

FORSCHUNGSBERICHT

W. A. Günthner · T. Staab

OptiMAL – Optimale Planung manueller
Lagersysteme

Forschungsbericht

zu dem IGF-Vorhaben

OptiMAL – Optimale Planung manueller Lagersysteme

der Forschungsstelle

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

Das IGF-Vorhaben 18274 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V. - BVL wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik,

Printed in Germany 2016

ISBN: 978-3-941702-66-0

fml – Lehrstuhl für

Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Tel.: + 49.89.289.15921

Fax: + 49.89.289.15922

www.fml.mw.tum.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Formelzeichenverzeichnis	7
1 Einleitung	17
1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung	17
1.2 Forschungsziel	19
1.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse	19
1.2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	20
1.2.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	20
2 Grundlagen manuell bedienter Lagersysteme	23
2.1 Grundlagen der Lagersysteme	23
2.1.1 Subsystem Lagereinheiten	24
2.1.2 Subsystem Lagereinrichtung	25
2.1.3 Subsystem Lagerbedienung	26
2.1.4 Subsystem Kommissionierung	27
2.2 Konfiguration	27
2.2.1 Konfiguration bei Einheitenlagerung	27
2.2.2 Konfiguration bei Kommissionierung	30
2.2.3 Konfiguration bei Kommissionierung mit Nachschub	31
2.3 Strategien	32
2.3.1 Strategien bei Einheitenlagerung	33
2.3.2 Strategien bei Kommissionierung	34
2.3.3 Strategien bei kombinierten Bereichen	38
2.4 Dimensionierung	39
2.5 Planung manuell bedienter Lagersysteme	39
2.5.1 Bewertung von Lagersystemen	40
2.5.2 Planungsvorgehen für manuell bediente Lagersysteme	45
2.6 Fazit zur Planung manuell bedienter Lagersysteme	47
3 Grundsätzliche Überlegungen zur Planungsmethode	51

3.1	Generierung von Planungsalternativen	52
3.1.1	Zuweisung von Artikeln zu Lagerbereichen	54
3.1.2	Ausgestaltung der Lagerbereiche	56
3.2	Bewertung der Planungsalternativen	56
4	Modell zur Bewertung der Geometrie	59
4.1	Einordnung des Modells und Anforderungsdefinition	59
4.2	Grundlegender Aufbau des Modells	60
4.3	Berechnung des Lagerplatzes	62
4.3.1	Kanalförmiger Lagerplatz	63
4.3.2	Stapelförmiger Lagerplatz	64
4.4	Berechnung der Anzahl benötigter Lagerplätze	66
4.5	Berechnung des Fachmoduls	68
4.6	Berechnung des Gangmoduls	70
4.6.1	Einseitig bediente Lagereinrichtung	70
4.6.2	Beidseitig bediente Lagereinrichtung	71
4.7	Berechnung des Lagermoduls	72
4.7.1	Berechnung bei Anordnung als Stirnganglayout	72
4.7.2	Berechnung bei Anordnung als Zentralganglayout	73
4.8	Erweiterung um die Kombination von Kommissionier- und Nachschubbereich	74
4.8.1	Vorüberlegungen für die Abbildung kombinierter Lagerbereiche	75
4.8.2	Aufbau des Layouts kombinierter Lagerbereiche	76
4.9	Zielgrößen und weiterzugebende Größen aus dem Bereich Geometrie	80
5	Modell zur Bewertung der Leistung	83
5.1	Einordnung des Modells und Anforderungsdefinition	83
5.2	Grundlegender Aufbau des Modells	85
5.3	Bedientechnikbedarfs- und Spielzeitberechnung bei Einheitenlagerung	86
5.3.1	Spielzeitberechnung des Einzelspiels zur Einlagerung	88
5.3.2	Spielzeitberechnung des Einzelspiels zur Auslagerung	93
5.3.3	Spielzeitberechnung des Doppelspiels	94
5.3.4	Bedientechnikbedarfsberechnung	100
5.4	Bedientechnikbedarfs- und Spielzeitberechnung bei Kommissionierung	100

5.4.1	Spielzeitberechnung der Entnahme bei ein-/zweidimensionaler Bewegung	101
5.4.2	Spielzeitberechnung des Nachschubs bei ein-/zweidimensionaler Bewegung	105
5.4.3	Spielzeitberechnung der Entnahme bei zwei-/dreidimensionaler Bewegung	106
5.4.4	Spielzeitberechnung des Nachschubs bei zwei-/dreidimensionaler Bewegung	108
5.4.5	Bedientechnikbedarfsberechnung	108
5.5	Bedientechnikbedarfs- und Spielzeitberechnung bei kombinierten Kommissionier-/Nachschubbereichen	111
5.5.1	Spielzeitberechnung der Entnahme	112
5.5.2	Grundlegende Formeln für wiederkehrende Spielanteile	112
5.5.3	Spielzeitberechnung des Einzelspiels zur Einlagerung	116
5.5.4	Spielzeitberechnung des Einzelspiels zur Umlagerung	116
5.5.5	Spielzeitberechnung des Doppelspiels	116
5.5.6	Bedientechnikbedarfsberechnung	117
6	Modell zur Bewertung der Kosten	119
6.1	Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit	119
6.1.1	Formulierung der Bewertungskriterien	121
6.1.2	Gewichtung der Bewertungskriterien	122
6.1.3	Auswahl von Kriteriumsausprägungen	123
6.1.4	Alternativenbewertung	123
6.1.5	Berechnung des Nutzwertes und Auswahl eines Verfahrens	123
6.2	Aufbau des Modells zur Bewertung der Kosten	124
6.2.1	Berechnung der laufenden Kosten	124
6.2.2	Berechnung der relevanten Kostenanteile manuell bedienter Lagersysteme	126
7	Aufbau der Planungsmethode	133
7.1	Formulierung der Planungsaufgabe als Optimierungsproblem	133
7.2	Auswahl eines Lösungsansatzes	137
7.3	Funktionsweise der Planungsmethode	141
7.3.1	Einordnung in den Planungsprozess und grundlegender Ablauf der Planungsmethode	141

7.3.2	Möglichkeiten zur Konfiguration der Planungsmethode	145
7.3.3	Erhaltung der Flexibilität des Planers	146
8	Implementierung eines Demonstrators zur optimalen Planung manuell bedienter Lagersysteme	147
8.1	Aufbau und Bedienung des Demonstrators	147
8.1.1	Programmstruktur	148
8.1.2	Benutzeroberfläche zur Datenein-/ausgabe	150
8.1.3	Ablauf der Optimierung	151
8.1.4	Benutzeroberfläche zur Datenausgabe und Anpassung von Planungsalternativen	153
8.2	Validierung	155
8.2.1	Validierung des Modells zur Geometriebewertung	155
8.2.2	Validierung des Modells zur Bewertung der Leistung	156
8.2.3	Validierung der Kostenbewertung	157
8.3	Evaluation der Planungsmethode	157
8.3.1	Fragebogen: Fragen zur Person (Fragen 1-4)	158
8.3.2	Fragebogen: Fragen zur Bedienung des Demonstrators (Fragen 5-22)	159
8.3.3	Fragebogen: Fragen zur Datenausgabe und Anpassung von Lagerbereichen (Fragen 23-33)	159
8.3.4	Fragebogen: Fragen zum Konzept des Demonstrators (Fragen 34-35)	160
9	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	161
9.1	Zusammenfassung	161
9.2	Ausblick	163
	Literaturverzeichnis	164
	Abbildungsverzeichnis	171
	Tabellenverzeichnis	175
	Anhang A Tabellen	A-1
	Anhang B Berechnung der mittleren Wegzeit pro Position bei zwei-/dreidimensionaler Kommissionierung	B-1
	Anhang C Fragebogen zur Evaluation des Demonstrators	C-1

Formelzeichenverzeichnis

Die in dieser Arbeit verwendeten Formelzeichen sind in der nachfolgenden Tabelle in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt.

