen, Eingaben, Ausgaben, Elementen und Beziehungen, Annahmen und Vereinfachungen erarbeitet, die das sogenannte Konzeptmodell bildet. Das Konzeptmodell ist rein sprachlicher Natur und als verbale Beschreibung des Modells zu verstehen. Es ist dabei vollkommen unabhängig von einer bestimmten Beschreibungs- oder Programmiersprache. Es ist vielmehr darauf zu achten, dass die Beschreibung der Abläufe und Zusammenhänge allgemein für alle Projektbeteiligten verständlich formuliert ist.

Modellformalisierung Im nächsten Schritt wird das Konzeptmodell in ein formalisiertes Modell überführt. Darunter ist nach [RSW08] beispielsweise die Beschreibung komplexer Algorithmen oder umfangreicher Datenstrukturen mit Hilfe geeigneter Beschreibungsmittel (z. B. Pseudo-Code, Struktogramme, Entity-Relationship-Diagramme, Unified Modeling Language) zu verstehen, um damit eine formale technische Basis für die Abbildung in einem Simulationswerkzeug zu schaffen. Das formale Modell soll gewährleisten, dass die im Konzeptmodell eher aus fachlicher Sicht beschriebenen Abläufe auch wirklich implementierbar werden.

Implementierung Der Prozess der Modellbildung wird mit der Implementierung des formalen Modells als ausführbares Modell abgeschlossen. Hierzu stehen eine Reihe von unterschiedlichen Möglichkeiten zur Verfügung. Dies reicht von der Formulierung mathematischer Gleichungen und deren softwaretechnischer Umsetzung bis hin zur Nutzung von Simulationswerkzeugen, die in der Regel auf einen Anwendungsfall spezialisierte Softwareprodukte darstellen. Welche Form der Implementierung geeignet ist, hängt wesentlich vom Untersuchungsziel und den Kenntnissen desjenigen ab, der die Implementierung durchführt. In vielen Fällen bietet sich die Nutzung fertiger Simulationswerkzeuge an, da die enthaltenen Komponenten und Funktionen in der Regel bereits einer Verifikation und Validierung unterzogen wurden. Bietet ein Simulationswerkzeug beispielsweise die Möglichkeit, gleichförmig beschleunigte Bewegungen von Objekten nachzubilden, kann davon ausgegangen werden, dass die entsprechenden Modellelemente gegenüber den Regeln der Physik und Mathematik verifiziert und validiert worden sind. Im Umkehrschluss bedeutet dies jedoch nicht, dass aufgrund dieser Tatsache die Verifikation und Validierung bei Verwendung von Simulationswerkzeugen entfallen kann. Hierbei geht es vielmehr darum, die korrekte Abbildung der Systemzusammenhänge zu überprüfen. Neben der Möglichkeit zur vereinfachten Modellierung bieten Simulationswerkzeuge häufig bereits fertige Funktionen zur Animation der Abläufe und zur Darstellung und statistischen Auswertung der Simulationsergebnisse, wodurch der Gesamtaufwand für die Implementierung, Durchführung und Auswertung signifikant reduziert werden kann. Auf dem Markt existiert eine Reihe unterschiedlicher Simulationswerkzeuge, die unterschiedlichste Merkmale und Funktionalitäten aufweisen. In den meisten Fällen lässt sich der Aufbau eines Simulationswerkzeugs in die Bereiche *Simulatorkern* und *Bedienoberfläche* unterteilen. Während der Simulatorkern die Berechnung der Modelldynamik übernimmt, ist die Bedienoberfläche verantwortlich für die Durchführung des Modellaufbaus, die Experimentdurchführung und die anschließende Ergebnisauswertung. Aufgrund unterschiedlicher Funktionalitäten der verschiedenen Simulationswerkzeuge kann auch die Oberfläche verschiedene Funktionen aufweisen [SCK97]:

- Bausteinkonstruktion
- grafisch interaktiver Modellaufbau
- Bausteinparametrierung

- Vorgabe der Steuerungsstrategien
- Definition von Statistiken
- Experimentbeschreibung
- Animation
- Ergebnisauswertung

Diese Punkte sind lediglich als beispielhafte Funktionalitäten von Simulationswerkzeugen anzusehen. Insbesondere der Fortschritt im Bereich der Computer- und Softwaretechnik bietet immer weitergehende Möglichkeiten in Bezug auf die realisierbare Modellgröße und -detaillierung.

3. Durchführung

Versuchsplanung Bedingt durch den experimentellen Charakter der Simulation ist im Rahmen einer Simulationsstudie eine Reihe von Versuchen durchzuführen. Hierbei werden unterschiedliche Parameter des Modells variiert, um anschließend ihren Einfluss auf das Simulationsergebnis auswerten und ggf. einen Wirkzusammenhang nachweisen zu können. Die Versuchsplanung (englisch: design of experiments, DOE) dient dabei zur zielorientierten Wahl der zu variiierenden Parameter sowie zur Bestimmung der notwendigen Anzahl an Experimenten. Ziel ist es, mit möglichst wenigen Experimenten eine möglichst hohe Ergebnisqualität zu erzielen und damit die Effizienz der Versuchsdurchführung zu steigern. Simulationsläufe können sehr rechenzeitintensiv sein. So ist eine Rechenzeitdauer von wenigen Minuten bis hin zu mehreren Stunden möglich. Um sicher zu gehen, dass der Zeitrahmen für Experimente eingehalten wird, sollte auf die für den Simulationslauf erforderliche CPU-Zeit geachtet werden [SCK97].

Experimente Die Durchführung der Experimente liefert schließlich konkrete Ergebnisse der Modellausführung. Gemäß des zuvor aufgestellten Versuchsplans sind die einzelnen Experimente durchzuführen und ihre Ergebnisse in geeigneter Art und Weise für die spätere Auswertung abzulegen. Innerhalb der Modelle werden häufig zufällige Ereignisse oder Zufallswerte auf Basis statistischer Verteilungen generiert. Die Basis hierfür bilden Zufallszahlengeneratoren, die ausgehend von einem Startwert auf Basis mathematischer Operationen eine „zufällige“ Zahlenreihe, sogenannte Pseudo-Zufallszahlen ermitteln. Diese Vorgehensweise ist von elementarer Wichtigkeit, um eine konkrete Ausführung des Modells, einen sogenannten Simulationslauf, überhaupt reproduzieren zu können. Gleichzeitig bedeutet dies, dass ein einzelner Simulationslauf aufgrund der Abhängigkeit vom gewählten Startwert häufig keine fundierte Basis für die Ergebnisauswertung bietet. Daher sind die Ergebnisse der Experimente durch mehrere Simulationsläufe durch Anwendung statistischer Methoden in Bezug auf ihre Ergebnisqualität und -stabilität zu überprüfen (vgl. Ergebnisdarstellung und -analyse).

4. Auswertung

Ergebnisdarstellung und -analyse Die Ergebnisdarstellung und -analyse dient dazu, die zuvor ermittelten Ergebnisse in geeigneter Art und Weise für unterschiedliche Zielgruppen verständlich aufzubereiten. Dies kann entweder online, d. h. während der oder offline, d. h. im Anschluß an die Modellausführung erfolgen. Gängige Simulationswerkzeuge bieten hierzu in der Regel vielfältige Möglichkeiten. Die Online-Auswertung kann zudem durch eine Animation der dynamischen Abläufe innerhalb des Modells unterstützt werden. In vielen Fällen ist es sinnvoll, die Ergebnisse in aggregierter Form wie z. B. in Form eines Histogramms, von Mittelwerten oder Varianzen auszugeben [ARF07]. Viele Simulationswerkzeuge bieten dem Anwender die Möglichkeit, auf Basis vordefinierter Funktionen eigene Formen der Darstellung zu wählen. Typische Funktionalitäten von Simulationswerkzeugen sind beispielsweise ([SCK97], [ARF07]):

- Bereitstellen einer ausreichenden Anzahl an Standardstatistiken (Auslastung, Durchsatz, etc.)
- Definitionsmöglichkeiten für eigene Statistiken, die den jeweiligen (zielorientierten) Anforderungen entsprechen
- geeignete grafische Aufarbeitungsformen (Kuchen-, Balken-, Liniendiagramme, Filter- und Glättungsmöglichkeiten, Tabellen)

Welche Form der Darstellung geeignet ist, sollte zudem im Hinblick auf die weitere Verwendung entschieden werden. Ein wichtiger Punkt in Bezug auf die Ergebnisanalyse stellt die Überprüfung auf hinreichende Übereinstimmung zur (gedachten) Realität (vgl. Validierung). Obwohl im Sinne von [RSW08] Verifikation und Validierung als phasenübergreifende Aufgaben angesehen werden, soll an dieser Stelle nochmals explizit auf deren Notwendigkeit bei der Ergebnisanalyse hingewiesen werden. Wird beispielsweise ein reales System untersucht, bietet es sich an, die Ergebnisse der nachgebildeten Ist-Situation mit denen des realen Systems zu vergleichen. Ist diese Übereinstimmung nicht ausreichend, d. h. die Validierung verläuft negativ, hat dies u. U. zur Folge, dass die Modellgestaltung überdacht werden muss und an der entsprechenden Fehlerquelle einer Nachbesserung bedarf. Durch die Rückkehr zu vorherigen Aufgaben entsteht ein iterativer Prozess, der so lange durchlaufen wird, bis man zu den angestrebten Ergebnissen gelangt. Selbst bei positivem Ausgang der Validierung darf nicht vergessen werden, dass die Simulation ein experimentelles Verfahren ist, das weder unmittelbar exakte noch optimale Werte liefern kann. Dies ist insbesondere beim Testen und Vergleichen mehrerer Alternativen zu beachten. Mögliche Gründe für eine negative Validierung sind z. B.:

- Das Modell ist unzureichend, weil z. B. zu stark aggregiert.
- Wichtige Prozessregeln wurden nicht (oder unzureichend) abgebildet.
- Die Eingangsdaten entsprechen nicht den Originaldaten.
- Die Verteilungsfunktionen wurden unrealistisch approximiert (z. B. Annahme einer Normalverteilung trifft die Realität nicht).

Bevor konkrete Simulationsergebnisse verwendet werden können, muss die Validierung positiv abgeschlossen sein, sofern eine Modellanpassung oder eine Variation von Eingangsparametern stattgefunden hat [SCK97].

Interpretation Den Abschluss einer Simulationsstudie bildet die Interpretation der Ergebnisse und die damit verbundene Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf die (gedachte) Realität. Typische Aussagen in Bezug auf das Verhalten von intralogistischen Systemen sind z. B.:

- Auslastung von (kritischen) Komponenten
- Anzahl benötigter Behälter
- Wirksamkeit der Nachschubsteuerung
- Auswirkungen von Vorfahrts- und Verteilregeln
- Störverhalten des Systems
- Durchlaufzeiten und Servicegrad für Kundenaufträge
- Auswirkungen eines veränderten Artikelspektrums
- Auswirkungen eines veränderten Kundenverhaltens
- erforderliche Personalstärke für den Betrieb der Anlage in unterschiedlichen Situationen
- Erweiterbarkeit bzw. Leistungsreserven

Nach [RSW08] können die Schlussfolgerungen zu veränderten oder erweiterten Fragestellungen führen, was beispielsweise zu neuen Experimenten oder im Extremfall zu einer veränderten Zielbeschreibung und damit zu einer Iteration der gesamten Simulationsstudie führen kann. Generell ist festzuhalten, dass die Simulation kein Werkzeug zum Ersatz einer Planung darstellt. Sie ermöglicht jedoch qualitative und quantitative Rückschlüsse über verschiedene Problemstellungen, die Rahmen der Systemplanung oder des Systembetriebs zu treffen. Sie sollte nur dann eingesetzt werden, falls diese z. B. die Grenzen analytischer Methoden überschreiten oder die Systemkomplexität die menschliche Vorstellungskraft überfordert.

8.5.3 Anwendung der Simulation in der Kommissionierung

Nachdem in den vorherigen Abschnitten ein allgemeiner Überblick über das Thema der Simulation in der Intralogistik und deren Einsatzfelder gegeben wurde, liegt der Fokus im Folgenden im Bereich der Kommissionierung. Während im Rahmen der Grobplanung viele Fragestellungen durch den Einsatz analytischer Methoden in Form von Mittelwertbetrachtungen beantwortet werden können, reicht dieser Detaillierungsgrad bei der Detailplanung oder in der Betriebsphase häufig nicht mehr aus. In diesen Phasen ist es vielmehr erforderlich, die realen Abläufe in Form von dynamischen Prozessen und insbesondere ihre Wechselwirkungen untereinander zu untersuchen. Dadurch lässt sich u. a. auch der zeitliche Verlauf des Systemverhaltens nachbilden und untersuchen. Dies geschieht in der Regel in Simulationmodellen.

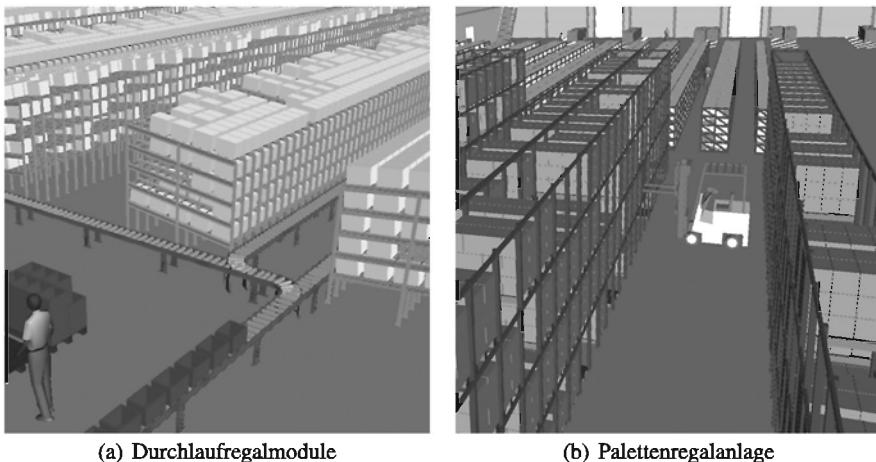


Abb. 8.13 Simulationsmodelle mit detaillierter Animation [Fotos: Lehrstuhl FLW]

len mit niedrigem Abstraktionsgrad, d. h. die Modelle bilden vergleichsweise viele Details der Realität nach (Abb. 8.13). Kommissioniersysteme werden dabei typischerweise auf Artikelebene betrachtet, d. h. es erfolgt in der Regel eine Zuordnung konkreter Artikel zu Lagerfächern. Die Systemlast wird in Form von konkreten Kommissionieraufträgen nachgebildet, deren Detaillierung mindestens auf der Ebene von einzelnen Positionen liegt und bis hin zu einzelnen Greifeinheiten reichen kann. Im Folgenden wird ein Beispiel für den Einsatz einer Simulationsstudie im Rahmen der Restrukturierung eines Kommissioniersystems vorgestellt.