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	m ²	Fläche (des Lagerbereichs, falls nicht über Index einen spezifiziert)
A_{Netto}	m ²	Netto-Nutzfläche
B	m	Lagerbereichsbreite für die Kommissionierleistungsberechnung
b^+	m/s ²	Anfahrbeschleunigung
b^-	m/s ²	Bremsbeschleunigung
b_{Bed}	m	Breite eines Bediengerätes
b_{FM}	m	Breite eines Fachmoduls
b_{GA}	m	Gangbreite
$b_{GA,A}$	m	Auslagergangbreite
$b_{GA,E}$	m	Einlagergangbreite
b_{GM}	m	Breite eines Gangmoduls
b_{LE}	m	Breite der Lagereinheit
b_{LM}	m	Breite eines Lagermoduls
b_{LP}	m	Breite eines Lagerplatzes
b_m	m/s ²	Beschleunigungskonstante der eindimensionalen Bewegung
b_{VG}	m	Verkehrsgangbreite
b_{ZG}	m	Zentralgangbreite
d	-	Ausprägungsvektor eines Lagerbereichs
d_{LE}	m	Abstand zwischen zwei Lagereinheiten und zwischen Lagereinheit und Regalsteher
η_A	-	Flächennutzungsgrad
η_{Ausl}	-	Auslastbarkeit
η_{DS}	-	Doppelspielanteil
$\eta_{Füll}$	-	Anzahl an Positionen pro Bereitstelleinheit
$\eta_{Füll,tats}$	-	Tatsächlicher Lagerfüllgrad

Formelzeichenverzeichnis

η_V	-	Volumennutzungsgrad
η_{Verf}	-	Verfügbarkeit
f_{GM}	-	Korrekturfaktor für Gangmodulaustrprägung
f_{ij}	-	Variable zur Beschreibung der Kompatibilität von Artikel und Lagerbereich
f_{Layout}	-	Korrekturfaktor für Layoutaustrprägung
H	m	Gassenhöhe für die Spielzeitberechnung
h	m	Höhe (des Lagerbereichs, falls nicht über Index spezifiziert)
$h_{AM,O}$	m	Oberes Anfahrmaß
$h_{AM,U}$	m	Unteres Anfahrmaß
h_{Bed}	m	Bedienbare Höhe
h_{FM}	m	Höhe eines Fachmoduls
$h_{Fr,LP}$	m	Vertikales Freimaß im Lagerplatz
h_{Geb}	m	Nutzbare Gebäudehöhe
h_{GM}	m	Höhe eines Gangmoduls
h_{LE}	m	Höhe der Lagereinheit
h_{LM}	m	Höhe eines Lagermoduls
h_{LP}	m	Höhe eines Lagerplatzes
h_{Tr}	m	Höhe der Traverse
i	-	Kalkulatorischer Zinssatz Laufvariable
j	-	Laufvariable
k	-	Laufvariable
K_{Fix}	€/Periode	Fixkosten
$K_{Fix,A}$	€/Periode	Fixkosten für den Flächenbedarf bei pausch. Kostensatz
$K_{Fix,Ab}$	€/Periode	Fixkosten durch Abschreibungen
$K_{Fix,Ab,A}$	€/Periode	Fixkosten durch Abschreibungen auf die Fläche bei pausch. Kostensatz
$K_{Fix,Ab,G}$	€/Periode	Fixkosten durch Abschreibungen auf die Fläche bei Grundstückskauf

$K_{Fix, Bed}$	€/Periode	Fixkosten für Bediengeräte
$K_{Fix, G}$	€/Periode	Fixkosten für den Flächenbedarf bei Grundstückskauf
$K_{Fix, ges}$	€/Periode	Gesamte Fixkosten
$K_{Fix, Kap}$	€/Periode	Fixkosten durch Kapitalbindung
$K_{Fix, Kap, A}$	€/Periode	Fixkosten durch Kapitalbindung der Fläche bei pausch. Kostensatz
$K_{Fix, Kap, G}$	€/Periode	Fixkosten durch Kapitalbindung der Fläche bei Grundstückskauf
$K_{Fix, Sonst}$	€/Periode	Sonstige Fixkosten
$K_{Fix, Sonst, A}$	€/Periode	Sonstige Fixkosten für den Flächenbedarf bei pausch. Kostensatz
$K_{Fix, Sonst, Bed}$	€/Periode	Sonstige Fixkosten für Bediengeräte
$K_{Fix, Sonst, G}$	€/Periode	Sonstige Fixkosten für den Flächenbedarf bei Grundstückskauf
$k_{Fix, Sonst, G}$	€/(m ² *Per.)	Flächenabhängiger Fixkostensatz für den Flächenbedarf bei Grundstückskauf
$K_{Fix, Sonst, Geb}$	€/Periode	Sonstige Fixkosten für das Gebäude
$K_{Fix, Sonst, G, konst}$	€/Periode	Sonstige konstante Fixkosten für den Flächenbedarf bei Grundstückskauf
$K_{Fix, Sonst, LE}$	€/Periode	Sonstige Fixkosten für die Lagereinrichtung
K_{FM}	LE	Fachmodulkapazität
K_{GM}	LE	Gangmodulkapazität
K_I	€	Investitionshöhe
$K_{I, A}$	€	Investitionshöhe durch Fläche bei pausch. Kostensatz
$k_{I, A}$	€/m ²	Pauschaler Flächenkostensatz
$K_{I, Bed}$	€	Investitionshöhe der Bediengeräte
$k_{I, Bed}$	€	Preis eines Bediengeräts
$K_{I, Bed, sonst}$	€	Sonstige Investitionen der Bediengeräte
$K_{I, BP}$	€	Investitionshöhe der Bodenplatte
$k_{I, BP}$	€/m ²	Kostensatz der Bodenplatte (durch Index für Breit- oder Schmalgangsystem spezifiziert)
$K_{I, G}$	€	Investitionshöhe durch Fläche bei Grundstückskauf
$k_{I, G}$	€/m ²	Grundstückskosten
$K_{I, Geb}$	€	Investitionshöhe des Gebäudes
$K_{I, G, sonst}$	€	Sonstige Investitionen bei Grundstückskauf
$K_{I, LE}$	€	Investitionshöhe der Lagereinrichtung
$k_{I, LE}$	€/SP	Kostensatz der Lagereinrichtung
$K_{I, LE, Sonst}$	€	Sonstige Investitionen der Lagereinrichtung
$K_{I, UR}$	€	Investitionshöhe des umbauten Raums

$K_{I,UR}$	€/m ³	Kostensatz für umbauten Raum
K_L	€/Periode	Laufende Kosten
$K_{L,A}$	€/Periode	Laufende Kosten für die Fläche
$K_{L,Bed}$	€/Periode	Laufende Kosten der Bediengeräte
$K_{L,Geb}$	€/Periode	Laufende Kosten des Gebäudes
$K_{L,LE}$	€/Periode	Laufende Kosten der Lagereinrichtung
K_{LM}	LE	Lagermodulkapazität
K_{LP}	LE	Lagerplatzkapazität
$K_{L,Pers}$	€/Periode	Laufende Kosten des Personals
K_{Var}	€/Periode	Variable Kosten
k_{Var}	-	Zuschlagsfaktor für variable Kosten
$k_{Var,Bed}$	-	Zuschlagsfaktor für variable Kosten der Bediengeräte
$k_{Var,Geb}$	-	Zuschlagsfaktor für variable Kosten des Gebäudes
$K_{Var,ges}$	€/Periode	Gesamte variable Kosten
$k_{Var,LE}$	-	Zuschlagsfaktor für variable Kosten der Lagereinrichtung
$k_{Var,Pers}$	-	Zuschlagsfaktor für variable Kosten des Personals
L	m	Gassenlänge für die Spielzeitberechnung
λ	-	Parameter der neg. Exponentialverteilung
$I_{AM,H}$	m	Hinteres Anfahrmaß
$I_{AM,V}$	m	Vorderes Anfahrmaß
I_{FM}	m	Länge eines Fachmoduls
I_{GM}	m	Länge eines Gangmoduls
I_{LE}	m	Länge der Lagereinheit
I_{LM}	m	Länge eines Lagermoduls
I_{LP}	m	Länge eines Lagerplatzes
I_{St}	m	Länge eines Regalstehers
I_{Tr}	m	Länge der Traverse bei Einfahr- und Durchfahrregal
M	-	Mächtigkeit der Lösungsmenge
M_B	LE	Bestand (Mittelwert, falls nicht über Index spezifiziert)
n	-	Anzahl, über Index spezifiziert
n_{Art}	-	Anzahl an Artikeln

$n_{Art,Ga}$	-	Anzahl an Artikeln in einer Lagergasse
n_{Bed}	-	Bediengerätebedarf
$n_{Bed,Ent}$	-	Bediengerätebedarf des Bediengerätetyps zur Entnahme
$n_{Bed,Ga}$	-	Bediengerätebedarf des Bediengerätetyps in der Lagergasse
$n_{Bed,Nach}$	-	Bediengerätebedarf des Bediengerätetyps für Nachschubbereitstellung
$n_{Bed,VG}$	-	Bediengerätebedarf des Bediengerätetyps im Verkehrsgang
n_{FM}	-	Anzahl an Fachmodulen, Bezugsrichtung über Index spezifiziert
n_{GM}	-	Anzahl an Gangmodulen, Bezugsrichtung über Index spezifiziert
n_K	-	Anzahl an Kombinationen von Artikeln
n_{LB}	-	Anzahl an Lagerbereichen
n_{LP}	-	Anzahl an Lagerplätzen, Bezugsrichtung über Index spezifiziert
$n_{LP,Soll}$	-	Lagerplatzbedarf
n_{nutz}	Perioden	Nutzungsdauer
n_{Pers}	-	Personalbedarf
n_{Pos}	-	Anzahl an Positionen eines Kommissionierauftrags
n_{SP}	-	Anzahl an Stellplätzen, Bezugsrichtung über Index spezifiziert
$n_{SP,y,tech}$	-	Max. Stapelfaktor der Lagereinheit
P_{Bed}	LE/s	Kombinierte Ein- und Auslagerleistung eines Bediengeräts
$P_{Bed,Ent}$	Picks/s	Entnahmeleistung eines Bediengeräts
$P_{Bed,Ent,Ga}$	Picks/s	Teilleistung in der Lagergasse eines Bediengeräts zur Entnahme bei Gassenbindung
$P_{Bed,Ent,VG}$	BE/s	Teilleistung im Verkehrsgang eines Bediengeräts zur Entnahme bei Gassenbindung
$P_{Bed,Nach}$	BE/s	Nachschubleistung eines Bediengeräts
$P_{Bed,Nach,Ga}$	BE/s	Teilleistung in der Lagergasse eines Bediengeräts zur Bereitstellung von Nachschub bei Gassenbindung
$P_{Bed,Nach,VG}$	BE/s	Teilleistung im Verkehrsgang eines Bediengeräts zur Bereitstellung von Nachschub bei Gassenbindung
P_{DS}	LE/s	Doppelspielleistung
$P_{ES,Aus}$	LE/s	Auslagerleistung
$P_{ES,Ein}$	LE/s	Einlagerleistung
$P_{ES,Um}$	LE/s	Umlagerleistung
P_{Gasse}	-	Zugriffswahrscheinlichkeit auf eine Lagergasse
P_{GW}	-	Gassenwechselwahrscheinlichkeit

P_{Soll}	LE/s	Kombinierter Ein- und Auslagerleistungsbedarf
$P_{Soll,Ent}$	Picks/s	Kommissionierleistungsbedarf
$P_{Soll,Nach}$	LE/s	Nachschubleistungsbedarf
r	-	Laufvariable
s	m	Strecke
s^*	m	kürzeste Strecke, für die v_{Max} erreicht wird
s_B	m	Mittlere Strecke zwischen Basis und Kommissionierbereich
$s_{B \rightarrow G}$	m	Mittlere Strecke zwischen Basis und Lagergasse
$s_{B \rightarrow G,A}$	m	Mittlere Strecke zwischen Basis und Auslagergasse
$s_{B \rightarrow G,E}$	m	Mittlere Strecke zwischen Basis und Einlagergasse
s_G	m	Mittlere Strecke in den Lagergassen pro Kommissionierspiel
$s_{G,E \rightarrow G,A}$	m	Mittlere Strecke zwischen Einlager- und Auslagergasse
s_{Ges}	m	Gesamte zurückzulegende Strecke
s_{GW}	m	Mittlere Strecke zum Gassenwechsel pro Kommissionierspiel
$s_{GW,m\ddot{U}}$	m	Mittlere Strecke zum Gassenwechsel pro Kommissionierspiel bei Strategie mit Überspringen
$s_{GW,o\ddot{U}}$	m	Mittlere Strecke zum Gassenwechsel pro Kommissionierspiel bei Strategie ohne Überspringen
t	s	Zeitbedarf, ggf. über Indices spezifiziert
t_{Anl}	s	Anlieferzyklus
$t_{Auf,Basis}$	s	Spielzeitanteil „Aufnahme einer Nachschublagerereinheit ab Basis“
$t_{Auf,Nach}$	s	Spielzeitanteil „Aufnahme einer Nachschublagerereinheit ab Nachschubbereich“
$t_{Ber,Komm}$	s	Spielzeitanteil „Bereitstellung von Nachschub als Kommissionierspiel“
$t_{Ber,LE}$	s	Spielzeitanteil „Bereitstellung einer Nachschub-LE“
$t_{B \rightarrow G}$	s	Fahrzeit von Basis zu Lagergasse
$t_{B \rightarrow G,E}$	s	Fahrzeit von Basis zu Einlagergasse
t_{DS}	s	Mittlere Spielzeit für ein Doppelspiel
$t_{DS,BA}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil an der Basis für ein Doppelspiel
$t_{DS,Ga}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil in der Lagergasse für ein Doppelspiel
$t_{DS,Ga,mGW}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil in der Lagergasse für ein Doppelspiel mit Gassenwechsel

$t_{DS,Ga,oGW}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil im Verkehrsgang für ein Doppelspiel ohne Gassenwechsel
$t_{DS,LP}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil im Lagerplatz für ein Doppelspiel
$t_{DS,VG}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil im Verkehrsgang für ein Doppelspiel
$t_{DS,VG,mGW}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil im Verkehrsgang für ein Doppelspiel mit Gassenwechsel
$t_{DS,VG,oGW}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil im Verkehrsgang für ein Doppelspiel ohne Gassenwechsel
$t_{\Delta x \Delta y}$	s	Fahrzeit zwischen zwei x- und y-Koordinaten entlang einer Regalwand
$t_{Ein,Nach}$	s	Spielzeitanteil „Einlagern in den Nachschubbereich“
$t_{ES,Aus}$	s	Mittlere Spielzeit für ein Einzelspiel, Auslagerung
$t_{ES,Aus,Add}$	s	Mittlere Spielzeit für ein Einzelspiel, Auslagerung bei additiver Fortbewegung
$t_{ES,Aus,GA}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil in der Lagergasse für ein Einzelspiel, Auslagerung
$t_{ES,Aus,Sim}$	s	Mittlere Spielzeit für ein Einzelspiel, Auslagerung bei simultaner Fortbewegung
$t_{ES,Ein}$	s	Mittlere Spielzeit für ein Einzelspiel, Einlagerung
$t_{ES,Ein,Add}$	s	Mittlere Spielzeit für ein Einzelspiel, Einlagerung bei additiver Fortbewegung
$t_{ES,Ein,BA}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil an der Basis für ein Einzelspiel, Einlagerung
$t_{ES,Ein,GA}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil in der Lagergasse für ein Einzelspiel, Einlagerung
$t_{ES,Ein,LP}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil im Lagerplatz für ein Einzelspiel, Einlagerung
$t_{ES,Ein,Sim}$	s	Mittlere Spielzeit für ein Einzelspiel, Einlagerung bei simultaner Fortbewegung
$t_{ES,Ein,VG}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil im Verkehrsgang für ein Einzelspiel, Einlagerung
$t_{ES,Um}$	s	Mittlere Spielzeit des Einzelspiels zur Umlagerung
$t_{G,A \rightarrow B}$	s	Fahrzeit von Auslagergasse zu Basis
$t_{G \rightarrow B}$	s	Fahrzeit von Lagergasse zu Basis
$t_{G,E \rightarrow G,A}$	s	Fahrzeit von Einlagergasse zu Auslagergasse
$t_{G \rightarrow LP}$	s	Fahrzeit von Gassenanfang zu Lagerplatz
$t_{G \rightarrow LP,E}$	s	Fahrzeit von Gassenanfang zum Lagerplatz (Einlagerung)
t_{KS}	s	Mittlere Kommissionierspielzeit pro Position
$t_{KS,B}$	s	Mittlere Bearbeitungszeit pro Position

$t_{KS,Ba}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil an der Basis
$t_{KS,Bed,Ga}$	s	Mittlerer Kommissionier-Spielzeitanteil des Bedieners in der Lagergasse
$t_{KS,Bed,VG}$	s	Mittlerer Kommissionier-Spielzeitanteil des Bedieners im Verkehrsgang
$t_{KS,Ga}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil in der Lagergasse
$t_{KS,LF}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil im Lagerfach
$t_{KS,VG}$	s	Mittlerer Spielzeitanteil im Verkehrsgang
$t_{KS,Z}$	s	Mittlere Zusammenführungszeit pro Position
$t_{LP,A \rightarrow G}$	s	Fahrzeit von Lagerplatz (Auslagerung) zum Gassenanfang
$t_{LP,E \rightarrow LP,A}$	s	Fahrzeit von Lagerplatz (Einlagerung) zu Lagerplatz (Auslagerung)
$t_{LP \rightarrow G}$	s	Fahrzeit von Lagerplatz zu Gassenanfang
$t_{LP,Aus}$	s	Fahrzeit aus dem Lagerplatz bei Lastwechsel
$t_{LP,Ein}$	s	Fahrzeit in den Lagerplatz bei Lastwechsel
t_m	s	Mittlere eindimensionale Fahrzeit
t_n	s	Mittlere eindimensionale Fahrzeit mit einer beliebigen Anzahl Stopps
t_{NS}	s	Mittlere Nachschubspielzeit
$t_{NS,Bed,Ga}$	s	Mittlerer Nachschub-Spielzeitanteil für das Bediengerät in der Lagergasse
$t_{NS,Bed,VG}$	s	Mittlerer Nachschub-Spielzeitanteil für das Bediengerät im Verkehrsgang
$t_{Rück,Komm}$	s	Spielzeitanteil „Rückfahrt zur Basis aus dem Kommissionierbereich“
$t_{Rück,Nach}$	s	Spielzeitanteil „Rückfahrt zur Basis aus dem Nachschubbereich“
$t_{Start,Komm}$	s	Spielzeitanteil „Fahrt zum Start eines Einlagerspiels (Kommissionierung)“
t_{Weg}	s	Mittlere Wegzeit beim Kommissionieren mit zwei-/dreidimensionaler Fortbewegung
t_x	s	Mittlere Fahrzeit in Koordinatenrichtung x
t_{xy}	s	Mittlere zweidimensionale Fahrzeit
t_y	s	Mittlere Fahrzeit in Koordinatenrichtung y
t_z	s	Mittlere Fahrzeit in Koordinatenrichtung z
$t_{0,Ausr}$	s	Ausrichtzeit des Bediengeräts
$t_{0,B \rightarrow G}$	s	Zusätzlicher Zeitbedarf bei Fahrt von Basis zu Lagergasse
$t_{0,B \rightarrow G,E}$	s	Zusätzlicher Zeitbedarf bei Fahrt von Basis zu Einlagergasse
$t_{0,Ga \rightarrow VG}$	s	Zusätzlicher Zeitbedarf bei Übergang von Lagergasse in den Verkehrsgang