Simulation eines Person-zur-Ware-Systems

Das vorliegende System ist nach dem Person-zur-Ware-Prinzip organisiert und es wird eine einstufige, auftragsweise Kommissionierung eingesetzt. Das System besteht aus einer achtgassigen Fachbodenregalanlage mit einer Gassenlänge von jeweils 20 m (Abb. 8.14). In diesem Lager werden 3.200 Artikel zur Kommissionierung bereitgestellt. Durchschnittlich enthält ein Kundenauftrag fünf Kommissionierpositionen. Der Nachfrage auf die Artikel kann eine klassische 80/20-Verteilung zugrunde gelegt werden. Die Einlagerung der Artikel im Fachbodenregal erfolgt nach ihrer Zugriffshäufigkeit. Artikel mit hohem Zugriff werden am Gassenanfang, Artikel mit geringem Zugriff am Gassenende gelagert.

Es soll eine Potenzialanalyse für den Wechsel von der bisherigen Einzelbearbeitung zur auftragsparallelen Bearbeitung von neun Kundenaufträgen gleichzeitig erstellt werden. Dazu müssten Kommissionierwagen mit mobilen Terminals angeschafft und die Steuerungssoftware angepasst werden. Diese Investitionskosten sind dem geringeren Personalaufwand durch einen erhofften Leistungsgewinn gegenüberzustellen.

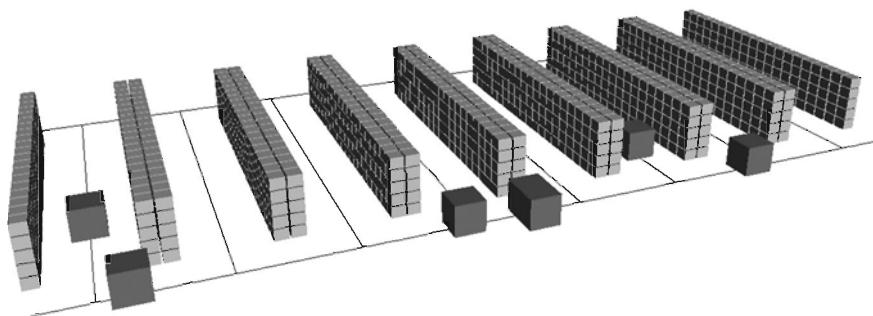


Abb. 8.14 Abstraktes Simulationsmodell [Foto: Lehrstuhl FLW]

Die Kommissionierleistung, welche mit der Einzelbearbeitung der Aufträge erzielt wird, kann über einfache Zeitnahmen bestimmt werden. Auch eine analytische Berechnung ist in diesem Fall möglich (vgl. Kap. 7). Eine Aussage über die Kommissionierleistung bei geplanter auftragsparalleler Kommissionierung von neun Aufträgen kann nur durch den Einsatz von Simulation getroffen werden, da die Systemkomplexität durch die Bildung von Auftragsgruppen deutlich steigt und somit eine analytische Lösung nicht mehr möglich ist.

Das Simulationsmodell, welches für diese Untersuchung notwendig ist, kann in fünf Komponenten gegliedert werden:

- physisches System
- Bestandsdatenbank
- Auftragsdatenbank
- Steuerung
- Kommissionierer

Das physische System besteht aus der Fachbodenregalanlage sowie den möglichen Laufwegen des Kommissionierers. Im Modell liegen die Laufwege in der Gassenmitte. Auf den Laufwegen muss ein Haltepunkt für jede Fachreihe des Regals positioniert werden. Die Haltepunkte sind jeweils den links und rechts liegenden Fächern auf allen Ebenen einer Reihe zugeordnet. Diese Zuordnung ist in der Bestandsdatenbank hinterlegt. Hier ist gespeichert, in welchem Fach ein bestimmter Artikel liegt und über welchen Haltepunkt der Kommissionierer auf ihn zugreifen kann.

Welche Kundenaufträge in dem System abgearbeitet werden, ist Bestandteil der Auftragsdatenbank. Die einzelnen Kundenaufträge werden von der Steuerung zu Kommissioniertouren zusammengefasst. In diesem Beispiel ist geplant, Kommissioniertouren mit neun Kundenaufträgen durchzuführen. Aktuell wird für jeden Kundenauftrag eine Tour gebildet. Bei der Bildung der Kommissioniertouren muss beachtet werden, wann Kundenaufträge am Warenausgang verfügbar sein sollen.

Nach diesem Kriterium entscheidet sich die Einlastungsreihenfolge der Kommissioniertouren. Mit Hilfe einer Wegstrategie berechnet die Steuerung zudem, wie die einzelnen Positionen innerhalb einer Tour geordnet werden müssen, um einen möglichst wegminimalen Rundgang zu erzeugen.

Im Simulationslauf startet der Kommissionierer an der Basis, indem ihm von der Steuerung eine Tour mit Aufträgen zugeordnet wird. Die Steuerung bestimmt, zu welchem Haltepunkt sich der Kommissionierer bewegt. Die Abbildung der Bewegung über die Laufwege wird durch die hinterlegten Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsparameter des Kommissionierers realisiert. Hat der Kommissionierer einen Haltepunkt erreicht, so wird die Bearbeitung der Position über eine Wartezeit abgebildet. Diese ist abhängig von der Anzahl an Entnahmeeinheiten. Die Ebene des Faches ist nicht relevant und fließt mit einem immer gleichen Wert in die Wartezeit ein, da davon ausgegangen wird, dass im Mittel immer die gleiche vertikale Bewegung beim Greifvorgang notwendig ist.

Für die Validierung des Simulationsmodells bietet sich in diesem Fall ein Vergleich der Kommissionierleistung zwischen realem System und der Simulation an. Die Steuerung der Simulation berechnet hierfür Kommissioniertouren mit nur einem Kundenauftrag. Stimmen die Werte mit der Zeitnahme im realen System überein, so ist in einem zweiten Schritt nur noch die Funktion der Sammelauftragsbildung zu validieren.

Diese Simulationsstudie hat gezeigt, dass im betrachteten Fall eine Bearbeitung von Auftragsgruppen gegenüber einer Einzelauftragsbearbeitung günstiger ist. Die Wegzeit konnte um 76 % verkürzt werden. Durch weitergehende Untersuchungen, in denen zusätzlich das Systemlayout und die Auftragslast variiert wurden, konnten beim Vergleich von Einzelauftrags- und Auftragsgruppenbearbeitung Wegzeitergebnisse in ähnlichen Größenordnungen nachgewiesen werden.

8.6 Benchmarking

Nach dem Prinzip der permanenten Planungsbereitschaft ist es empfehlenswert, auch nach erfolgreicher Implementierung eines Kommissioniersystems einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess einzuführen. Zu diesem Zweck bietet sich das Prinzip des Benchmarkings an.

Der Begriff Benchmark, aus dem englischen Sprachraum stammend, bedeutet übersetzt Maßstab und wurde ursprünglich in der Landvermessung verwendet. Er diente als Bezugs- oder Referenzpunkt, der zu Höhen- und Richtungsvergleichen herangezogen wird. Mittlerweile hat sich der Begriff Benchmarking für ein Verfahren zum systematischen Leistungsvergleich etabliert [tHH06]. In der Betriebswirtschaft bezeichnet Benchmarking einen kontinuierlichen Prozess, um Produkte, Dienstleistungen und Prozesse verschiedener Unternehmen qualitativ und quantitativ miteinander zu vergleichen.

Die Grundidee des Benchmarking besteht darin, für die Beseitigung von Problemen bereits erprobte Methoden bei anderen Unternehmen zu entdecken und auf be-

reits vorhandene Lösungsansätze zurückzugreifen und diese zu übernehmen. Ziel ist also, neben der Bestimmung von Leistungsunterschieden zu anderen Unternehmen, sogenannte Best Practices zu identifizieren und erfolgreich anzuwenden [LWW03]. Das Hauptaugenmerk sollte folglich auf der Verbesserung der eigenen Leistung im Unternehmen durch das Vorbild der Vergleichspartner liegen.

Außer in der Logistik wird Benchmarking noch in zahlreichen anderen Branchen angewandt. Das IT-Benchmarking vergleicht beispielsweise verschiedene IT-Dienstleistungen mehrerer Unternehmen nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Das EDV-Benchmarking hingegen gibt Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit eines Computers, einer Hardware-Komponente oder einer Software. Weiterhin gibt es Benchmarking-Analysen in der Finanzwirtschaft. Dort wird mit Hilfe marktrelevanter Indizes als Benchmark eine Aussage über den Anlageerfolg von Aktienpapieren getroffen.

Um das bestmögliche Ergebnis zu erzielen, empfiehlt sich, zur Durchführung einer Benchmarkinganalyse ein schrittweises Vorgehen einzuhalten. Der Ablauf des Benchmarkingprozesses wird im Folgenden genauer erläutert. Grundlegend können drei aufeinander aufbauende Phasen unterschieden werden: die Vorbereitungsphase, die Analysephase und die Umsetzungsphase.

Vorbereitungsphase Als ein wichtiger Erfolgsfaktor für eine Benchmarking-Untersuchung gilt die Vorbereitungsphase. Diese untergliedert sich in vier Schritte: die Wahl eines geeigneten Untersuchungsobjekts, die Bildung eines Benchmarking-Teams, die Auswahl geeigneter Kennzahlen und die Identifizierung eines Benchmarking-Partners. Zunächst erfolgt demnach die *Festlegung eines Untersuchungsobjekts*, wie z. B. die Kommissionierung. Der zu begutachtende Unternehmensbereich sollte über ein großes Leistungssteigerungspotenzial bei gleichzeitig geringem Änderungsaufwand verfügen. Das jeweilige Leistungssteigerungspotenzial der verschiedenen Unternehmensbereiche kann anhand einer Schwachstellenanalyse identifiziert werden. Nachdem ein Untersuchungsobjekt ausgewählt wurde, muss die Unterstützung der Unternehmensleitung sichergestellt werden. Das *Benchmarking-Team* sollte aus Mitarbeitern des zuvor festgelegten Bereiches, in dem der Benchmarkingprozess stattfinden soll, bestehen. Sie verfügen über das nötige Fachwissen und sind mit den Prozessabläufen vertraut. Aufgrund mangelnder Selbstkritik der Mitarbeiter oder auch möglicher Betriebsblindheit kann das Hinzuziehen eines externen Beraters sinnvoll sein. Anschließend erfolgt die *Auswahl geeigneter Kennzahlen* bzw. die Definition von Messgrößen. Die Kennzahlen können aus den Bereichen der Arbeitssystemanalyse (z. B. Kundenmerkmal, Arbeitsumgebung, Arbeitsperson), der Aufgabenanalyse (z. B. Inhalt der Kommissionierung), der Anforderungsanalyse (z. B. informative, körperliche oder organisatorische Anforderungen) und der Leistungsanalyse (z. B. Produktivität, Qualität, Kosten) stammen. Als letzter Vorbereitungsschritt erfolgt die *Identifizierung eines oder mehrerer geeigneten Benchmarking-Partners*. Dieser wird jeweils mit Hilfe einer Bestimmung von Ähnlichkeitsmerkmalen ausgewählt. Denn ein Vergleich zweier Systeme macht nur dann Sinn, wenn ihre Vergleichbarkeit durch Gemeinsamkeiten gewährleistet wird. Darüber

hinaus sollten die gewählten Zielparameter übereinstimmen und der Partner im Benchmarking-Objekt gegebenenfalls bessere Ergebnisse erzielen als das eigene Unternehmen [WES02].

Analysephase An die Phase der Vorbereitung schließt sich die Phase der Analyse an. Diese untergliedert sich in die Datenaufnahme, die Ermittlung von Leistungslücken, eine Ursachenanalyse und die Ergebniskommunikation. Zu Beginn der *Datenaufnahme* steht die Visualisierung der Prozessabfolge, da sie die Voraussetzung zur Identifikation der Leistungsunterschiede darstellt. Der Aufwand für eine Datenerhebung steigt mit der Anzahl der Vergleichspartner. Die Methoden der Datenerhebung unterteilen sich in Informationsbeschaffung und -austausch. Dabei kommt es darauf an, ob der Partner das Benchmarking-Objekt selbst analysiert (Austausch) oder durch den Initiator der Benchmarking-Analyse durchführen lassen möchte (Beschaffung). Die *Ermittlung von Leistungslücken* geschieht auf Grundlage der in der Vorbereitung ermittelten Kennzahlen. Dabei ist darauf zu achten, dass bestimmte Kennzahlen nicht isoliert voneinander betrachtet werden, da sie sich gegenseitig beeinflussen können. Da wie in der Einleitung zu diesem Kapitel beschrieben nicht nur das Erkennen von Leistungsunterschieden Ziel des Benchmarkings ist, sollen durch eine *Ursachenanalyse* effiziente Verbesserungsmaßnahmen entwickelt werden. Dabei sollte auf die Anwendbarkeit der Praktiken im eigenen Unternehmen geachtet werden. Der letzte Punkt der Analyse ist die *Ergebniskommunikation*. Das Benchmarking-Team formuliert dazu die Ergebnisse der Studie und stellt sie vor. Eine permanente Kommunikation mit den Mitarbeitern stärkt darüber hinaus die Identifikation und Bereitschaft zur Veränderung. Ein mögliches Misstrauen und etwaige Ängste oder Vorbehalte werden abgebaut. Der Nutzen der Veränderung sollte durch klare Kommunikation und Informationspreisgabe mitgeteilt werden [WES02].

Umsetzungsphase Nach der Vorbereitung und Analyse erfolgt nun die Umsetzungs- bzw. Implementierungsphase. In dieser Phase werden die in der Analysephase erarbeiteten Verbesserungsmaßnahmen umgesetzt. Dazu werden zuerst Strategien definiert, die zur Beseitigung der zuvor ermittelten Leistungslücken beitragen. Dabei sind, wie bereits erwähnt, die Schwachstellen zu priorisieren, die den größten Nutzen bei gleichzeitig geringem Aufwand bringen. Die im Vorfeld ermittelten Best Practices können meist nicht ohne weitere Überlegungen in das Unternehmen implementiert werden, sondern bedürfen einer Anpassung an die internen Strukturen. Hier hilft ein Aktionsplan bei der Umsetzung. Dieser bestimmt für ein klar definiertes Ziel Inhalt, Ausmaß, Zeitbezug und den Personalaufwand und ist unterteilt in Arbeitspakete, die verschiedenen Abteilungen zugeteilt sind und parallel nebeneinander ablaufen können [LWW03]. Der letzte Schritt beinhaltet sowohl die Kontrolle der Umsetzung als auch die Erfolgsmessung des gesamten Projektes. Dabei wird überprüft, ob die Zielsetzungen und die definierten Sollwerte erreicht wurden. Zudem wird ein Kosten-Nutzen Vergleich durchgeführt und Probleme, die bei der Durchführung aufgetreten sind, werden festgehalten, um sie bei nachfolgenden Projekten zu vermeiden.

Um im ständigen Wettbewerb als Unternehmen konkurrenzfähig zu bleiben, muss ein kontinuierlicher Benchmarkingprozess zur regelmäßigen Vergleichsmöglichkeit realisiert werden [LWW03]. In den letzten Jahren hat Benchmarking sich als eine Methode des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses etabliert und in vielen Fällen zu neuen, vorteilhafteren Lösungen geführt.

Kapitel 9

Systembeispiele

Abschließend sollen in diesem Kapitel verschiedene realisierte Systembeispiele vorgestellt werden, bei denen die Kommissionierung ein zentrales Systemelement ist. Zum einen wird ein System vorgestellt, das vorwiegend mit manuellen oder teilautomatisierten Prozessen nach dem Person-zur-Ware-Kommissionierprinzip arbeitet. Zum anderen wird ein Beispiel behandelt, in dem vorwiegend eine Kommissionierung nach dem Ware-zur-Person-Prinzip durchgeführt wird. Die Beschreibung der Prozessabläufe eines zweistufigen Kommissioniersystem mit Sortereinsatz runden dieses Kapitel ab.

9.1 Person-zur-Ware-Kommissioniersystem

9.1.1 Ausgangssituation

Die PharmLog Pharma Logistik GmbH ist ein Kooperationsunternehmen führender Pharmahersteller. Als Logistikdienstleister übernimmt PharmLog die deutschlandweite Distribution von Arzneimitteln. In einem zentralen Logistikzentrum werden die pharmazeutischen Endprodukte der Pharmahersteller bevorratet, kommissioniert, verpackt und versendet (Abb. 9.2). PharmLog beliefert Ärzte, Apotheken, Kliniken und Großhändler. Ziel dieses Kooperationsvorhabens war es, Bündelungseffekte auszunutzen. So konnten durch den Betrieb eines gemeinsamen Logistikzentrums Marktanteile gebündelt, saisonale Schwankungen ausgeglichen, die Lieferqualität erhöht und der Servicegrad verbessert werden. Darüber hinaus wurden durch eine bessere Kostenkontrolle Personal-, Transport- und Kapitalkosten reduziert. Das PharmLog Logistikzentrum in Bönen verfügt über einen Warenausgangsbereich, mehrere Lagerbereiche zur Bevorratung der Arzneimittel, verschiedene Kommissionierungsbereiche, Packbereiche sowie einen Warenausgang (Abb. 9.1). Zum Einsatz kommen Stetigförderer für Kartons, Behälter und Paletten sowie Unstetigförderer in Form von Regalbediengeräten, Senkrechtförderern und

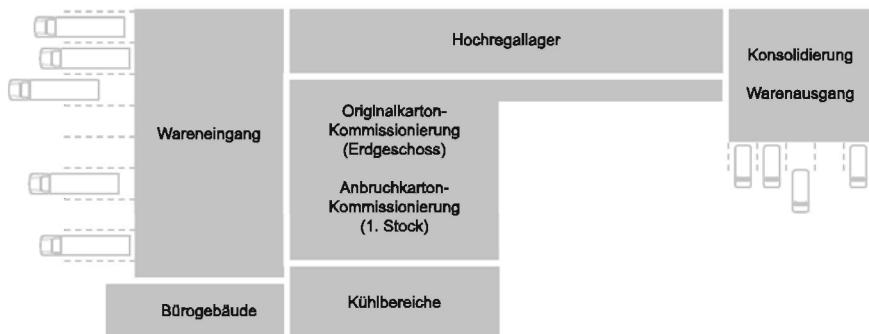


Abb. 9.1 Groblayout Pharmlog Logistikzentrum

Flurförderzeugen. Der Lagerbereich des Logistikzentrums bietet eine Kapazität für insgesamt 5.500 verschiedene Artikel. Täglich werden für rund 6.000 Aufträge mit 30.000 Lieferscheinpositionen insgesamt 1 Mio. Packungseinheiten kommissioniert. Dies entspricht einem Versand von 20.000 Paketen. PharmLog beschäftigt rund 250 Mitarbeiter, der Umsatz im Betrachtungszeitraum betrug 31,2 Mio. €.

9.1.2 Systembeschreibung

Im Logistikzentrum werden die Produkte verschiedener Pharmaunternehmen bevorratet. Jeder Hersteller meldet die Lieferung neuer Ware vorab durch ein Avis an. Die Avisierung erfolgt durch die Übermittlung von Datensätzen an das Lagerverwaltungssystem von PharmLog. Bei Ankunft der Ware werden die Lieferscheine gegen das elektronische Avis geprüft und eine Mengen- und Qualitätskontrolle je Charge durchgeführt. Täglich erreichen durchschnittlich 500 Paletten den *Wareneingang* des Logistikzentrums. Dies entspricht etwa 20 Lkw-Anlieferungen.

PharmLog lagert nur artikel- und chargenreine Paletten ein. Jede Palette wird mit einem Etikett gekennzeichnet, welches Artikel- und Chargennummer enthält. Zudem wird jede einzulagernde Palette mit einer Ladeneinheitennummer am Palettenfuß versehen. Zur Identifikation und Erfassung der Ware sind die Mitarbeiter mit mobilen Datenterminals ausgestattet und online mit dem Lagerverwaltungssystem verbunden. Im Wareneingang werden die Artikel- und Chargennummern und die Paletten-ID mit Hilfe eines Barcodescanners eingelesen und so miteinander verheiratet. Pro Palette wird die Sollmenge entsprechend den zuvor aufgenommenen Artikelstammdaten am Display angezeigt.

Mit der Identifikation der Ware im Wareneingang steht fest, nach welchen Kriterien die Bestandsführung zu erfolgen hat. Die notwendigen Informationen hierzu sind im Artikelstamm des einzulagernden Produktes hinterlegt. Nach der Erfassung



Abb. 9.2 Pharmlog Logistikzentrum [Foto: Pharmlog]



Abb. 9.3 I-Punkt und Zufuhr zum Hochregallager [Foto: Lehrstuhl FLW]

im Wareneingang legt der Lagerverwaltungsrechner automatisch den arzneimittelgerechten Lagerort fest, wobei die Ware unter verschiedenen Bestandsführungs-kriterien wie z. B. der Kühlklasse getrennt eingelagert wird. Bei der Einlagerung finden zudem Kriterien wie die Gleichverteilung der Artikel auf die Regalgassen und die Auslastung der Regalbediengeräte im Hochregallager Berücksichtigung.

Die Materialflussteuerung im Hochregallager erfolgt durch die automatische Identifikation der Ware über den Palettenbarcode. In allen anderen Lagerbereichen (z. B. im Kühlagerbereich) erfolgt die Steuerung durch Vorgabe interner Transportaufträge auf den mobilen Datenterminals der Staplerfahrer. Sind alle Paletten einer Anlieferung bestandsmäßig verbucht, wird der Warenzugang an die Pharmaunternehmen gemeldet.

Das vollautomatische Hochregallager verfügt über 30.000 Palettenstellplätze, verteilt auf vier Gassen und 23 Lagerebenen. Das *Nachshublager* ist insgesamt 185 m lang, 19 m breit und 32 m hoch und dient zur Nachschubversorgung der Kommissionierungsbereiche.

Eine Palette mit Arzneimitteln wird am Aufgabepunkt auf die Fördertechnik aufgesetzt und in das Hochregallager transportiert. Vor dem Transport wird vom Lagerverwaltungssystem eine Einlageradresse, bestehend aus Gassen-, Ebenen- und Reihenummer, ermittelt. Außerdem erfolgt eine automatische Prüfung der Palette auf Maximalgewicht, Höhe, Überstände der Ware und Lesbarkeit des Ladeeinheitenbelegs an einem I-Punkt (Abb. 9.3). Am Übergabepunkt des Hochregallagers übernimmt ein Regalbediengerät die Palette von der Fördertechnik und lagert diese auf dem entsprechenden Lagerplatz ein. Die Auslagerung erfolgt analog. Ein- und Auslagerung erfolgen jeweils im Doppelspiel.

Die Nachschubversorgung der einzelnen Kommissionierungsbereiche erfolgt über das Hochregallager. Die im Hochregallager eingelagerten Paletten werden in Abhängigkeit von den Auftragsgrößen entweder direkt aus dem Hochregallager heraus als



Abb. 9.4 Palettenlager im Bereich der Originalkarton-Kommissionierung [Foto: Lehrstuhl FLW]



Abb. 9.5 Kommissionierung von Originalkartons [Foto: Lehrstuhl FLW]

Ganzpalette kommissioniert oder stehen für die Nachschubversorgung der Kommissionierbereiche zur Verfügung. Sobald der Mindestbestand eines Artikels unterschritten wird, werden die Nachschubpaletten automatisch aus dem Hochregallager über die Förderstrecken zu den Abnahmepunkten in den Kommissionierbereichen transportiert. Dort nimmt sie ein Gabelstapler auf und bringt sie zur Nachschubversorgung an den Kommissionierplatz. Bei der Auswahl von Auslagerpaletten wird das Verfallsdatum berücksichtigt und nach der Rangfolge FEFO (first expiry first out) vorgegangen. Der entsprechende Abstellplatz des Ziellagerbereichs wird systemintern bei der Auslagerfreigabe vergeben. In einigen Kommissionierbereichen entspricht die Nachschubmenge einer Ganzpalette. Ist dies nicht der Fall, erfolgt die Nachschubversorgung des Kommissionierbereichs nach fest definierten Nachschubbmengen je Artikel und Platz. Eine evtl. nach Beschickung des Kommissionierplatzes verbleibende Restmenge wird entweder oberhalb des Durchlaufregals zwischengelagert oder direkt wieder ins Hochregallager eingelagert.

Die Bestellung von Arzneimitteln erfolgt durch Apotheken, Kliniken und Großhändler direkt an die kooperierenden Pharmahersteller. Deren Auftragserfassungssystem erzeugt einen Lieferschein und leitet die Auftragsdaten unmittelbar an den Lagerverwaltungsrechner von PharmLog weiter. Dort erfolgt die Aufbereitung der Aufträge für die *Kommissionierung*. Das Lagerverwaltungssystem splittet die Lieferscheinpositionen in einzelne Kommissionieraufträge bzw. -positionen für die entsprechenden Kommissionierbereiche auf. Die Kommissionierung erfolgt auftragsparallel. Über einen Algorithmus, der belastungsorientiert für die einzelnen Kommissionierbereiche gesteuert werden kann, werden die Kommissionieraufträge für die weitere Bearbeitung automatisch freigegeben.

Die Kommissionierung ist in vier Bereiche eingeteilt. Neben einer Kommissionierung von Ganzpaletten und Originalkartons werden in einem weiteren Bereich einzelne Packungseinheiten kommissioniert. Artikel, die in einem Kühlbereich be-

vorratet werden müssen, werden auch in einem speziellen gekühlten Bereich kommissioniert.

Bei der Ganzpalettenkommissionierung fährt die entsprechende Palette direkt aus dem Hochregallager über die Fördertechnik zu dem entsprechenden K-Punkt im Warenausgangsbereich. Am K-Punkt erfolgt die Kommissionierung der Palette, d. h. der Kommissionierer prüft den Artikel, die Charge sowie die auf der Palette befindliche Menge, vergleicht dies mit den auf dem Bildschirm angezeigten Angaben und quittiert. Die Palette wird auf die Pufferfläche im Warenausgang verbracht und zum Versand bereitgestellt.

Die Kommissionierung einzelner Originalkartons erfolgt aus den beiden unteren Regalebenen eines Palettenlagers (Abb. 9.4 und 9.5). Hier werden verschiedene Artikel in Abhängigkeit von ihrer Umschlaghäufigkeit und ihrem Gewicht auf fest vergebenen Plätzen zum Kommissionieren bereitgestellt. Die über der Kommissionierebene angeordneten Stellplätze dienen als Nachschubpuffer für die Entnahmeplätze. In diesem Kommissionierbereich stehen insgesamt 1.000 Kommissionierplätze zur Verfügung. Die Originalkartons werden auf einer Palette gesammelt, bis der Kommissionierauftrag systematisch abgearbeitet wurde. Die Mengen werden nach jeder Entnahme an den Lagerrechner gemeldet, um stets den aktuellen Lagerbestand abfragen zu können. Die Kommissionierleistung in diesem Bereich liegt bei durchschnittlich 8.000 Originalkartons pro Tag.

Die Auftragsinformationen werden über Datenfunk online vom Lagerverwaltungssystem an die mobilen Terminals der Kommissionierer übermittelt. Die Verteilung der Kommissionieraufträge berücksichtigt, dass die Kommissionierer wegeoptimiert nach dem Person-zur-Ware-Prinzip durch den Kommissionierbereich geführt werden. Sie werden über Vorgaben (Aufnahme-, Abgabe-, Bearbeitungshinweise) auf dem Display eines Datenterminals, das auf ihrem Kommissioniergerät montiert ist, zu den entsprechenden Plätzen geleitet. Die Lagerplatznummer, die Entnahmemenge und das -gewicht werden dabei direkt angezeigt. Über eine auf den Kommissioniergeräten angebrachte Waage wird das Ist-Gewicht mit dem theoretischen Entnahmegericht laut Stammdatum verglichen und dient dem Kommissionierer zur Kontrolle. Für Paletten mit mehreren Aufträgen wird je Originalkarton ein Versandetikett mit Barcode gedruckt. Zusätzlich erhält jede fertige Versandpalette ein Versandetikett. Der Etikettendruck erfolgt über einen auf dem Kommissioniergerät montierten Drucker. Die Druckdaten werden ebenfalls online übermittelt.