$t_{0,G,E \rightarrow G,A}$	s	Zusätzlicher Zeitbedarf bei Fahrt von Einlagergasse zu Auslagergasse
$t_{0,G \rightarrow LP}$	s	Zusätzlicher Zeitbedarf bei Fahrt von Gassenanfang zu Lagerplatz
$t_{0,Lastw}$	s	Lastwechselzeit des Bediengeräts
$t_{0,LF}$	s	Zusätzlicher Zeitbedarf am Lagerfach
$t_{0,LP,A \rightarrow G}$	s	Zusätzlicher Zeitbedarf bei Fahrt von Lagerplatz (Auslagerung) zum Gassenanfang
$t_{0,LP \rightarrow G}$	s	Zusätzlicher Zeitbedarf bei Fahrt von Lagerplatz zu Gassenanfang
V	m ³	Volumen, über Index spezifiziert
V_{Max}	m/s	Maximalgeschwindigkeit
X	-	Zuordnungsvariable
$X_{LP,rep}$	m	x-Koordinate des im Mittel angefahrenen Lagerplatzes
$y_{LP,rep}$	m	y-Koordinate des im Mittel angefahrenen Lagerplatzes

Unter Umständen werden Indizes verwendet, um weiter zu differenzieren. Diese Indizes sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Indexzeichen	Bedeutung
eff	Effektiver Wert, der zur Berechnung verwendet wird
<i>Einh</i>	Einheitenlagerung betreffend
<i>FM</i>	Fachmodul
<i>GM</i>	Gangmodul
<i>i</i>	Laufvariable
<i>j</i>	Laufvariable
<i>k</i>	Laufvariable
<i>LE</i>	Lagereinheit Lagereinrichtung
<i>LM</i>	Lagermodul
<i>LP</i>	Lagerplatz
<i>Komm</i>	Kommissionierung/Kommissionierbereich betreffend
<i>KoNa</i>	Kommissionierung kombiniert mit Nachschublagerung betreffend
<i>max</i>	Maximal-
<i>S</i>	Sicherheits-(bestand)
<i>SP</i>	Stellplatz
<i>x</i>	Größe bezieht sich auf die Koordinatenrichtung x

y	Größe bezieht sich auf die Koordinatenrichtung y
z	Größe bezieht sich auf die Koordinatenrichtung z

1 Einleitung

Die Lagerung von Gütern stellt eine Grundfunktion der technischen Logistik dar und ist somit neben dem Transportieren, Verteilen und Zusammenführen sowie dem Handhaben ein wichtiger Bestandteil von Wertschöpfungsketten [Gün-2015b]. Die Gründe für die Einrichtung eines Lagers in einer Wertschöpfungskette können vielfältiger Natur sein. So lassen sich beispielsweise Prozesse durch die Einführung dazwischen liegender Puffer entkoppeln. Weiterhin können Lager dazu dienen, Güter zur Sicherstellung der Lieferfähigkeit zu bevorraten oder eine benötigte Zeit für Strukturveränderungen des Lagerguts zu überbrücken [Arn-2009, S. 173; Gud-2010, S. 3; Hom-2010, S. 3ff.]. Durch die Vielzahl an Anwendungsfällen sowie die unterschiedliche Beschaffenheit des Lagerguts existieren zahlreiche Ausprägungsformen von Lagersystemen mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad. Hoch automatisierte Systeme wie Shuttle-Lager oder Hochregallager mit Regalbediengerät decken vor allem den Bereich hoher Umschlagsleistungen ab. Den bei diesen Lagervarianten anfallenden hohen Anschaffungskosten steht ein geringer Personalbedarf sowie ein geringer Flächenverbrauch gegenüber. Manuell bediente Lagersysteme sind trotz Innovationen im Bereich automatisierter Systeme auch heute noch unverzichtbar. Ihre Flexibilität und Skalierbarkeit bewirkt, dass ein deutlich größeres Anforderungsprofil abgedeckt werden kann als dies bei automatisierten Lagern der Fall ist.

Die Vielzahl unterschiedlicher Ausprägungsformen bewirkt, dass bei der Lagersystemplanung eine große Anzahl an Entscheidungen vor einem häufig knappen Zeit- und Budget-Horizont getroffen werden muss. Gleichzeitig können die Folgen einer falschen Auswahl und Dimensionierung des zu planenden Systems schwerwiegend sein und zu erhöhten Kosten für benötigte Um- und Erweiterungsplanungen führen. Der Planung von Lagersystemen kommt daher eine bedeutende Rolle zu.

1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die Ausprägung eines Lagersystems ist von einer Vielzahl an Einflussgrößen abhängig. Aufgabe der Lagersystemplanung ist es, für einen gegebenen Einsatzfall eine Ausprägung (Planungsalternative) zu finden, welche hinsichtlich der Planungsziele optimal ist. Als wichtige Zielgrößen bei der Entscheidung über die Qualität einer Planungsalternative dienen der Flächenverbrauch, die erzielbare Leistung sowie die ins-

gesamt entstehenden Kosten. Diese lassen sich in Abhängigkeit von den Freiheitsgraden der Planung ermitteln, welche sich in Konfiguration, Strategien und Dimensionierung gliedern.

In der Praxis wird die Lagersystemplanung häufig durch Zeit- und Kostendruck eingeschränkt, sodass keine umfassende Untersuchung aller möglichen Lösungen erfolgt. Auf Grund der Tatsache, dass bisher kein Planungswerkzeug existiert, welches softwaregestützt zugleich Geometrie, Leistung und Kosten berücksichtigt, erfolgt die Planung manuell unter Zuhilfenahme von Erfahrungswissen, Schätzungen, Tabellen oder auch unternehmensspezifischen Softwaretools, welche in Teilen des Planungsprozesses unterstützen. Um Zeit- und Kostenziele einhalten zu können, erfolgt häufig eine frühe Fokussierung auf einige wenige Planungsalternativen. Diese Planungsalternativen werden zeitintensiv in einem sequenziellen und iterativen Vorgehen schrittweise verfeinert. Die so erarbeiteten Planungsalternativen können zwar den vorgegebenen Zielen genügen, stellen jedoch nicht sicher das globale Optimum dar.

Zusammenfassend besteht die wirtschaftliche Problemstellung bei der Planung manuell bedienter Lagersysteme in folgenden Punkten:

- Die frühe Fokussierung auf einige wenige Varianten führt dazu, dass die Lösungsmenge nur zu einem kleinen Teil untersucht wird.
- Der Planungsprozess erfolgt häufig manuell und subjektiv, da er der Erfahrung des Planers unterliegt.
- Durch Anwendung von Schätzungen oder Tabellen wird die Planungsqualität gemindert.
- Veränderte Planungsdaten erfordern eine aufwendige Überarbeitung der Planung; im Extremfall kann sogar eine Neuplanung nötig sein.

Ein ganzheitliches Planungsvorgehen für manuelle Lagersysteme, wie es im Rahmen dieses Forschungsprojektes erstellt werden soll, kann den genannten Schwächen der Lagersystemplanung begegnen. Hierfür wird der Planungsprozess in ein mathematisches Optimierungsproblem überführt. Dadurch kann in kurzer Zeit eine Vielzahl an Lösungen untersucht und objektiv bewertet werden. Die wissenschaftliche Problemstellung lässt sich aus diesem Vorhaben wie folgt ableiten:

- Für die Berechnung von Geometrie, Leistung und Kosten müssen Modelle gefunden, erweitert oder entwickelt werden, welche zueinander kompatibel und allgemeingültig auf alle unterschiedlichen Ausprägungen manuell bedienter Lagersysteme anwendbar sind.

- Die Planung setzt sich aus zwei miteinander verbundenen Problemen zusammen. Die Artikel des Sortiments müssen bestimmten Lagertypen zugewiesen werden, während aus dieser Zuordnung Lagerbereiche entwickelt werden müssen, die sich in ihrer Konfiguration, den Strategien und der Dimensionierung unterscheiden. Die Abhängigkeiten zwischen diesen beiden Problemen müssen identifiziert und so modelliert werden, dass eine effiziente rechnergestützte Untersuchung der Lösungsmenge möglich ist.
- Für die Ergebnisse der Planung müssen aussagekräftige Darstellungsformen ermittelt werden, sodass sie dem Planer transparent vermittelt werden können.

1.2 Forschungsziel

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer Planungsmethode zur Auswahl des optimalen manuell bedienten Lagersystems für einen spezifischen Anwendungsfall in der Grobplanungsphase. Damit sollen Planer und Betreiber von manuell bedienten Lagersystemen aufbauend auf den durch die Planungsphase bedingten wenigen vorliegenden Daten ein optimales Planungsergebnis erhalten.

Die zu entwickelnde Methode soll dabei für den Nutzer einfach anzuwenden sein, die relevanten Lagertypen berücksichtigen und gleichzeitig auch eine Kombination verschiedener Lagertypen bei der Lösungswahl ermöglichen. Um eine optimale Lösung zu finden, soll ein sinnvoller Vergleich von verschiedenen Varianten ermöglicht werden und die Möglichkeit für komplexe Auswertungen gegeben sein.

1.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Als Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben stehen eine Planungsmethode für die Grobplanungsphase sowie darin enthaltene Modelle zur Bewertung unterschiedlicher Planungsalternativen zur Verfügung. Die Planungsmethode ermittelt basierend auf den eingegebenen Planungsdaten die optimale Planungsalternative, wobei eine Verteilung der Artikel im Sortiment auf verschiedene Lagerbereiche möglich ist. Die Ausprägung der Lagerbereiche wird zugleich hinsichtlich der Konfiguration, der verwendeten Strategien und der Dimensionierung festgelegt. Der Planer erhält also eine empfohlene Planungsalternative, welche aus mehreren Lagerbereichen besteht. Die Planungsmethode wird in einen Software-Demonstrator überführt, der die Funktionsweise aufzeigt und der Evaluation dient.

1.2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Die angestrebten Forschungsergebnisse ermöglichen es dem Planer von manuell bedienten Lagersystemen, mit Hilfe eines formalen Modells für einen gegebenen Planungsfall die optimale Systemausprägung zu ermitteln. Dabei sind sowohl die Zuordnung von Artikeln als auch die Ausgestaltung der verschiedenen Lagerbereiche Freiheitsgrade. Bereits in der Grobplanung können so mit den in dieser Planungsphase vorhandenen Daten systematisch und objektiv verschiedene Planungsalternativen verglichen werden. Durch die Umsetzung als Software-Demonstrator wird die Planungszeit deutlich verkürzt.

Durch Anpassungsmöglichkeiten ist es dem Planer zudem möglich, über die optimale Planungsalternative hinaus weitere Planungsalternativen zu untersuchen. Er wird somit bei der Systemfindung unterstützt, was die Planungsqualität steigert.

1.2.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Der Lösungsweg, welcher als Herangehensweise zur Erreichung des Forschungsziels gewählt wird, gliedert sich in neun Arbeitspakete (AP 1 - AP 9), welche im Folgenden aufgeführt werden. Dabei wird jeweils auf die Kapitel des Forschungsberichts verwiesen, welche die Ergebnisse der Arbeitspakete beinhalten.

AP 1: Klassifizierung und Bestimmung der Kennwerte der Lagertypen manueller Lager

Ziel des ersten Arbeitspakets ist die Analyse der verschiedenen Lagertypen hinsichtlich ihres Aufbaus und der Betriebsweise. Die Lagertypen werden nach geeigneten Kriterien klassifiziert, sodass die für die Planung relevanten Kennwerte abgeleitet und recherchiert werden können. Unter Anwendung verschiedener Restriktionen kann die Datenstruktur erstellt werden, welche den weiteren Arbeitspaketen zugrunde liegt (Kapitel 2).

AP 2: Grundsätzliche Überlegungen zur Planungssystematik

Bevor die Modelle für die Bewertung der Geometrie, Leistung und Kosten aufgestellt werden, sind grundsätzliche Überlegungen zur Planungsmethode nötig (Kapitel 3). Diese Überlegungen umfassen allgemeine Teilaufgaben der Planung wie die Erzeugung verschiedener Planungsalternativen und deren Bewertung. Sie werden in Bezug zum Anwendungsfall der Lagersystemplanung gestellt.

AP 3: Entwicklung eines Modells zur Flächenberechnung und Generierung typischer Layouts

Um verschiedene Planungsalternativen zu generieren und Geometriedaten generierter Planungsalternativen zu berechnen ist ein entsprechendes Modell erforderlich. Zusätzlich bauen sowohl die Leistungs- als auch die Kostenberechnung auf Geometriedaten auf. Auf Grund des engen Zusammenhangs zwischen der Layoutgenerierung und der Flächenberechnung werden beide Teilaufgaben in einem Modell zusammengefasst, ausgehend von einer Analyse der Eingangsdaten sowie der bestehenden Freiheitsgrade (Kapitel 4).

AP 4: Analyse der Methoden und Entwicklung eines Modells zur Leistungsbeurteilung

Neben den Kennzahlen aus dem Bereich der Geometrie werden die Planungsalternativen hinsichtlich der Leistung bewertet. Auch für diese Teilaufgabe wird ein geeignetes Modell erstellt, welches für die in AP 1 ermittelten Systemausprägungen manuell bedienter Lagersysteme in der Lage ist, die mittlere Spielzeit zu bestimmen und daraus den Bedarf an Personal und Bedientechnik für die vorgegebene Leistung zu berechnen (Kapitel 5).

AP 5: Analyse der Methoden und Entwicklung eines Modells zur Kostenkalkulation

Neben der Geometrie sowie der Leistung sind die durch eine Planungsalternative entstehenden Kosten ein weiteres wichtiges Bewertungskriterium. Um auf diese Weise die monetäre Vorteilhaftigkeit zu bestimmen, werden verschiedene Verfahren der Investitionsrechnung bewertet, welche in der Praxis angewendet werden. Für das ausgewählte Verfahren werden die erforderlichen Daten ermittelt, um sämtliche relevanten Kostenanteile bestimmen zu können (Kapitel 6).

AP 6: Ermittlung Planungssystematik unter Kombination der Berechnungsmethoden

Die aus den Arbeitspaketen 3 - 5 vorliegenden Modelle zur Bewertung von Geometrie, Leistung und Kosten werden zusammengeführt und in eine Planungsmethode integriert. Hierbei sind die Vorüberlegungen aus AP 2 relevant (Kapitel 7).

AP 7: Umsetzung der Planungssystematik in ein Planungswerkzeug

Die Implementierung der Planungsmethode dient der Evaluation des gewählten Ansatzes. Sie erfolgt modular, sodass eine gute Erweiterbarkeit und Flexibilität des Software-Demonstrators gewährleistet ist. Eine Benutzeroberfläche führt den Anwender durch den Planungsprozess und stellt die gewonnenen Planungsergebnisse übersichtlich dar (Kapitel 8.1).

AP 8: Validierung bei Projektpartnern und anhand bestehender Lagersysteme

Das in AP 7 erstellte Planungswerkzeug sowie die Modelle zur Flächen-, Leistungs- und Kostenberechnung werden auf jeweils geeignete Weise validiert. Durch den Abgleich mit existierenden Systemen und die Monte-Carlo-Methode kann die Einsatzfähigkeit in der Praxis nachgewiesen werden (Kapitel 8.2). In einem zusätzlichen Nutzer-Test werden Planungsmethode und Benutzeroberfläche evaluiert, indem Beispielplanungen durchgeführt werden. Probleme und Änderungswünsche seitens der Industriepartner werden so erkannt und behoben bzw. umgesetzt (Kapitel 8.3).

AP 9: Dokumentation

Die Projektergebnisse werden während der gesamten Projektlaufzeit dokumentiert und zusätzlich in Fachzeitschriften, im Internet sowie auf Fachtagungen publiziert.

2 Grundlagen manuell bedienter Lagersysteme

Kapitel 2.1 umfasst Begriffsdefinitionen und Grundlagen zu manuell bedienten Lagersystemen sowie zum allgemeinen betriebswirtschaftlichen Verständnis der Planung. Mit der Konfiguration, den Strategien und der Dimensionierung werden die bestehenden Freiheitsgrade identifiziert, die gemeinsam die Ausprägung eines Lagerbereichs festlegen (Kapitel 2.2 bis 2.4). Dies dient einerseits der Festlegung des Betrachtungsrahmens im Projekt OptiMAL durch die analysierten Ausprägungen, andererseits der Wiedergabe des Stands der Forschung und Technik. Als Quelle dienen Fachliteratur sowie Gespräche mit Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses. Abschließend wird auf den Planungsbegriff im Allgemeinen sowie im Bezug auf Lagersysteme eingegangen (Kapitel 2.5).

2.1 Grundlagen der Lagersysteme

Trotz der unterschiedlichen Anforderungen an Lagersysteme und der daraus resultierenden Ausprägungen lassen sich die grundsätzlich in Lagern ablaufenden Prozesse allgemeingültig angeben [Hom-2010, S. 15]. Die Kernprozesse umfassen [Gud-2010, S. 565]:

- Das Einlagern von Lagereinheiten.
- Das Aufbewahren und damit die Überbrückung der Zeitspanne zwischen Ein- und Auslagerung.
- Das Auslagern von Lagereinheiten.