Das Kommissionieren einzelner Packungseinheiten oder Bündel wird in einem separaten Kommissionierbereich durchgeführt. Die Ware wird geordnet nach Durchsatzmengen der Artikel auf insgesamt 6.000 Pickplätzen entweder auf Palettenplätzen oder in Durchlauf- und Fachbodenregalen bereitgestellt (Abb. 9.6 und 9.7). Die Auftragsbehälter bzw. -kartons werden über eine Stetigfördertechnik durch den gesamten Kommissionierbereich von Station zu Station geleitet. Für jeden Kommissionierauftrag werden ein oder mehrere Kommissionierbehälter durch eine Volumenberechnung ermittelt. Jeder Behälter durchläuft die Behälterfördertechnikanlage bis zu den jeweiligen Entnahmeflächen. Die Auftragsinformationen werden beleglos über Pick-by-light-Anzeigen visualisiert. Die platzbezogenen Displays zeigen dem Kommissionierer die Entnahmemengen eines Artikels an. Nach



Abb. 9.6 Kommissionierung von einzelnen Packungseinheiten aus Durchlaufregalen [Foto: Lehrstuhl FLW]



Abb. 9.7 Kommissionierung von einzelnen Packungseinheiten aus Fachbodenregalen [Foto: Lehrstuhl FLW]

Entnahme und Bestätigung findet zu Kontrollzwecken eine Verwiegung der einzelnen Kommissionierbehälter statt. Anschließend erfolgt der Transport zum nächsten Entnahmebereich oder nach Beendigung des Auftrags zur Verpackung. Im Verpackungsbereich erfolgt der Ausdruck und die Beilegung der Lieferscheine in den jeweils letzten Behälter eines Auftrags. Abschließend wird Füllmaterial zugegeben und die Behälter werden automatisch verschlossen (Deckeln und Umreifen). Die Tagesleistung liegt in diesem Kommissionierungsbereich bei durchschnittlich 8.000 Behältern.

Die Kommissionierung von Kühlware erfolgt analog in entsprechend ausgestatteten Kühlräumen. PharmLog verfügt insgesamt über vier Kühlräume mit Verschieberegalanlagen und einer Kapazität von 2.500 Palettenstellplätzen. Die Kühlraumkommissionierung von einzelnen Packungseinheiten ist ebenfalls mit einer Pick-by-light-Anlage ausgestattet. Sie umfasst 1.000 Kommissionierplätze. Täglich werden 1.300 Kühlkartons bearbeitet und versendet. Die Verpackung der kommissionierten Kühlware erfolgt in einem speziellen Packbereich, der sich unterhalb der Kühlraumkommissionierung befindet und über einen Senkrechtförderer mit dem Bereich verbunden ist.

Im *Warenausgang* werden alle Aufträge aus den einzelnen Kommissionierungsbereichen zusammengeführt. Im Falle der Ganzpalettenkommissionierung und der Kommissionierung von Originalkartons entspricht die Kommissioniereinheit bereits der Versandseinheit. Die Aufträge erreichen den Warenausgang über eine Palettenfördertechnik. Die Ladungssicherung erfolgt automatisch auf der Förderstrecke. Behälter und Kartons aus den anderen Kommissionierungsbereichen müssen erst noch zu einer Versandseinheit gebündelt werden. An vier Sortierbahnen sowie vier weiteren Relationsbahnen im Warenausgangsbereich werden die einzelnen Kartons und Behälter aus dem Kommissionierungsbereich ausgeschleust. Bei den Relationsbahnen entspricht eine Bahn einer festgelegten Speditionsrelation. Bei den Sortierbahnen werden

mehrere Relationen ausgeschleust und die Behälter einzelnen Endempfänger- bzw. gebietsbezogenen Relationspaletten zugeordnet. Die Buchung eines Kartons bzw. Behälters auf eine Versandpalette erfolgt entweder mit Hilfe eines Handscanners oder per Spracheingabe über ein Headset. Die jeweilige Barcodenummer des Packstücks wird gescannt oder angesagt und der jeweiligen Nummer der Versandpalette zugeordnet.

Die fertigen Versandpaletten werden bis zur Verladung auf der Warenausgangsfläche zwischengepuffert. Abschließend wird die Verladung quittiert und über eine Datenschnittstelle an die Pharmahersteller übermittelt.

9.2 Mehrzoniges Kommissioniersystem

9.2.1 Ausgangssituation

Die Firma Arrow Electronics mit Hauptsitz in den USA ist der weltweit größte Großhändler von Elektronikkomponenten und Computerprodukten. Die drei dominierenden Elektronikmärkte der Welt in Amerika, Europa und im asiatisch-pazifischen Raum werden vom globalen Verteilernetzwerk der Firma Arrow abgedeckt. Das zentrale Standbein der Arrow-Gruppe bildet dabei der europäische Markt. Im Betrachtungszeitraum lag der Umsatz des Unternehmens bei 16,8 Mrd. US-Dollar. Weltweit werden rund 12.700 Mitarbeiter beschäftigt.

Innerhalb Zentraleuropas beliefert Arrow ca. 17.000 Kunden aus den Bereichen Maschinenbau, Mess- und Regeltechnik, Automobilzulieferung und Medizintechnik. Die ursprüngliche Versorgung der Kunden aus mehreren Regionallägern verteilt über ganz Europa hat Arrow aufgehoben und einen zentralen europäischen Distributionsstandort in Venlo, NL aufgebaut. Dadurch konnten die Bestandskosten gesenkt werden ohne die Lieferzeit zu verlängern. Mit mehr als 40 angesiedelten Distributionszentren unterschiedlicher Unternehmen ist Venlo einer der größten Logistikknoten in Europa. Durch die sehr gute Verkehrsanbindung und die zentrale Lage in der Mitte Europas können die Entfernung zu den Kunden von diesem Standort aus im Nachtsprung oder 48-Stunden-Takt überbrückt werden.

Auf einem 50.000 m² großen Gelände wurde ein Distributionszentrum errichtet, in dem 350 Personen in einem Zwei-Schicht-Betrieb arbeiten. Das Gebäude selbst hat eine Grundfläche von 41.000 m² und bietet durch die Integration mehrerer Bühnenebenen eine Lagerfläche von 48.000 m². Für 300.000 Artikel stehen insgesamt 450.000 Lagerplätze zu Verfügung.

Als Generalplaner für das Distributionszentrum war die Firma Vanderlande Industries verantwortlich. Die Systembeschreibung wurde in Anlehnung an die in [DUL05] gemachten Angaben vorgenommen.

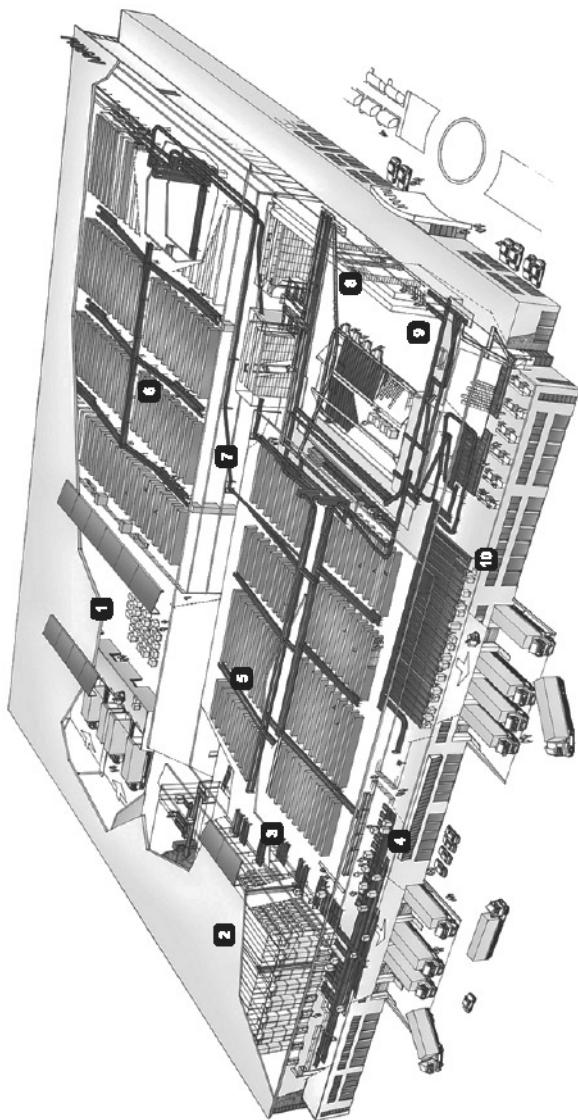


Abb. 9.8 Distributionszentrum [Grafik: Vanderlande Industries]

1 Warenausgang 2 Nachschublager 3 Auspackstationen 4 Kommissionierstationen 5+6 Fachbodenregalanlage 7 Konsolidierungspuffer 8 AKL für Schnelldreher 9 Verpackungsbereich
10 Warenausgang



Abb. 9.9 I-Punkt im Wareneingang [Foto: Vanderlande Industries]



Abb. 9.10 Auspackstationen im Wareneingang [Foto: Vanderlande Industries]

9.2.2 Systembeschreibung

Das Distributionszentrum besteht aus den Bereichen Wareneingang, Nachschublager, Kommissionierung, Verpackung und Versand. Im Folgenden werden die Prozessabläufe dem Materialfluss folgend über alle Bereiche hinweg beschrieben.

Im *Wareneingang* werden die Produkte in Form von einzelnen Packstücken oder gebündelt auf Paletten angeliefert. Die Lieferdaten werden automatisch von einer Software erfasst. Diese Software sorgt für eine optimale Flächenbelegung der Pufferplätze im Wareneingangsbereich, so dass insgesamt eine schnelle Abwicklung der Lieferungen und kurze Standzeiten der Lkw ermöglicht wird. Im Wareneingangsbereich können bis zu 5.000 Paletten pro Tag abgefertigt werden.

Sendungen, die komplett für einen Kunden bestimmt sind, werden vom Waren eingang umgehend in den Versandbereich transportiert. Sortenreine Paletten werden in das angrenzende *Nachschublager* eingelagert. Als Nachschublager wird ein Hochregallager für Paletten eingesetzt. Es besteht aus insgesamt acht Gassen und verfügt über eine Lagerkapazität von 4.146 Palettenstellplätzen. In jeder Gasse arbeitet ein Regalbediengerät. Vor der Einlagerung werden die einzulagernden Paletten über eine Fördertechnik geleitet und passieren einen sogenannten I-Punkt (Abb. 9.9). Dort wird eine automatische Überlastungskontrolle sowie eine Konturen- und Palettenkontrolle vorgenommen. Diesen I-Punkt können bis zu 50 Paletten pro Stunde durchlaufen.

Mischpaletten und einzelne Packstücke werden nicht im Hochregallager bevorr aget, sondern belastungsorientiert verschiedenen Auspackstationen zugewiesen (Abb. 9.10). Dort wird die Ware entpackt und für die direkte Bereitstellung im Kommissionierbereich vorbereitet.

Die *Kommissionierung* im Distributionszentrum erfolgt in drei Bereichen. Zum einen werden Artikel nach dem Prinzip Ware-zur-Person an Kommissionierplätzen

in der Vorzone des Hochregallagers und zum anderen nach dem Person-zur-Ware-Prinzip in einer Fachbodenregalanlage gepickt. Schnelldreher werden in einem AKL nahe dem Verpackungsbereich bevoorratet und von dort direkt in den Verpackungsbereich befördert.

Die eintreffenden Kundenaufträge werden zur Bearbeitung im Kommissionierbereich entsprechend aufbereitet. Dazu werden die Kundenaufträge in Teilaufträge für die jeweiligen Bereiche aufgesplittet und dort parallel bearbeitet.

In der Vorzone des Hochregallagers befinden sich zwei stationäre Kommissionierstationen für die Ware-zur-Person Kommissionierung. Dort werden Paletten aus dem Hochregallager zur Kommissionierung bereitgestellt. Alle Arbeitsplätze sind mit stationären Terminals und RF-Scannern ausgestattet. Die vorgesehenen Artikel werden von den Mitarbeitern von den Paletten entnommen, entsprechend mit einem Label gekennzeichnet und in einen Auftragsbehälter gelegt. Über eine Stetigfördertechnik werden die Auftragsbehälter abtransportiert. Einpositionenaufträge gelangen direkt in den Verpackungsbereich. Mehrpositionenaufträge werden vor der Verpackung zu einem Konsolidierungspuffer transportiert und dort so lange bevoorratet, bis alle Positionen eines Kundenauftrags eingetroffen sind.

Neben der Ware-zur-Person-Kommissionierung an den Kommissionierstationen erfolgt in einer Fachbodenregalanlage mit einer Bereitstellungskapazität von insgesamt 450.000 Lagerplätzen die manuelle Kleinteilekommissionierung nach dem Prinzip Person-zur-Ware. Die Artikel werden auf den Fachböden in Lagersichtkästen bereitgestellt. Artikel, die häufig angesprochen werden, sind auf optimaler Greifhöhe eingeordnet. Weniger nachgefragte Artikel sind in den oberen bzw. unteren Ebenen des Regals eingelagert. Hierdurch wird gewährleistet, dass der Großteil der Greifbewegungen des Kommissionierers ergonomischen Anforderungen entspricht.

Die gesamte Fachbodenregalanlage ist in mehrere Zonen aufgeteilt. Innerhalb einer Zone bewegen sich die Kommissionierer mit Hilfe eines Kommissionierwagens durch das System und bearbeiten mehrere Aufträge gleichzeitig (Abb. 9.11). Die Kommissionierung findet in diesem Fall mit Hilfe von Funkterminals papierlos und auftragsweise statt. Aufträge mit speziellen Kundenanforderungen werden ausgesuchten Mitarbeitern zugeteilt. Eilaufträge werden jedoch immer dem Kommissionierer zugewiesen, dessen Entfernung vom angesprochenen Artikel aktuell am geringsten ist. Mobile Drucker auf den Kommissionierwagen ermöglichen das Drucken von Transport-, Artikel- und bestimmten Sonderlabels vor Ort. An mehreren Aufgabestationen haben die Mitarbeiter die Möglichkeit, die Auftragsbehälter an eine Stetigfördertechnik zu übergeben. Diese sorgt für den Abtransport der Behälter aus dem Kommissionierbereich. Kundenaufträge mit nur einer Auftragsposition werden direkt in den Verpackungsbereich geleitet. Bestellungen mit mehreren Positionen aus verschiedenen Zonen gelangen zunächst zum Konsolidierungspunkt.