Weitere, mit den Kernprozessen direkt in Verbindung stehende Zusatzprozesse sind die Warenannahme, Konsolidierung, Kommissionierung, Verpackung und Versand [Hom-2010, S. 23ff.]. Abhängig von der Zusammensetzung der Lagereinheiten bei Ein- und Auslagerung wird zwischen Lagerung (auch: Einheitenlagerung) und Kommissionierung unterschieden [Jün-1999, S. 42]. Als Kommissionierung wird die Zusammenstellung von Teilmengen aus einem Sortiment auf Grund von Aufträgen bezeichnet [VDI-3590-1]. Dabei werden die auf Lagereinheiten befindlichen Waren vereinzelt und für die Auslagerung auftragsorientiert neu zusammengestellt. Im Gegensatz dazu erfolgt bei der Einheitenlagerung keine Vereinzelnung, sodass die Lagereinheiten bei der Auslagerung dieselbe Zusammensetzung besitzen wie bei der Einlagerung. In einem Materialflusssystem können sich mehrere Lagerbereiche sowie weitere Bereiche befinden, zwischen denen Materialflussbeziehungen bestehen. Zur Zusam-

menfassung dieser Lagerbereiche und zur Abgrenzung gegenüber weiteren Bereichen wird im Folgenden der Begriff Lagersystem verwendet. Er umfasst mehrere Lagerbereiche, die den Prozessen Einheitenlagerung, Kommissionierung oder der Kombination von Kommissionierung und Nachschublagerung zugeordnet sind. Jeder Lagerbereich ist über eine als Basis (auch E/A-Punkt oder I/O-Punkt) bezeichnete Schnittstelle an andere (Lager)bereiche angebunden (Abbildung 2-1). Die Basis bildet somit den Start- und Endpunkt der Lagerspiele.

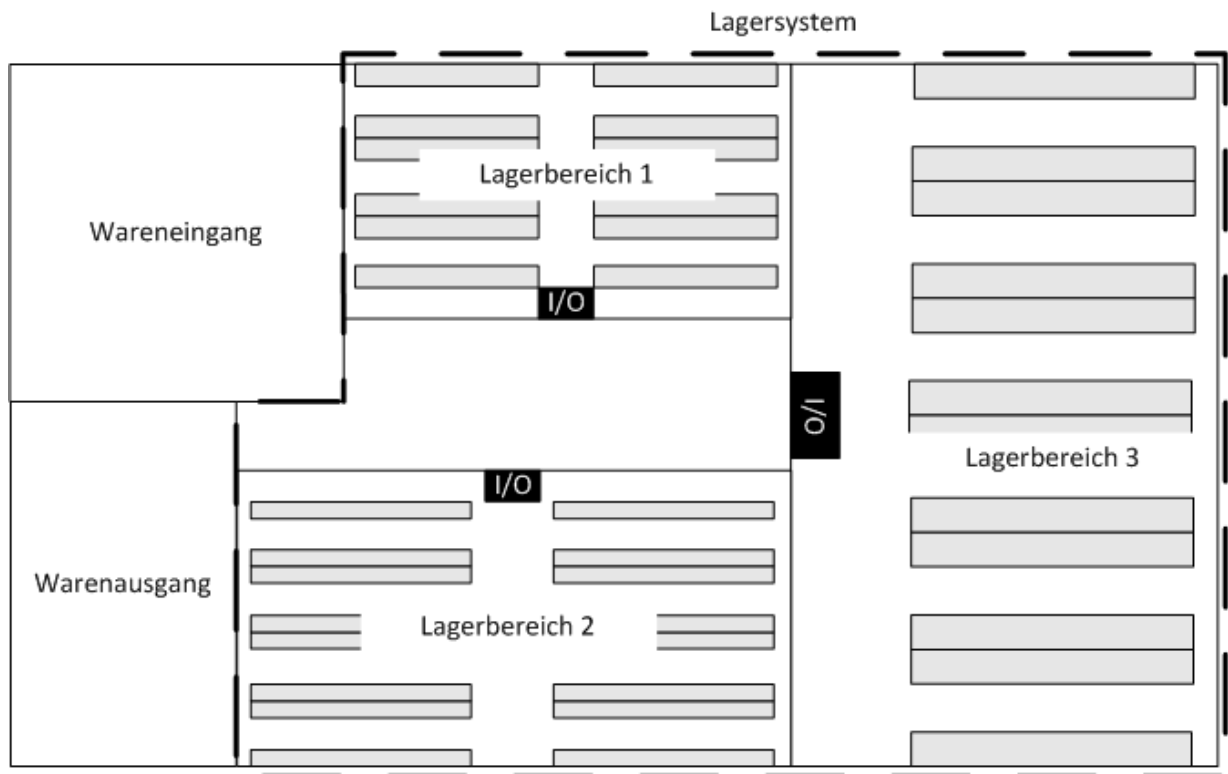


Abbildung 2-1: Beispielhaftes Distributionszentrum mit Wareneingang und Warenausgang sowie einem Lagersystem (gestrichelt) bestehend aus drei Lagerbereichen

Günthner identifiziert sieben Subsysteme des Lagersystems, die zur Klassifizierung herangezogen werden können [Gün-2015a, S. 4.1]. Für die Abgrenzung manuell bedienter Lagersysteme sind darunter die Lagereinheiten, Lagereinrichtung, Lagerbedien- und Kommissionierung ausschlaggebend.

2.1.1 Subsystem Lagereinheiten

Im Projekt OptiMAL wird ausschließlich die Stückgutlagerung betrachtet. Als Lagereinheiten werden die Einheiten bezeichnet, in denen Artikel bevorratet werden [Hom-2010, S. 23]. Artikel und eventuell ein Ladehilfsmittel (z. B. Sichtkasten, Palette) bilden gemeinsam eine uniforme, transportfähige logistische Einheit (Lagereinheit) [Gün-2015a, S. 2.8].

Da bei der Kommissionierung die Lagereinheiten zerlegt und neu zusammengefügt werden, wird hier weiter differenziert [Hom-2010, S. 23]:

- Bereitstelleinheiten bezeichnen die Lagereinheiten, die für die Entnahme bereitgestellt werden.
- Entnahmeeinheiten werden aus den Bereitstelleinheiten während der Kommissionierung eines bestimmten Artikels entnommen.
- Greif-/Pickeinheiten umfassen die Menge an Artikeln, die mit einem Griff des Kommissionierers entnommen werden können. Eine Entnahmeeinheit umfasst daher mindestens eine Greif-/Pickeinheit.

Durch die Auswahl der betrachteten Lagereinrichtung und Lagerbedientechnik ergibt sich, welche Lagereinheiten berücksichtigt werden können. So sind Kragarmregale beispielsweise speziell für Langgut geeignet, das häufig als unverpackter Artikel gelagert wird.

2.1.2 Subsystem Lagereinrichtung

Die Lagereinrichtung lässt sich basierend auf der Mobilität der Lagereinheiten in zwei Gruppen unterteilen (Abbildung 2-2).

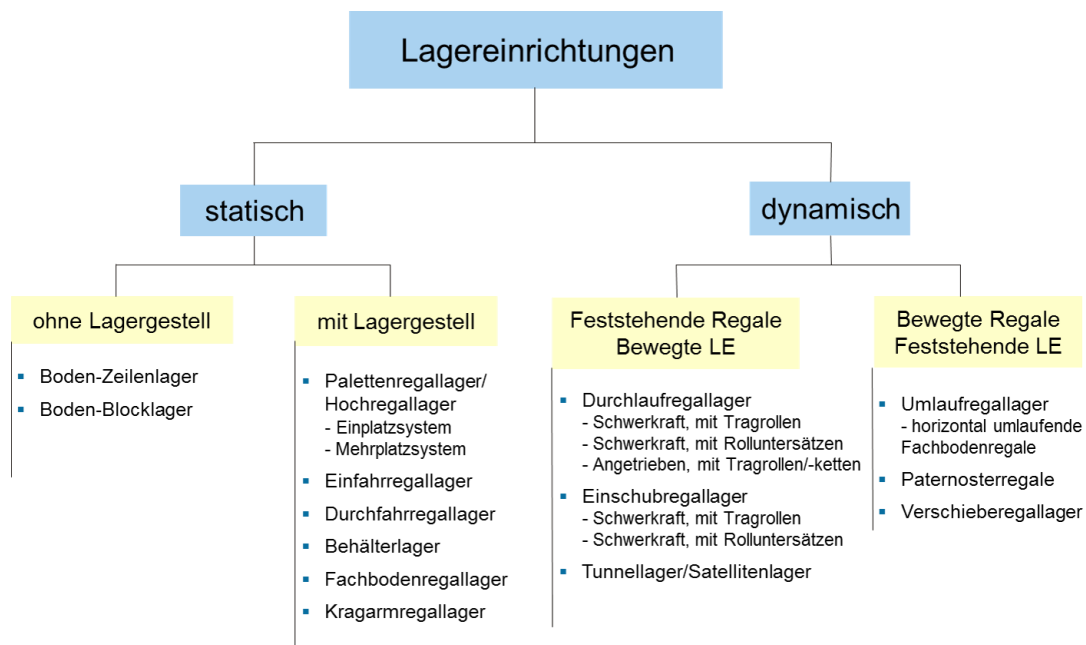


Abbildung 2-2: Einteilung der Lagereinrichtungen nach [Gün-2015a, S. 4.2]

Bei der statischen Lagereinrichtung stehen sowohl die Lagereinheiten als auch eventuell vorhandene Lagergestelle fest. Bei der dynamischen Lagereinrichtung bewegen sich dagegen die Lagereinheiten entweder selbst oder befinden sich in beweglichen

Regalen [VDI-3590-2]. Der Aspekt der Beweglichkeit von Lagereinheiten während der Entnahme findet sich in gleicher oder ähnlicher Form auch an anderer Stelle [Jün-1999, S. 46; Wis-2009, S. 40; Gud-2010, S. 573f.; Hom-2010, S. 74]. Während bei der statischen Lagereinrichtung weiter unterschieden wird, ob die Lagerung mit oder ohne Lagergestell erfolgt, sind für eine dynamische Lagereinrichtung Regale zwingend notwendig. Die Bewegung der Lagereinheit wird entweder durch bewegte Lagereinheiten in feststehenden Regalen (z. B. Einschubregallager) oder durch bewegte Regale mit darin feststehenden Lagereinheiten (z. B. Umlaufregal) gewährleistet.