Die fertig kommissionierten Auftragsbehälter werden im Konsolidierungspuffer eingelagert. Als Konsolidierungspuffer wird ein AKL eingesetzt. Das AKL verfügt über 1.290 Behälterstellplätze. Zwei Regalbediengeräte mit jeweils zwei Lastaufnahmemitteln können eine Leistung von 486 Ein- und Auslagerungen pro Stunde erbringen. Im Konsolidierungspuffer werden alle Auftragsbehälter zunächst



Abb. 9.11 Kommissionieren in der Fachbödenregalanlage [Foto: Vanderlande Industries]



Abb. 9.12 Packplätze im Verpackungsbereich [Foto: Vanderlande Industries]

gebündelt, bevor sie in der richtigen Sequenzierung (z. B. Auftragsbehälter mit schweren Artikeln vor Auftragsbehältern mit leichten Artikeln) ausgelagert werden. Erreicht die letzte Lieferscheinposition eines Kundenauftrags das AKL, wird der komplette Auftrag freigegeben und belastungsorientiert den Verpackungsstationen zugeführt. Durch die Automatisierung der Konsolidierung wird zum einen eine erhebliche Steigerung der Qualität und zum anderen eine erhebliche Reduktion der Durchlaufzeiten ermöglicht.

Ein weiteres automatisches Kleinteilelager befindet sich direkt neben der Verpackung. Es übernimmt die Auftragspufferung von regelmäßigen wöchentlichen Lieferungen und bevorratet Schnelldreher. Das AKL wird von einem Regalbediengerät mit zwei Lastaufnahmemittel bedient und verfügt über 2.322 Behälterstellplätze. Artikel mit hoher Nachfrage müssen durch diese Art der Lagerung nicht per Hand kommissioniert werden und können direkt vom AKL der Verpackung zugeführt werden. Diese separate und vollautomatische Lagerung von Schnelldrehern und regelmäßigen wöchentlichen Aufträgen sorgt für eine Entlastung der übrigen Kommissionievorgänge und trägt somit zur Gesamtoptimierung und Flexibilitätssteigerung des Systems bei.

Die Auftragsbehälter werden entweder direkt aus den Kommissionierbereichen oder aus dem Konsolidierungspuffer an insgesamt 48 Verpackungsplätzen im *Ver sandbereich* weitergeleitet (Abb. 9.12). Hier findet eine abschließende Kontrolle der Artikel durch Wiegen und visuelle Überprüfung statt, bevor die Kundenaufträge versandfertig verpackt werden. Leere Kartons werden den Mitarbeitern über Durchlaufkanäle oberhalb der Zuführstrecken der Fördertechnik bereitgestellt.

Für besondere Kundenwünsche und Zusatzdienste wurden zwölf Sonderpackplätze eingerichtet. Dort können auf Wunsch beispielsweise Logos, Versandpapier, AGBs, Rechnungen und vieles mehr in den jeweiligen Landessprachen verfasst werden.

Ist ein Auftrag ordnungsgemäß verpackt, so wird er über stetige Fördertechnik zum *Warenausgang* geführt. Ein Sorter weist den einzelnen Kartons die entsprechenden Endstellen zu. Insgesamt befinden sich im Warenausgangsbereich 27 Endstellen mit staudrucklosen Förderern. Die Endstellen ermöglichen eine Sortierung der versandfertigen Kartons nach unterschiedlichen KEP-Dienstleistern oder Zielgebieten. Die einzelnen Kartons werden nun manuell palettiert und im Warenausgangspuffer zur Verladung bereitgestellt. Bei maximaler Systemauslastung verlassen den Warenausgang bis zu 10.000 Sendungen am Tag.

Parallel zu den beschriebenen Vorgängen sorgt ein innovatives, vollautomatisches Behältermanagementsystem jederzeit für Nachschub und Abtransport der Sammelbehälter. Leere Behälter werden aus dem Verpackungsbereich abtransportiert und dem Behälterpuffer zugeführt. Des Weiteren werden Behälter an den Aufgabestellen der manuellen Kommissionierung für die Mitarbeiter bereitgestellt. Je nach Systembelastung kann die Anzahl der im System befindlichen Behälter variieren.

9.3 Zweistufiges Kommissioniersystem

9.3.1 Ausgangssituation

Die Drogeriemarkt-Kette Kruidvat ist der niederländische Marktführer im Gesundheits- und Schönheitssektor. Die Tochter der weltweit agierenden A.S.Watson-Gruppe versorgt mit über 8.000 Mitarbeitern in rund 950 Niederlassungen wöchentlich zwei Millionen Kunden in den Niederlanden und in Belgien. Dabei bietet Kruidvat neben dem breitgefächerten Kosmetik-, Wellness- und Gesundheits-Programm seinen Kunden zusätzlich preisgünstige CDs, Spielzeuge, dekorative Haushaltsgegenstände und einen Foto-Service an. Für die reibungslose Verteilung der Waren an die einzelnen Filialen betreibt Kruidvat ein zentrales Distributionszentrum in Heteren, NL. Die intralogistischen Prozesse und Anlagen wurden von der Beumer-Gruppe optimiert.

9.3.2 Systembeschreibung

Die filialgerechte Zusammenstellung von Kosmetikartikeln in Kartons, Trays und anderen Gebinden erfolgt im Distributionszentrum der Drogeriekette täglich von 6 bis 20 Uhr in einem Zwei-Schicht-Betrieb. Das Layout des Distributionszentrums ist in Abb. 9.15 dargestellt. Zur filialgerechten Kommissionierung der Artikel wurde ein zweistufiges Kommissioniersystem mit Pick-to-belt installiert.

Im Wareneingang des Distributionszentrums werden Ganzpaletten angeliefert und in einem Nachschublager eingelagert. Das Nachschublager ist direkt im Kom-



Abb. 9.13 Pick-to-belt-Kommissionierung in der ersten Kommissionierstufe [Foto: Beumer]



Abb. 9.14 Kommissioniererführung mittels Pickwagen [Foto: Beumer]

missionierbereich integriert. Die artikelreinen Paletten werden in einem Palettenregallager bevoorraet, das von mehreren Hochregalstaplern bedient wird. Zwischen den Nachschubgängen, in denen die Stapler auf der Bodenebene verfahren, befindet sich jeweils ein Kommissioniergang, in dem jeweils auf einer Kommissionierebene in ca. 3 m Höhe eine Pick-to-belt-Anlage installiert ist. Die Kommissionierebene befindet sich auf etwa gleicher Höhe mit dem Sorter, damit die Endstellen (Rutschen) über ein entsprechendes Gefälle verfügen. Nach Bedarf werden die Ganzpaletten aus den Regalebenen ober- bzw. unterhalb der Kommissionierebene ausgelagert und durch den Hochregalstapler im Kommissionierbereich bereitgestellt.

In der ersten Kommissionierstufe werden die Artikel auf Paletten verteilt auf 21 Gassen mit jeweils 85 m Länge bereitgestellt. Eine Gasse verfügt über eine Bereitstellungskapazität von 88 Stellplätzen. Im gesamten Kommissionierbereich stehen durchschnittlich 2.310 Artikel pro Stunde im direkten Zugriff der Kommissionierer. In der Mitte jeder Gasse verläuft ein Bandförderer, der mit einer Geschwindigkeit von 0,37 m/s angetrieben ist.

Im Kommissionierbereich sind je nach Auftragsvolumen sieben bis acht Kommissionierer im Einsatz. Jeder einzelne erbringt eine durchschnittliche Kommissionierleistung von 1.150 Picks pro Stunde. Pro Gasse arbeitet max. ein Kommissionierer, der sich von Entnahmestelle zu Entnahmestelle bewegt und die angeforderte Artikelmenge entnimmt. Die Abgabe der Entnahmeeinheiten erfolgt dynamisch, direkt auf den Bandförderer (Abb. 9.13).

Die Kundenaufträge werden in Form von Batches abgearbeitet, d. h. eintreffende Kundenaufträge werden gesammelt und zu einem Kommissionierbatch aufbereitet. Ein Kundenauftrag entspricht einem Filialauftrag. In einem Batch werden durchschnittlich 25 Kundenaufträge zusammengefasst. Nach der Auftragsaufbereitung durch die übergeordnete Auftragsdisposition werden die Informationen in den Kommissionierbereich weitergeleitet. Die Kommissionierung wird artikelweise durch-

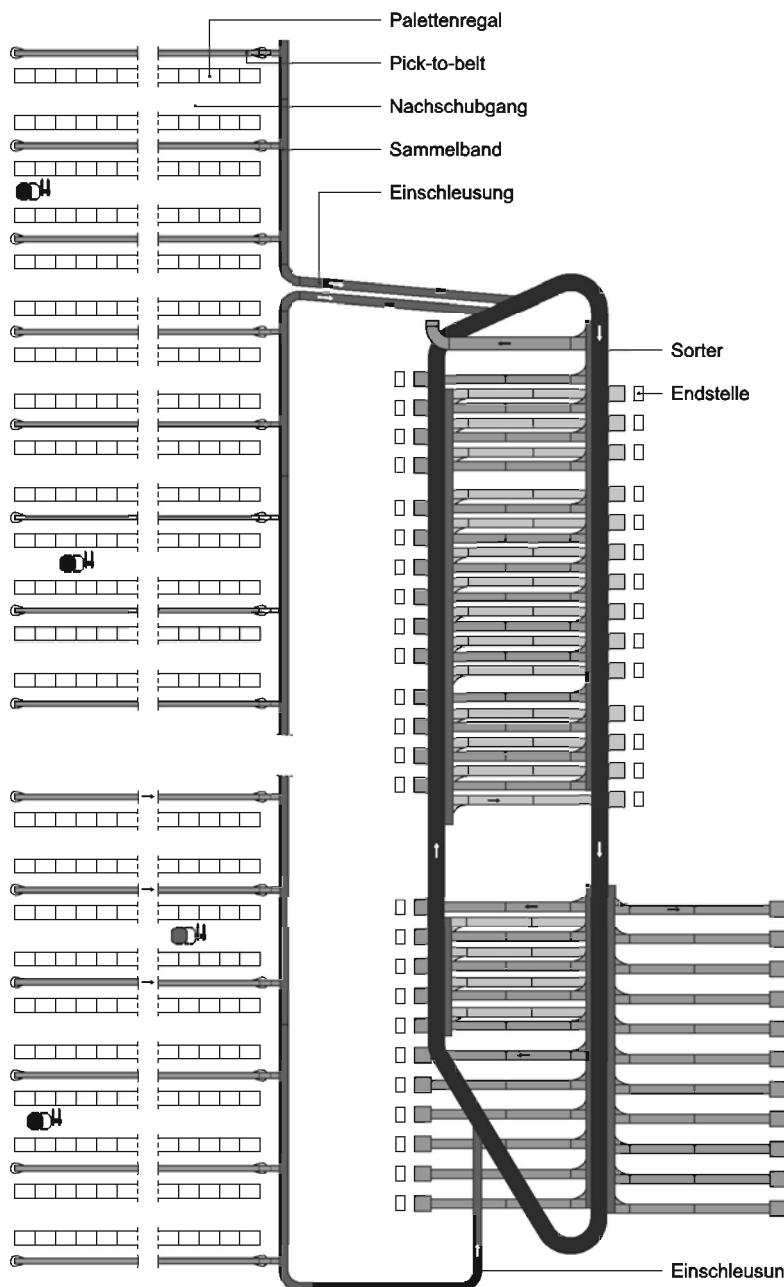


Abb. 9.15 Kruidvat Layout



Abb. 9.16 Transport der Artikel zur zweiten Kommissionierstufe [Foto: Beumer]



Abb. 9.17 Endstellen im Sortierbereich [Foto: Beumer]

geführt, d. h. in der ersten Kommissionierstufe ist keine Kundenkennung erforderlich. Ein Batch läuft ca. 45 bis 60 Minuten. Das Folgebatch wird erst gestartet, wenn im Kommissionierbereich das letzte Teil gepickt wurde, der Sorter leer gelaufen ist und ausreichend freie Endstellen zur Verfügung stehen.

Die Kommissionierung innerhalb der Gassen erfolgt mittels geführter verfahrbarer Terminals, die auf einem sogenannten Pickwagen parallel zum Bandförderer installiert sind (Abb. 9.14). Die Artikelinformationen wie Entnahmemenge und Standort werden auf dem Display des Terminals angezeigt. Der Kommissionierer führt den Pickwagen zum angezeigten Entnahmestandort und entnimmt die angeforderte Menge. Auf dem Pickwagen befindet sich neben einem Display und einem Handscanner auch ein Etikettendrucker. Mit dem Etikettendrucker können Barcodes und Etiketten für die Artikel eindeutig generiert und der jeweiligen Filiale zugeordnet werden. Die Ware kann so direkt nach der Entnahme mit dem filialgerechten Label etikettiert und in der zweiten Kommissionierstufe dem Kundenauftrag explizit zugeordnet werden.

Zur Erhöhung der gesamten Systemleistung besteht prinzipiell die Möglichkeit, auf der Bodenebene eine weitere Kommissionierebene einzuführen.

Nachdem die Waren in der ersten Kommissionierstufe artikelweise kommissioniert wurden, werden sie aus den 21 Gassen über Fördertechnik auf ein Sammelband und anschließend zum Sorter geführt (Abb. 9.16). Unmittelbar vor dem Sammelband wird die Geschwindigkeit des Bandförderers erst auf $0,94 \text{ m/s}$ und dann auf $1,19 \text{ m/s}$ erhöht. Das Sammelband fährt anschließend mit einer Geschwindigkeit von $1,47 \text{ m/s}$ in Richtung Sorter. Über insgesamt drei Einschleusungen gelangen die Artikel auf den Sorter. Diese drei Hochleistungseinschleusungen können stündlich jeweils bis zu 4.800 Einheiten verarbeiten. Wenn sich die Ware auf dem Sorter befindet, wird sie gescannt, identifiziert und auftragsbezogen in die vorgesehene Endstelle sortiert. Zur Sortierung der Waren wird ein Kippschalensorter eingesetzt. Dieser

verläuft ringförmig und verfügt über insgesamt 58 Endstellen. Der Sorter hat mit einer Geschwindigkeit von $1,75 \text{ m/s}$ eine Sortierleistung von bis zu 9.600 Schalen stündlich.