2.1.3 Subsystem Lagerbedienung

Die in der *VDI-Richtlinie 3590* [VDI-3590-2] genannten Automatisierungsstufen der Lagerbedienung lassen sich auch auf die Einheitenlagerung anwenden. Demzufolge ist eine manuelle, mechanisierte oder automatisierte Lagerbedienung möglich. Als mechanisiert werden Bediengeräte bezeichnet, bei denen eine Person mit maschineller Unterstützung Lagerspiele durchführt. Zu dieser Gruppe zählen beispielsweise Gegengewichtstapler oder schienengeführte Hochregalstapler. Neben dem Automatisierungsgrad dienen zur Klassifikation der Lagerbedienung auch die Arbeitscharakteristik (Stetigförderer, Unstetigförderer) [Hom-2010, S. 91] sowie die Bewegungsrichtung (ein-, zwei-, dreidimensional) [VDI-3590-2].

Als manuelle Lagersysteme im Rahmen des Projekts OptiMAL werden alle Lagersysteme bezeichnet, in denen die Lagerbedienung manuell oder mechanisiert erfolgt. Relevant sind dafür die folgenden Teilschritte der Bedienung:

- Transport einer Lager-/Bereitstelleinheit von einer Quelle zu einem Lagerplatz.
- Abgabe der Lager-/Bereitstelleinheit am Lagerplatz.
- Umlagerung der Lager-/Bereitstelleinheit von einem Lagerplatz zu einem anderen.
- Entnahme der Lager-/Entnahmeeinheit am Lagerplatz.
- Transport der Lagereinheit oder Entnahmeeinheiten vom Lagerplatz zu einer Senke.

Demzufolge werden folgende Systeme betrachtet:

- Breitgangstapler, z. B. Gegengewichtstapler und Schubmaststapler
- Hochregalstapler (Schmalgang, „Mann-unten-System“)
- Person mit Sammelfahrzeug, z. B. Gehgabelhubwagen, Niederflurkommissionierer

- Kommissionierstapler (Schmalgang, „Mann-oben-System“)

2.1.4 Subsystem Kommissionierung

Falls die Lagereinheiten zwischen Ein- und Auslagerung zerlegt und neu zusammengestellt werden, verfügt das Lagersystem über ein weiteres Subsystem: Die Kommissionierung. Kommissioniersysteme werden hinsichtlich ihres Informationssystems, Materialflusssystems und Organisationssystems klassifiziert [VDI-3590-1]. Für die Anwendung im Projekt OptiMAL genügt jedoch die Anwendung der Klassifizierung der Lagereinheiten, Lagereinrichtung und Lagerbedienung auch für Lagersysteme, die Kommissioniersysteme beinhalten.

2.2 Konfiguration

Bei der Planung von Lagersystemen bestehen zahlreiche Freiheitsgrade, deren Ausprägungen zusammengenommen einen Lagerbereich eindeutig beschreiben. Diese Freiheitsgrade lassen sich in drei Gruppen unterteilen: Konfiguration, Strategien und Dimensionierung. Die Gruppe der Konfiguration beschreibt die physische Ausprägung des Lagers [Gün-2011, S. 11]. Sie steht damit am Anfang des Entscheidungsprozesses und ist abhängig vom Prozess, der im jeweiligen Lagerbereich durchgeführt wird. Neben den bereits erwähnten Prozessen der Einheitenlagerung und Kommissionierung wird im Projekt OptiMAL als dritte Möglichkeit die Kombination aus Kommissionierung und Nachschublagerung im selben Lagerbereich untersucht.

2.2.1 Konfiguration bei Einheitenlagerung

Die Konfiguration eines Lagerbereichs für Einheitenlagerung umfasst zehn Parameter, die mit ihren Ausprägungsformen in einem morphologischen Kasten zusammengefasst sind (Tabelle 2-1).

Die zulässige Lagereinrichtung und Lagerbedienung lassen sich aus den in 2.1.2 und 2.1.3 beschriebenen Varianten ableiten, indem ihre Eignung für die Einheitenlagerung herangezogen wird. Die Lagerung von Langgut wird dabei nicht betrachtet.

Die Layoutgrundform gibt an, wie die Lagergassen relativ zur Vorzone angeordnet sind. Zwei üblicherweise verwendete Varianten, die auch in der Literatur betrachtet werden, sind das Stirngang- und Zentralganglayout [Bas-1980; Car-2000; Sad-2007, S. 100]. Während beim Stirngang die Lagergassen rechtwinklig zu einem entlang der Front verlaufenden Verkehrsgang angeordnet sind (siehe Lagerbereich 3 in Abbildung

2-1), besitzt das Zentralganglayout einen Verkehrsgang, in den zu beiden Seiten Lagergassen einmünden (siehe Lagerbereiche 1 und 2 in Abbildung 2-1).

Tabelle 2-1: Morphologischer Kasten der Konfiguration bei Einheitenlagerung

Parameter	Ausprägungen		
Lagereinrichtung	Bodenblocklager	Palettenregal	Einschubregal
	Durchlaufregal	Einfahrregal	Durchfahrregal
Lagerbedienung	Breitgangstapler	Hochregalstapler	
Layoutgrundform	Stirnganglayout	Zentralganglayout	
Orientierung der Regale	Getrennte	Kombinierte	
Regale	E/A-Gassen	E/A-Gassen	
Gassenbindung	Gassengebunden	Nicht gassengebunden	
Stapelhöhe	1...N		
Lagerplatztiefe	1...N		
Regalfeldlänge	1...N		
Einlagerrichtung	Längseinlagerung	Quereinlagerung	

Für den Fall beidseitig bedienter Lagereinrichtung (Durchlauf- und Durchfahrregale) muss als weiterer Parameter die Orientierung der Regale angegeben werden. Sie bestimmt darüber, ob die Funktion des Ein- und Auslagerns räumlich getrennt erfolgt (Abbildung 2-3a) oder auf jeweils einer Seite der selben Lagergasse (Abbildung 2-3b).

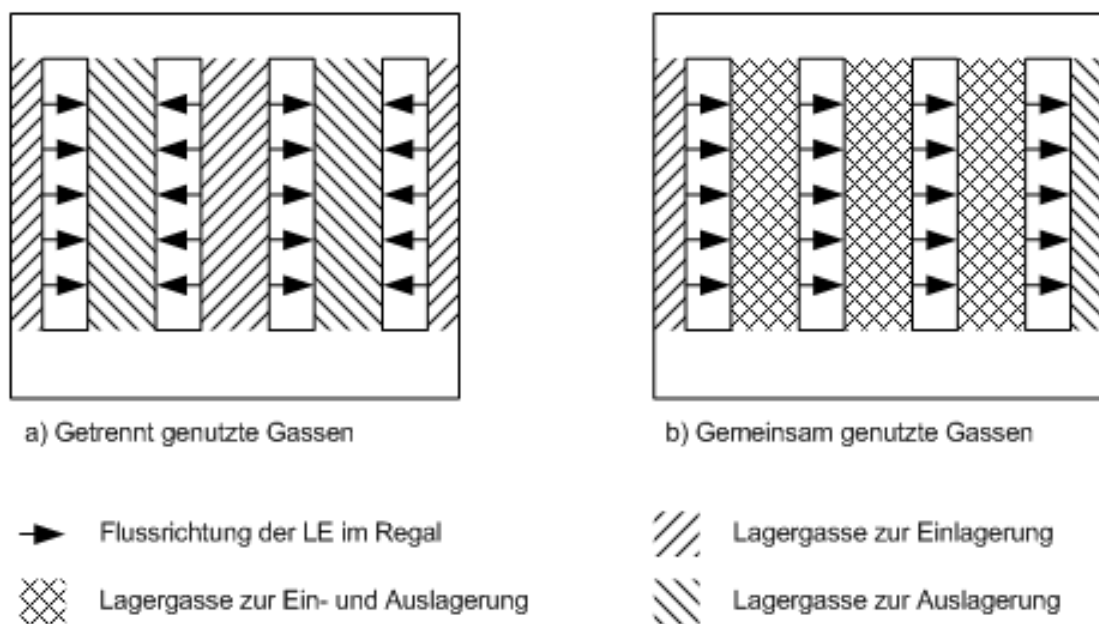


Abbildung 2-3: Konfigurationsmöglichkeiten bei beidseitig bedienbaren Regalen

Der Parameter der Gassenbindung beschreibt den Wirkungsbereich der Bediengeräte. Bei Gassenbindung wird ein Bediengerät zu einer einzigen Gasse zugeordnet (z. B. Hochregalstapler im Schmalgang, die zeitaufwendig die Gasse wechseln müssen). In diesem Fall erfolgt eine Übergabe der Lagereinheiten auf Breitgangstapler am Anfang der Lagergasse. Diese übernehmen dann die Beförderung der Lagereinheiten im Verkehrsgang zwischen der Basis und diesem Übergabepunkt. Sofern keine Gassenbindung besteht, kann jedes Bediengerät uneingeschränkt jeden Lagerplatz im Lagerbereich anfahren. Eine Unterscheidung der Bedientechnik in Lagergasse und Verkehrsgang ist dann nicht nötig. Im Projekt OptiMAL wird eine Gassenbindung ausschließlich für Schmalgangstapler untersucht - neben der Alternative ohne Gassenbindung.