Eine noch höhere Flexibilität und Sortierleistung wird durch die Installation von zwei angetriebenen Speicherbändern an jeder der insgesamt 58 Endstellen erreicht. Diese sind hintereinander geschaltet und arbeiten nach dem Prinzip einer Bachtrennklappe. Dadurch haben die Mitarbeiter des Logistikzentrums die Möglichkeit, einen Kundenauftrag abzupacken, während auf dem zweiten Band der nächste Kundenauftrag bereits zusammengestellt wird. Die Freigabe des nächsten Batches erfolgt nach dem Prinzip des überlappenden Batches. Die Sortierleistung kann durch Steigerung der Sortergeschwindigkeit und Hinzufügen weiterer Einschleusbahnen erhöht werden. Letzteres ist allerdings nur begrenzt möglich.

An jeder Endstelle arbeitet ein Packer, der die Artikel eines Kundenauftrags auf Rungenpaletten packt und anschließend nach erfolgter Ladungssicherung im Warenausgang zum Versand bereitstellt (Abb. 9.17).

Zentrale Formeln im Überblick

Allgemeiner Berechnungsansatz

Kommissionierleistung

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

Kommissionierzeit

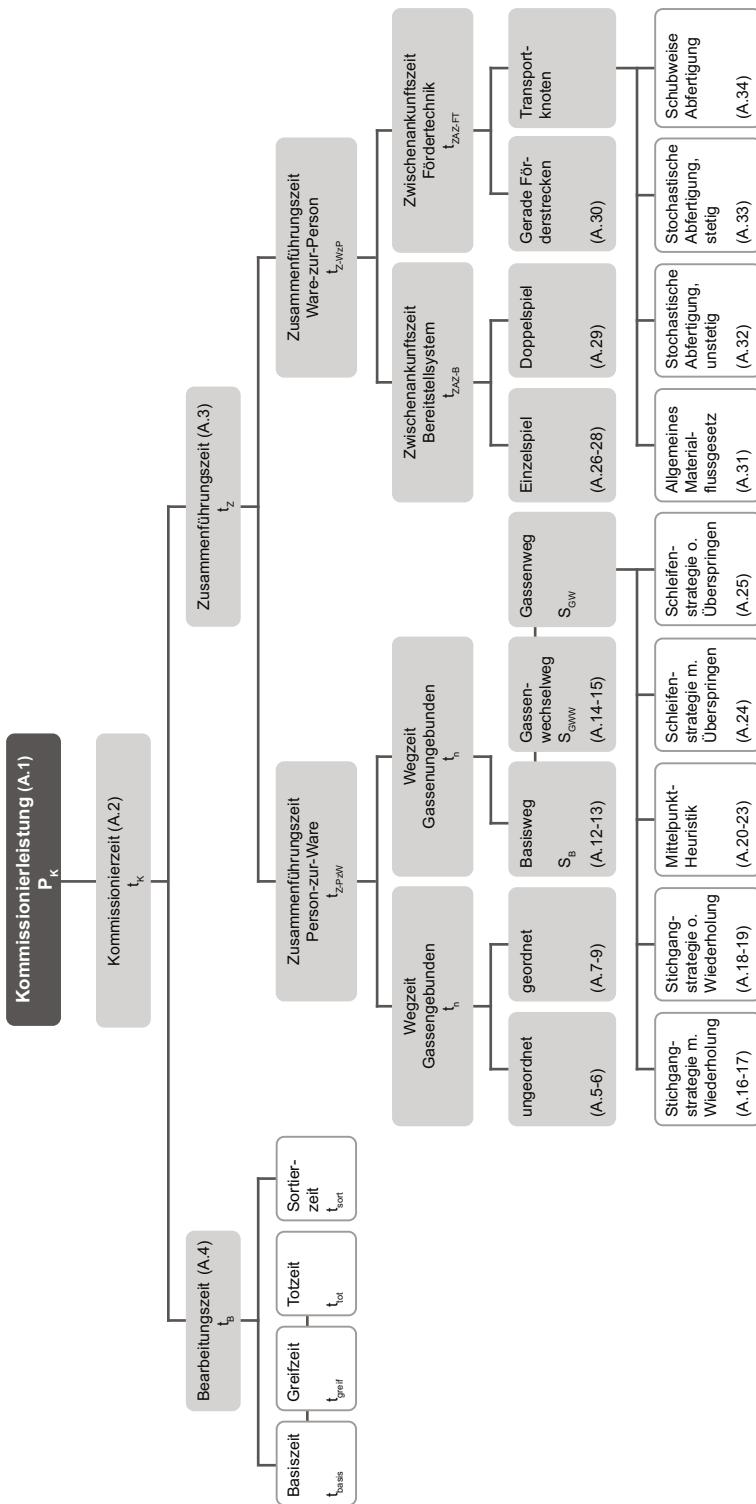
$$t_K = \begin{cases} t_Z + t_B & \text{für PzW} \\ \max(t_Z; t_B) & \text{für WzP} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Zusammenführungszeit

$$t_Z = \begin{cases} t_s & \text{für PzW} \\ \max(t_{ZAZ-B}; t_{ZAZ-FT}) & \text{für WzP} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Legende:

- | | | |
|--------------|---|---|
| P_K | = | Kommissionierleistung |
| t_B | = | Bearbeitungszeit |
| t_K | = | Kommissionierzeit |
| t_s | = | Wegzeit |
| t_Z | = | Zusammenführungszeit |
| t_{ZAZ-B} | = | Zwischenankunftszeit des Bereitstellsystems |
| t_{ZAZ-FT} | = | Zwischenankunftszeit der Fördertechnik |

**Abb. A.1** Aufbauübersicht allgemeiner Berechnungsansatz

Bearbeitungszeit

$$t_B = t_{basis} + t_{greif} + t_{tot} \quad (\text{A.4})$$

Zusammenführungszeit – Person-zur-Ware

Gassengebundene Betrachtung

Fall 1: Fortbewegung eindimensional, gassengebunden, ungeordnet

Wegzeit bei Gleichverteilung, wenn Start und Ziel nicht identisch sind:

$$t_n = \frac{1}{3} \cdot \frac{n \cdot L}{v} + n_a \cdot \frac{v}{a} \quad (\text{A.5})$$

Wegzeit bei Gleichverteilung, wenn Start und Ziel identisch sind:

$$t_n = \frac{L}{v} + (n - 1) \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{L}{v} + (n + 1) \cdot \frac{v}{a} \quad (\text{A.6})$$

Legende:

L	= Länge der Gasse
n	= Anzahl Positionen
n_a	= Anzahl Brems- und Beschleunigungsvorgänge
t_B	= Bearbeitungszeit
t_{basis}	= Basiszeit
t_{greif}	= Greifzeit
t_n	= Wegzeit
t_{tot}	= Totzeit

Fall 2: Fortbewegung eindimensional, gassengebunden, geordnet

Wegzeit bei Gleichverteilung, wenn Start und Ziel nicht identisch sind:

$$t_n = \frac{L}{v} + (n+1) \cdot \frac{v}{a} \quad (\text{A.7})$$

Wegzeit bei Gleichverteilung, wenn Start und Ziel identisch sind:

$$t_n = 2 \cdot \frac{n}{n+1} \cdot \frac{L}{v} + (n+1) \cdot \frac{v}{a} \quad (\text{A.8})$$

Wegzeit bei Exponentialverteilung, wenn Start und Ziel identisch sind:

$$t_n = 2 \cdot \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \cdot \frac{L}{v} + (n+1) \cdot \frac{v}{a} \quad (\text{A.9})$$

Gassenungebundene Betrachtung

Wegzeit

$$t_n = \begin{cases} \frac{s_n}{v} + \left[n + 1 + 2 \cdot N_G \cdot \left[1 - \frac{\binom{M-M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \right] \right] \cdot \frac{v}{a} & \text{für } \frac{s_n}{n} \geq \frac{v^2}{a} \\ \left[n + 1 + 2 \cdot N_G \cdot \left[1 - \frac{\binom{M-M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \right] \right] \cdot \sqrt{\frac{s_n}{n \cdot a}} & \text{für } \frac{s_n}{n} < \frac{v^2}{a} \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

Wegstrecke

$$s_n = s_B + s_{GWW} + s_{GW} \quad (\text{A.11})$$

Basisweg

dezentrale Basis

$$s_B = s_{B_1 B_2} + s_{B_2 B'} + s_{B' B_3} + s_{B_3 B_1} \quad (\text{A.12})$$

zentrale Basis

$$s_B = 2 \cdot s_{BB'} \quad (\text{A.13})$$

Gassenwechselweg

ohne Überspringen von Gassen

$$s_{GWW} = 2 \cdot B \quad (\text{A.14})$$

mit Überspringen von Gassen

$$s_{GWW} = 2 \cdot \frac{n}{n+1} \cdot B \quad (\text{A.15})$$

Legende:

B	= Gassenbreite
λ	= Parameter der Exponentialverteilung
L	= Länge der Gasse
M	= Anzahl Artikel gesamt
M_G	= Anzahl Artikel in einer Gasse
n	= Anzahl Positionen
N_G	= Anzahl Gassen
n_a	= Anzahl Brems- und Beschleunigungsvorgänge
s_B	= Basisweg
s_{GW}	= Gassenweg
s_{GWW}	= Gassenwechselweg
s_n	= Wegstrecke
t_n	= Wegzeit

Gassenweg

Stichgangstrategie mit Wiederholung

Gleichverteilung

$$s_{GW} = 2 \cdot n \cdot \left(L_C + \frac{1}{2} \cdot L \right) \quad (\text{A.16})$$

Exponentialverteilung

$$s_{GW} = 2 \cdot n \cdot \left(L_C + L \cdot \frac{1}{\lambda} \right) \quad (\text{A.17})$$

Stichgangstrategie ohne Wiederholung

Gleichverteilung

$$s_{GW} = 2 \cdot N_G \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G}{r} \cdot \binom{M-M_G}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + L \cdot \frac{r}{r+1} \right) \right] \quad (\text{A.18})$$

Exponentialverteilung

$$s_{GW} = 2 \cdot N_G \cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G}{r} \cdot \binom{M-M_G}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{\lambda} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right] \quad (\text{A.19})$$

Mittelpunkt-Heuristik**Kopfganglayout / Gleichverteilung**

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

$$\cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G/2}{r} \cdot \binom{M-M_G/2}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{2} \cdot \frac{r}{r+1} \right) \right]$$
(A.20)

Kopfganglayout / Exponentialverteilung

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

$$\cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G/2}{r} \cdot \binom{M-M_G/2}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{\lambda^*} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right]$$
(A.21)

Legende:

λ	= Parameter der Exponentialverteilung
L	= Länge einer Gasse
L_C	= konstantes Anfahrmaß
M	= Anzahl Artikel gesamt
M_G	= Anzahl Artikel in einer Gasse
n	= Anzahl Positionen gesamt
N_G	= Anzahl Gassen
r	= Anzahl Positionen in einer Gasse
s_{GW}	= Gassenweg

Zentralganglayout / Gleichverteilung

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

$$\cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G/2}{r} \cdot \binom{M-M_G/2}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{2} \cdot \frac{r}{r+1} \right) \right] \quad (\text{A.22})$$

Zentralganglayout / Exponentialverteilung

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

$$\cdot \sum_{r=1}^n \left[\frac{\binom{M_G/2}{r} \cdot \binom{M-M_G/2}{n-r}}{\binom{M}{n}} \cdot \left(L_C + \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{\lambda^*} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \right) \right] \quad (\text{A.23})$$

Schleifenstrategie mit Überspringen

$$s_{GW} = N_G \cdot (2 \cdot L_C + L) \cdot \left[1 - \frac{\binom{M-M_G}{n}}{\binom{M}{n}} \right] \quad (\text{A.24})$$

Schleifenstrategie ohne Überspringen

$$s_{GW} = \begin{cases} N_G \cdot (2 \cdot L_C + L) & \text{für } N_G \text{ gerade} \\ (N_G - 1) \cdot (2 \cdot L_C + L) + 2 \cdot \left(L_C + \frac{n}{n+N_G} \cdot L \right) & \text{für } N_G \text{ ungerade} \end{cases} \quad (\text{A.25})$$

Legende:

λ	= Parameter der Exponentialverteilung
L	= Länge einer Gasse
L_C	= konstantes Anfahrmaß
M	= Anzahl Artikel gesamt
M_G	= Anzahl Artikel in einer Gasse
n	= Anzahl Positionen gesamt
N_G	= Anzahl Gassen
r	= Anzahl Positionen in einer Gasse
s_{GW}	= Gassenweg

Zusammeführungszeit – Ware-zur-Person

Zwischenankunftszeit des Bereitstellsystems

mittlere Fahrzeit für ein Einzelspiel

Für den Fall $\omega = 1$

$$t_{ZAZ-B}^{\omega=1} = 2 \cdot \left(t_o + 2 \cdot t_{gab} + \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} + \frac{4}{3} \cdot \frac{L}{v_x} \right) \quad (\text{A.26})$$

Für den Fall $\omega \leq 1$

$$\begin{aligned} t_{ZAZ-B}^{\omega \leq 1} = & 2 \cdot (t_o + 2 \cdot t_{gab} \\ & + 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{L}{v_x} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{v_x}{v_y} \cdot \frac{H}{L} \right)^2 \right] \right]) \end{aligned} \quad (\text{A.27})$$

Für den Fall $\omega > 1$

$$\begin{aligned} t_{ZAZ-B}^{\omega > 1} = & 2 \cdot (t_o + 2 \cdot t_{gab} \\ & + 2 \cdot \left[\frac{A_u}{A} \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{A_o}{A} \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{H}{v_y} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{v_y}{v_x} \cdot \frac{L}{H} \right)^2 \right] \right]) \end{aligned} \quad (\text{A.28})$$

mittlere Fahrzeit für ein Doppelspiel

Für den Fall $\omega = 1$

$$t_{ZAZ-B} = t_{DS} = t_o + 4 \cdot t_{gab} + \frac{3}{2} \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{v_z}{a_z} \right) + \frac{54}{30} \frac{L}{v_x} \quad (\text{A.29})$$

Legende:

A	= Fläche
a_x	= Beschleunigung in x-Richtung
a_y	= Beschleunigung in y-Richtung
H	= Höhe des Regals
L	= Länge der Gasse
ω	= Regalwandparameter
t_{gab}	= Gabelspielzeit
t_o	= konstanter Fahrzeitanteil
t_{ZAZ-B}	= Zwischenankunftszeit des Bereitstellsystems
v_x	= Geschwindigkeit in x-Richtung
v_y	= Geschwindigkeit in y-Richtung

Zwischenankunftszeit der Fördertechnik

Gerade Förderstrecken / Eckumsetzer

$$\lambda = \frac{v}{s} \quad \left[\frac{1}{ZE} \right] \quad (\text{A.30})$$

Transportknoten

Das allgemeine Materialflussgesetz

$$\sum_{x=1}^k \sum_{i=1}^{c_i} \frac{\lambda_i(x)}{\mu_i(x)} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k v_{ij} \cdot t_{ij}^{ver} \leq 1 \quad (\text{A.31})$$

stochastische Abfertigung, unstetig

$$t_{ZAZ-TK} = \sum_{i=1}^k \left\{ \left[\sum_{x=1}^{c_i-1} p_i^x \cdot \frac{1-p_i}{\mu_i(x)} \right] + p_i^{c_i} \cdot \frac{1}{\mu_i(c_i)} \right\} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}^{ver} \quad (\text{A.32})$$

stochastische Abfertigung, stetig

$$t_{ZAZ-TK} = \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}^{ver} \quad (\text{A.33})$$

schubweise Abfertigung

$$t_{ZAZ-TK} \geq \frac{\sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i(c_i)}}{1 - v \cdot \left(\sum_{j=1}^{k-1} z_{j,j+1} + z_{k,1} \right)} \quad (\text{A.34})$$

Legende:

c_i	= Kapazität
k	= mittlere Anzahl Nebenstromobjekte, die zwischen zwei Objekten des Hauptstroms einen Konfliktbereich durchlaufen können
λ	= Durchsatz/Stromstärke
$\lambda_i(x)$	= Durchsatz/Stromstärke der Stromrichtung i
$\mu_i(x)$	= partielle Grenzleistung
v_{ij}	= Schaltfrequenz von Richtung i nach Richtung j [1/h]
p_i	= Wahrscheinlichkeit
s	= Abstand zwischen zwei Objekten
t_{ij}^{ver}	= Verlustzeit, die bei einer Umschaltung von der Betriebsart i zur Betriebsart j entsteht
t_{ZAZ-TK}	= Zwischenankunftszeit Transportknotens

Formelzeichen

a	Beschleunigung
A	gesamte Fläche der Regalwand
A_{ST}	Arbeitsgangbreite
A_o	Fläche oberhalb der Geschwindigkeitsgeraden des RBG
A_u	Fläche unterhalb der Geschwindigkeitsgeraden des RBG
B	Abstand zwischen der ersten und letzten Gasse eines konventionellen Kommissioniersystems
B_a	Breite einer Lagergasse
b_{BE}	Behälterbreite
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_{Fach}	Fachbreite
B_i	Bestand eines Artikels im Kommissionierlager
b_{RM}	Breite des Regalmoduls
b_{LM}	Breite des Lagermoduls
c	Kapazität eines unstetigen Transportknotens
c_{Fach}	Kapazität eines Bereitstellfachs
c_{Kanal}	Kapazität eines Bereitstellkanals
$E(s_{ij})$	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
f_R	Rezirkulationsverlustfaktor
f_S	Synchronisationsverlustfaktor
H_B	Höhe der Lagerfächer
H	Regalhöhe

h_{BE}	Behälterhöhe
h_{Fach}	Fachhöhe
h_{RM}	Höhe des Regalmoduls
h_{LM}	Höhe des Lagermoduls
\bar{k}	mittlere Anzahl Nebenstromobjekte, die zwischen zwei Objekten des Hauptstroms einen Konfliktbereich durchlaufen können
L	Länge einer Gasse, Regallänge
l_{BE}	Behälterlänge
L_{BL}	gesamte Bereitstelllänge
l_{RM}	Länge des Regalmoduls
l_{LM}	Länge des Lagermoduls
l_{Modul}	Modullänge eines Durchlaufregals
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
m_H	Anzahl Lagerfächer in horizontaler Richtung
m_V	Anzahl Lagerfächer in vertikaler Richtung
n	Anzahl Positionen pro Auftrag
n_p	mittlere Anzahl Picks pro Position
n_R	mittlere Anzahl Rezirkulierender Objekte
n_S	Anzahl Elemente eines Verteilförderers
n_T	Anzahl Elemente eines Verteilförderers, die zwischen zwei Objekten unbelegt bleiben
N_{BE}	Anzahl Bereitstelleinheiten
N_{BE-A}	durchschnittliche Anzahl Bereitstelleinheiten pro Artikel
N_{BE-DLR}	durchschnittliche Anzahl Bereitstelleinheiten in einem Durchlaufregalmodul
N_{BE-FBR}	durchschnittliche Anzahl Bereitstelleinheiten pro Fachbodenregalmeter
N_{DLR}	Anzahl erforderlicher Durchlaufregalmodule
N_E	Anzahl Endstellen des Sorters
N_{Fach}	Anzahl Bereitstellfächer
N_{FBR}	Anzahl erforderlicher Fachbodenregalmeter
N_{F_G}	Anzahl Bereitstellfächer in einer Gasse
N_{F_R}	Anzahl Lagerfächer an einer Regalwand
N_G	Anzahl Gassen im Lager
N_{Kanal}	Anzahl Durchlaufkanäle
N_{Pick}	durchschnittliche Anzahl Picks pro Position
N_{Pos}	Anzahl Positionen pro Tag
O	durchschnittliche Anzahl Kundenaufträge pro Tag

OAM	Oberes Anfahrmaß des Regalbediengerätes
P_K	Kommissionierleistung in Positionen pro Zeiteinheit
$P_{K,max}$	maximal erzielbare Kommissionierleistung
P_P	Pickleistung in Picks pro Zeiteinheit
P_{sort}	tatsächliche Sortierleistung pro Zeiteinheit
P_{real}	real erzielbare Kommissionierleistung
P_{Soll}	erforderliche Sortierleistung pro Zeiteinheit
p	Wahrscheinlichkeit
PDS	Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Doppelspiels
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
PES	Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Einzelspiels
r	Anzahl Positionen, die in einer Gasse gepickt werden
R_i	Lagerreichweite eines Artikels
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
SAM	seitliches Anfahrmaß des Regalbediengerätes
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_{BLZ}	Batchlaufzeit
t_{BZ}	Gesamtbetriebszeit pro Tag
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	mittlere Fahrzeit
$t_{F,ES}$	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_n^{opt}	mittlere Fahrzeit für die optimale Kommissionerrundfahrt
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
t_{BE}	Behältertiefe
t_{Fach}	Fachtiefe
t_{Kanal}	Kanaltiefe
UAM	unteres Anfahrmaß des Regalbediengerätes

v	Geschwindigkeit
V_{BE}	Volumen einer Bereitstelleinheit
V_i	mittlerer Verbrauch pro Artikel
v_s	Fördergeschwindigkeit
v_x	Fahrgeschwindigkeit
v_y	Hubgeschwindigkeit
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
V_{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

- [AGG90] Agteleky B (1990) Fabrikplanung, Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung. 2. Auflage
- [ARF07] Arnold D, Furmans K (2007) Materialfluss in Logistiksystemen. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- [ABB+01] Azuma R, Bailot Y, Behringer R et al (2001) Recent Advances in Augmented Reality. In: IEEE Computer Graphics & Applications 21, pp 34–47
- [ASG96] Bundesanstalt für Justiz (Hrsg.) (1996) Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit
- [ASI97] ASIM-Fachgruppe Simulation in Produktion und Logistik (1997) Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik. Mitteilungen aus den Fachgruppen, 58
- [BER70] Berg R (1970) Systematische Büro- und Verwaltungsbau-Planung
- [BGG00] Bleymüller J, Gehlert G, Gäßler H (2000) Statistik für Wirtschaftswissenschaftler. Verlag-Vahlen
- [DGU04] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (Hrsg.) (2004) Betreiben von Arbeitsmitteln – Betreiben von Kälteanlagen, Wärmepumpen und Kühlseinrichtungen. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften
- [BSS90] Bozer Y A, Schom E C, Sharp G P (1990) Geometric Approaches to solve the Chebychev Traveling Salesman Problem. In: IIE Transactions 22, pp 238–254
- [DIN 10075-2] Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.) (1996) Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - Gestaltungsgrundsätze. Beuth Verlag, Berlin
- [DIN 12100-2] Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.) (2003) Sicherheit von Maschinen – Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze – Technische Leitsätze. Beuth Verlag, Berlin
- [DIN 12464-1] Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.) (2003) Beleuchtung von Arbeitsstätten – Arbeitsstätten in Innenräumen. Beuth Verlag, Berlin
- [DIN 33402] Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.) (1998) Körpermaße des Menschen. Beuth Verlag, Berlin
- [DIN 6385] Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.) (2004) Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung der Arbeitssysteme. Beuth Verlag, Berlin
- [DIN 69901] Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.) (1987) Projektwirtschaft, Projektmanagement, Begriffe. Beuth Verlag, Berlin
- [DIN 9241-2] Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.) (2006) Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Anforderungen an die Arbeitsaufgabe. Beuth Verlag, Berlin
- [DWD81] Dolezalek C M, Warnecke H J, Dangelmaier W (1981) Planung von Fabrikanlagen. Springer Verlag, Berlin

- [DOM97] Domschke W (1997) Logistik: Rundreisen und Touren. 4. Auflage, Oldenbourg Verlag, München
- [DUL05] Dullinger K H (2005) Quo Vadis Material Handling. Vanderlande Industries, Mönchengladbach
- [EHR99] Ehrmann H (1999) Kompendium der praktischen Betriebswirtschaft. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- [ENK08] Engelhardt-Nowitzki C, Nowitzki O, Krenn B (2008) Praktische Anwendung der Simulation im Materialflussmanagement. Gabler Verlag
- [FÖL05a] Föller J (2005) Techniken zur Informationsbereitstellung in der Kommissionierung. In: F+H, pp 38–41
- [FÖL05b] Föller J (2005) Vergleichsstudie Pick-by-Voice-Systeme Teil 1 – Merkmale der Gerätetechnik. In: F+H, pp 387–388
- [FÜR74] Fürwentsches W (1974) Verfahren zur Planung und Bewertung von Kommissioniersystemen in Stückgut-Warenverteilanlagen des Handels und der Industrie. Dissertation, TU Berlin
- [GEB04] Genschel U, Becker C (2004) Schließende Statistik. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- [GKM01] Glass M, Kreppenhofer L, Markwardt U (2001) Regalbediengeräte mit Mehrfach-Lastaufnahme: Planungsrichtlinien und Steuerungsverfahren. TU Dresden, Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik
- [GOL89] Goldberg D E (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Publishing
- [GHN95] Greif S, Holling H, Nicholson N (1995) Theorien und Konzepte – Ein einführender Überblick. In: Arbeits- und Organisationspsychologie. Beltz Verlag, Weinheim
- [GRO84] Großeschallau W (1984) Materialflussrechnung. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- [GUD73] Gudehus T (1973) Grundlagen der Kommissioniertechnik – Dynamik der Warenverteil- und Lagersysteme. Gidaret W. Verlag, Essen
- [GUD76] Gudehus T (1976) Grenzleistungsgesetze bei Vorfahrt. In: Zeitschrift für Operations Research
- [GUD78] Gudehus T (1978) Die mittlere Zeilenzahl von Sammelaufträgen. In: Zeitschrift für Operations Research 22, pp B71–B78
- [GUD05] Gudehus T (2005) Logistik – Grundlagen, Strategien, Anwendungen. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- [GBS+09] Günthner W, Blomeyer N, Reif R, Schedlbauer M (2009) Pick-by-Vision: Augmented Reality unterstützte Kommissionierung. Abschlussbericht, Forschungsvorhaben (AiF-FV-Nr. 14756 N), TU München
- [HAN05] Hansl R (2005) Richtig lagern und kommissionieren – Die Systembetrachtung ist zielführend. In: F+H 12, pp 720–722
- [HEI98] Heinz K (1998) Vorlesungsskript – Fertigungsvorbereitung I. Universität Dortmund
- [HEW93] Heinz K, Wichmann A (1993) Kommissionier-Handbuch – Effiziente Gestaltung von Kommissionier-Arbeitsplätzen. Huss-Verlag, München
- [JEH99] Jehle E (1999) Produktionswirtschaft. 5. Auflage, Verlag Recht und Wirtschaft, Heidelberg
- [JtH06] Jodin D, ten Hompel M (2006) Sortier- und Verteilsysteme. Springer Verlag, Berlin
- [JÜN89] Jünemann R (1989) Materialfluss und Logistik. Springer Verlag, Berlin
- [JÜB98] Jünemann R, Beyer A (1998) Steuerung von Materialfluss- und Logistiksystemen – Informations- und Steuerungssysteme, Automatisierungstechnik. Springer Verlag, Berlin
- [JÜS99] Jünemann R, Schmidt T (1999) Materialflusssysteme – Systemtechnische Grundlagen. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo

- [KAB99] Kato H, Billinghurst M (1999) Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Augmented Reality
- [KRA96] Krallmann H (1996) Systemanalyse im Unternehmen. Oldenbourg Verlag, München Wien
- [KUH95] Kuhn A (1995) Prozessketten in der Logistik – Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien. Verlag Praxiswissen, Dortmund
- [KAI08] Kuhn A, Arnold D, Isermann H (2008) Handbuch der Logistik. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- [KÖC84] Köchling A (1984) Angestellte und Automation. Bundesvorstand, DGB (Hrsg.)
- [LAU92] Laurig W (1992) Grundtige der Ergonomie. Beuth Verlag, Berlin
- [LAW07] Law A M (2007) Simulation Modeling and Analysis. 4. Auflage, McGraw-Hill, Boston
- [LEH53] Lehmann G (1953) Praktische Arbeitsphysiologie. Thieme Verlag, Stuttgart
- [LIP03] Lippolt C R (2003) Spielzeiten in Hochregallagern mit doppeltiefer Lagerung. Universität Karlsruhe
- [LVA07] Bundesanstalt für Justiz (Hrsg.) (2007) Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung
- [LWW03] Luczak H, Weber J, Wiendahl H P (2003) Logistik – Benchmarking. Springer Verlag, Berlin
- [MAG05] Mackowiak J, Goldscheid L (2005) Ganzheitliche Bewertung und Optimierung manueller Arbeitsplätze in Kommissioniersystemen. Universität Dortmund
- [MIK94] Milgram P, Kishino F (1994) A taxonomy of mixed reality visual displays. In: IEICE Transactions of Information Systems E77-D, pp 1321–1329
- [MGB73] Mood A, Graybill F A, Boes D C (1973) Introduction to the theory of statistics. McGraw-Hill Education
- [OTS97] Ott M, Schulte J (1997) Kommissionieraufwand und Auftragsdurchlaufzeit in manuellen Lagern. In: Distribution 10, pp 34–39
- [OTT06] Ott M (2006) Einfluss einer dynamischen Auftragssteuerung in zweistufigen Kommissioniersystemen. Verlag Praxiswissen, Dortmund
- [POT95] Potyka S (1995) Systematik zur Selektion von Kommissioniersystemen in der Planung. Verlag Praxiswissen, Dortmund
- [RAH01] Rabe M, Hellingrath B (2001) Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik. SCS Verlag, San Diego
- [RSW08] Rabe M, Spieckermann S, Wenzel S (2008) Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik – Vorgehensmodelle und Techniken. Springer Verlag, Berlin
- [RAD00] Radtke A (2000) Beitrag zur Entwicklung optimierter Betriebsstrategien für Sortiersysteme. Verlag Praxiswissen, Dortmund
- [REF97] REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.) (1997) Methodenlehre der Betriebsorganisation – Datenermittlung. Carl Hanser Verlag, München
- [RIC97] Richter G (1997) Psychische Belastung am Arbeitsplatz. Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dresden
- [ROH54] Rohmert W (1954) Ermittlung von Erholpausen für statische Arbeit des Menschen. In: Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschl. Arbeitsphysiologie 18, pp 123–164
- [ROH84] Rohmert W (1984) Belastung – Beanspruchungskonzept. In: Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschl. Arbeitsphysiologie 38, pp 193–200
- [SAD07] Sadowsky V (2006) Beitrag zur analytischen Leistungsermittlung von Kommissioniersystemen. Verlag Praxiswissen, Dortmund
- [SCK97] Schmidt U, Kuhn A (1997) Angewandte Simulationstechnik für Produktion und Logistik. Verlag Praxiswissen, Dortmund
- [SCH93a] Schmidke H (1993) Ergonomie. Carl Hanser Verlag, München Wien

- [SCH98] Schoensleben P, (1998) Integrales Logistikmanagement – Planung und Steuerung von umfassenden Geschäftsprozessen. Springer Verlag, Berlin
- [SCH96] Schulte J (1996) Berechnungsgrundlagen konventioneller Kommissioniersysteme. Universität Dortmund
- [SCH93b] Schulte J (1993) Praxis des Kommissionierens – Warenfluss ohne Reibungsverluste. Königsbrunner Seminare GmbH, Augsburg
- [SCH86] Schwarting C (1986) Optimierung der ablauforganisatorischen Gestaltung von Kommissioniersystemen. HUSS Verlag GmbH, München
- [SHA75] Shannon R E (1975) Systems Simulation – The Art and Science. Prentice Hall
- [STA06] Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (Hrsg.) (2006) Psychische Belastungen am Arbeitsplatz – Ursachen, Folgen und Handlungsfelder der Prävention. LGL, Bayern
- [SUT05] Suthau T (2005) Sensorfusion von Augmented Reality Komponenten für die medizinische Navigation. In: Thomas Luhmann (Hrsg.), Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005
- [tHO99] ten Hompel M (1999) Lagerverwaltungssysteme. Verlag Praxiswissen, Dortmund
- [tHH06] ten Hompel M, Heidenblut V (2006) Taschenlexikon Logistik. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- [tHSN07] ten Hompel M, Schmidt T, Nagel L (2007) Materialflusssysteme, Förder- und Lagertechnik. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- [tHBF08] ten Hompel M, Büchter H, Franzke U (2008) Identifikationssysteme und Automatisierung. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- [tHS08] ten Hompel M, Schmidt T (2008) Warehouse Management. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- [VDI 2385] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (1989) VDI 2385 – Leitfaden für die materialflußgerechte Planung von Industrieanlagen. Beuth Verlag, Berlin
- [VDI 2492] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (1968) VDI 2492 – Multimoment-Aufnahmen im Materialfluß. Beuth Verlag, Berlin
- [VDI 2689] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (1974) VDI 2689 – Leitfaden für Materialflusstests, Beuth Verlag, Berlin
- [VDI 2860] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (1990) VDI 2860 – Montage- und Handhabungstechnik – Handhabungsfunktion, Handhabungseinrichtungen. Begriffe, Definitionen, Symbole. Beuth Verlag, Berlin
- [VDI 3311] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (1998) VDI 3311 Entwurf – Beleglose Kommissioniersysteme. Beuth Verlag, Berlin
- [VDI 3590a] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (1994) VDI 3590 Blatt 1 – Kommissioniersysteme – Grundlagen. Beuth Verlag, Berlin
- [VDI 3590b] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (2002) VDI 3590 Blatt 2 – Kommissioniersysteme – Systemfindung. Beuth Verlag, Berlin
- [VDI 3590c] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (2002) VDI 3590 Blatt 3 – Kommissioniersysteme – Praxisbeispiele. Beuth Verlag, Berlin
- [VDI 3633a] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (1996) VDI 3633 – Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffsdefinitionen. Beuth Verlag, Berlin
- [VDI 3633b] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (2000) VDI 3633 Blatt 1 – Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Beuth Verlag, Berlin
- [VDI 3657] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (1993) VDI 3657 – Ergonomische Gestaltung von Kommissionierarbeitsplätzen. Beuth Verlag, Berlin
- [VDI 4415] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (1999) VDI 4415 – Automatisierte Kommissionierung. Beuth Verlag, Berlin
- [VDI 4490] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (2007) VDI 4490 – Operative Logistikkennzahlen von Wareneingang bis Versand. Beuth Verlag, Berlin
- [VOS04] Voß W (2004) Taschenbuch der Statistik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München

- [WAN95] Wan Y W (1995) Which is better, off-line or real-time scheduling. In: International Journal of Production Research 33
- [WES02] Wesselmann J (2002) Entwicklung einer Systematik zum Benchmarking von Kommissioniersystemen mit Ähnlichkeitsgraden. Universität Dortmund

Sachverzeichnis

- Abfertigung
 - schubweise, 189, 196
 - stochastische, 188, 194, 196
- Vorfahrt, 189, 198
- Abgabe, 26, 27
 - dezentral, 26
 - dynamisch, 26
 - statisch, 26
 - zentral, 26
- Ablauforganisation, 34
 - einstufig, 35
 - zweistufig, 38
- AKL, 76, 219, 227
- Arbeitsspiel, 171
- Artikelstruktur, 33, 211
- Aufbauorganisation, 33
 - einzonig, 33
 - mehrzonig, 34
- Auftragsaufbereitung, 29
- Auftragsdisposition, 100
- Auftragsgruppe, 31
- Auftragsstruktur, 33, 211
- Automatische Kommissioniersysteme, 86
- Automatisches Kleinteilelager, *siehe AKL*
- Basisweg, 155
- Basiszeit, 133
- Batch, 38, 103
 - überlappend, 104
 - dynamisch, 105
 - fest, 103
- Freigabezeitpunkt, 104
- Batchbildung, 108
- Batchgröße, 104
- Batchkommissionierung, 38
- Batchplanung, 103
- Batchsteuerung, 103
- Beleggestaltung, 110
- Bereitstelleinheit, 7, 222
- Bereitstellfach, 222
- Bereitstellplatz, 222
- Bereitstellung, 21, 22
 - dezentral, 23
 - dynamisch, 23
 - statisch, 23
 - zentral, 23
- Bereitstellungskapazität, 222
- Betriebsorganisation, 40
- Bodenzeilenlagerung, 219
- Cross Docking, 12
- Datenanalyse, 210
- Dimensionierung, 221
- Distributionslogistik, 12
- Doppelspiel, 171, 180
- Durchgangstrategie, 95
- Durchlaufregal, 67, 73, 219, 224
- Eckumsetzer, 184
- Einflussgrößen
 - extern, 14
 - intern, 210
- Einzelaufrag, 31
- Einzelspiel, 171
- Entnahme, 25
- Entnahmeeinheit, 7
- Ergonomie, 111
 - Arbeitsbelastung, 112
 - Arbeitsplatzgestaltung, 120, 122
 - Beanspruchung, 116
 - Ermüdung, 117
 - Greifraum, 119
- Etagenwagen, 46

- Förderstrecke
 - gerade, 184
- Fördertechnik, 45
- Fachbödenregal, 67, 73, 219, 223
- fahrerloses Transportfahrzeug, 70
- Flexibilität, 216
- Fortbewegung
 - eindimensional, 24, 95
 - zweidimensional, 24, 99
- Gängigkeit, 212
- Gabelspielzeit, 172
- Gassenwechselweg, 154, 157
- Gassenweg, 154, 157
- genetische Algorithmen, 102
- geordnete Strategie, 99
- Greifzeit, 133
 - Berechnung, 137
- Grenzleistung
 - partielle, 192
- Handhabungstechnik, 50
- Horizontal-Kommissionierfahrzeug, 47
- hypergeometrische Verteilung, 160
- Informationsfluss, 7, 28
- Karusselllager, *siehe* Umlaufregal
- Kollipicken
 - automatisches, 85
- Kommissionier-U, *siehe* Kommissionierstation
- Kommissionierauftrag, 8
- Kommissionierbahnhof, 72
- Kommissioniereinheit, 7
- Kommissionieren
 - artikelweise, 38
 - auftragsparallel, 35
 - auftragsweise, 35
 - Definition, 4
 - eindimensional, 24
 - im Hochregal, 71
 - inverses, 89
 - konventionelles, 66
 - mit Bahnhöfen, 72
 - mit fahrerlosem Transportfahrzeug, 70
 - negatives, 25
 - zonenparallel, 36
 - zonensiell, 35
 - zweidimensional, 24
 - zweistufig, 38, 86, 103
- Kommissioniererführung, 52
 - mobiles Terminal, 55
- Pick-by-light, 54
- Pick-by-vision, 59
- Pick-by-voice, 57
- Pickliste, 52
- Put-to-light, 55
- stationäres Terminal, 53
- Kommissionierfehler, 214
- Kommissionierkosten, 213
- Kommissionierleistung, 215
- Kommissioniernest, 68, 217
- Kommissionierprinzipien, 41
- Kommissionierqualität, 110, 214
- Kommissionierroboter
 - stationär, 82
 - verfahrbarer, 74
- Kommissionierstapler, 48
- Kommissionierstation, 76
- Kommissioniersystem, 6
- Kommissioniertunnel, 69, 219
- Kommissionierwagen, 46
- Kompatibilität, 216
- Kundenauftrag, 8
 - Erfassung, 29
- Ladehilfsmittel, 51
- Lagereinheit, 7
- Lagerortkennzeichnung, 111
- Lagerplatzvergabe
 - ABC-Zonung, 94
 - frei, 92
 - kürzeste Fahrzeit, 92
 - kontinuierlich, 94
 - Zugriffshäufigkeit, 94
- Lagerplatzvergabestrategie, 92
- Lagertechnik, 43
- Langsamdreher, 217
- Largest-Gap-Heuristik, 98
- Liftsystem, 80, 219
- Mäander-Heuristik, 95
- Materialfluss, 7, 19
- Materialflussgesetz
 - allgemeines, 191
- Mitteldreher, 217
- Mittelpunkt-Heuristik, 98, 161
 - Kopfganglayout, 163, 166
 - Zentralganglayout, 165, 166, 274
- Monte-Carlo-Strategie, 101
- MTM-Verfahren, 135
- Niederhubwagen, 47
- Organisation, 8, 32
- Paternosterregal, 219
- Person-zur-Ware, 41, 66, 120

- Personalauswahl, 111
Pick, 9
Pick-to-belt, 86, 131
Position, 8
Prioritätsregeln, 101
Produktionslogistik, 12

Qualitätsverbesserung, 110
Quittierung, 32, 111

Rücktransport, 28
Random Walk, 101
Record-to-Record Travel, 102
Regalfront an AKL, 221
Regalpicker, 63

Sammelauftrag, 31
Schachtkommissionierer, 83, 219
Scheduling, 100, 107
Schleifenstrategie, 95
 mit Überspringen, 95, 96, 167
 ohne Überspringen, 168
Schnelldreher, 217
Schnittstellen
 Informationsfluss, 10
 Materialfluss, 9
Shuttlefahrzeug, 78
Shuttlesysteme, 78
Simulated Annealing, 102
Sintflut-Algorithmus, 102
Sortierzeit, 134
spitze Rampe, 138
Standardfahrrampe, 138
Stichgangstrategie, 97
 mit Gangwiederholung, 97, 157
 ohne Gangwiederholung, 97, 158
Streifenstrategie, 99
System, 4
 Definition, 4
Systeme vorbestimmter Zeiten, 135
Systemtypen, 65

Tablar, 81
Teilauftrag, 31
Threshold-Algorithmus, 102
Totzeit, 133, 172
Transporteinheit, 7
Transportknoten, 184
 halbstetiger, 187
 stetiger, 187, 196
 unstetiger, 187, 194
Traveling-Salesman-Problem, 95, 99
Turmregal, 80

Umlaufregal
 horizontal, 79
 vertikal, 80
Umschlaghäufigkeit, 212, 217
Urnenmodell, 159

Validierung, 239
Verbesserungsverfahren, 102
 r-opt, 102
Verfügbarkeit, 216
Verifikation, 238
Versandeinheit, 7
Vertikal-Kommissionierfahrzeug, 48
Vorfahrt, 189, 198

Ware-zur-Person, 41, 76, 122
Wegstrategie, 95
 eindimensional, 95
 zweidimensional, 99
Wegzeit, 169
Weitergabe, 32
Weiterreichsystem, 73
WF-Verfahren, 135

Zugriffshäufigkeit
 beliebig, 182
 gleichverteilt, 173
Zusammenführungszeit, 129, 138
Zwischenankunftszeit, 129