Weitere Konfigurationsparameter dienen der Definition eines Regalfeldes. Ein Regalfeld besteht aus mehreren Lagerplätzen, die eine bestimmte Stapelhöhe und Lagerplatztiefe besitzen. Die Obergrenzen dieser Parameter unterliegen sowohl der gewählten Lagereinrichtung als auch technischen Größen wie der verfügbaren Gebäudehöhe und der maximalen Stapelfähigkeit des Lagerguts. Beispielsweise werden Palettenregale in manuell bedienten Regalen üblicherweise nur einfachtief ausgeführt, während bei Einschubregalen durchaus größere Lagerplatztiefen umgesetzt werden.

Ein weiterer Parameter ist die Einlagerrichtung. Bei Längseinlagerung wird zur besseren Flächennutzung die kürzere Seite der Lagereinheit entlang der Lagergasse orientiert (Abbildung 2-4a). Pro Meter Gassenlänge können dadurch mehr Lagereinheiten untergebracht werden, sodass die je Lagereinheit anfallende Gassenfläche reduziert und die Flächennutzung verbessert wird. Bei Quereinlagerung dagegen wird durch eine Drehung um 90° die längere Seite entlang der Lagergasse angeordnet, beispielsweise, um eine bestimmte Greiftiefe nicht zu überschreiten (Abbildung 2-4b) [Hom-2010, S. 78].

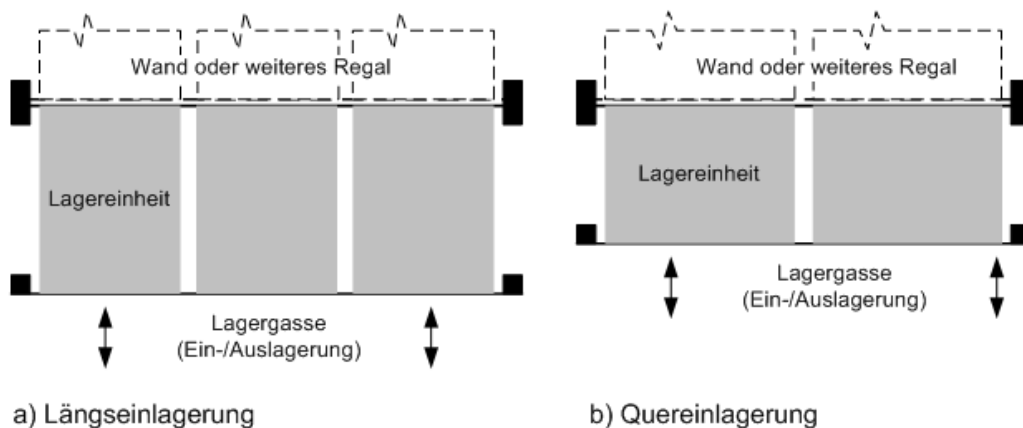


Abbildung 2-4: Orientierung der Lagereinheiten bei Längs- und Quereinlagerung

Basierend auf dem durch Stapelhöhe, Lagerplatztiefe und Einlagerrichtung festgelegten Lagerplatz wird die Regalfeldlänge angegeben. Ein Regalfeld ist - bei Lagereinrichtungen mit Regal - definiert als der Bereich zwischen zwei Regalstehern. Zwischen den Stehern sind waagrechte Traversen befestigt, auf denen sich nebeneinander mehrere Lagerplätze befinden können (Mehrplatzsystem) [Hom-2010, S. 78].

2.2.2 Konfiguration bei Kommissionierung

Die Konfiguration eines Lagerbereichs mit Kommissionierung besitzt fast identische Parameter und Ausprägungen wie bei Einheitenlagerung (Tabelle 2-2). Aus diesem Grund wird nachfolgend lediglich auf die Abweichungen eingegangen.

Tabelle 2-2: Morphologischer Kasten der Konfiguration bei Kommissionierung

Parameter	Ausprägungen		
Lagereinrichtung	Bodenzeilenlager	Fachbodenregal	Palettenregal
	Einschubregal	Durchlaufregal	
Lagerbedienung (Entnahme)	Person mit Sammelfahrzeug	Kommissionierstapler	
Lagerbedienung (Nachschub)	Breitgangstapler	Kommissionierstapler	
Lagerbedienung Verkehrsgang	Breitgangstapler	Kommissionierstapler	
Layoutgrundform	Stirnganglayout	Zentralganglayout	
Orientierung der Regale	Getrennte E/A-Gassen	Kombinierte E/A-Gassen	
Gassenbindung	Gassengebunden	Nicht gassengebunden	
Stapelhöhe	1...N		
Lagerplatztiefe	1...N		
Regalfeldlänge	1...N		
Einlagerrichtung	Längseinlagerung	Quereinlagerung	

Die für die Kommissionierung verwendbare Lagereinrichtung und Lagerbedienung lässt sich aus 2.1.2 und 2.1.3 ermitteln.

Analog zur Einheitenlagerung gibt es auch für die Kommissionierung Schmalgangssysteme (Kommissionierstapler oder Mann-oben-System). Sie übernehmen die Kommissionierung sowie die Einlagerung von Nachschub innerhalb einer Gasse, während am Gassenanfang eine Übergabe auf Gegengewicht- oder Schubmaststapler erfolgt. Alternativ dazu können Kommissioniersysteme ohne Gassenbindung ausgeführt werden. In diesem Fall erfolgt die Entnahme durch einen Kommissionierer mit Wagen.

Der Nachschub wird abhängig von der Bereitstellereinheit durch geeignete Bedientechnik bereitgestellt. Dies kann bei Kommissionierung von Paletten auf Bodenplätzen ein Gegengewicht- oder Schubmaststapler sein, während bei Kommissionierung von Kleinladungsträgern (KLTs) aus einem Einschubregal auch hier ein Kommissionierer mit Wagen zum Einsatz kommen kann. Die möglichen Kombinationen sind in Tabelle 2-3 zusammengestellt.

Tabelle 2-3: Mögliche Kombinationen der Gassenbindung und Lagerbedienun

Gassenbindung	Lagerbedienun Entnahme	Lagerbedienun Nach- schub	Lagerbedienun Ver- kehrsgang
Gassenungebun- den	Person mit Sammelfahr- zeug	Person mit Sammelfahr- zeug Breitgangstapler	-
Gassenungebun- den	Kommissionierstapler	Kommissionierstapler	-
Gassengebunden	Kommissionierstapler	Kommissionierstapler	Breitgangstapler

2.2.3 Konfiguration bei Kommissionierung mit Nachschub

Neben der Einheitenlagerung und Kommissionierung gibt es die Möglichkeit, beide Prozesse in einem Lagerbereich zu kombinieren. Bei der Kommissionierung mit Nachschub werden die durch einen Kommissionierer erreichbaren unteren Ebenen eines Palettenregals für die Kommissionierung genutzt und als Bodenzeilenlager, Fachbodenregal oder Einschubregal ausgeführt. Der zugehörige Nachschub lagert in den darüber gelegenen Ebenen des Palettenregals. Die Parameter und ihre Ausprägungen für diesen Fall sind in einem morphologischen Kasten dargestellt (Tabelle 2-4).

Tabelle 2-4: Morphologischer Kasten der Konfiguration bei Kommissionierung mit Nachschub

Parameter	Ausprägungen		
Lagereinrichtung	Palettenregal + Bodenzeilenlager	Palettenregal + Fachbodenregal	Palettenregal + Einschubregal
Lagerbedienun (Entnahme)	Person mit Sammelfahrzeug		
Lagerbedienun (Nach.)	Breitgangstapler		
Layoutgrundform	Stirnganglayout	Zentralganglayout	
Stapelhöhe (Entn.)	1...N		
Stapelhöhe (Nach.)	1...N		

Lagerplatztiefe (Entn.)	1...N	
Lagerplatztiefe (Nach.)	1...N	
Regalfeldlänge (Entn.)	1...N	
Regalfeldlänge (Nach.)	1...N	
Einlagerrichtung (Entn.)	Längseinlagerung	Quereinlagerung
Einlagerrichtung (Nach.)	Längseinlagerung	Quereinlagerung

Die möglichen Lagereinrichtungsvarianten umfassen lediglich einseitig bediente Regalsysteme. Aus diesem Grund entfällt die Orientierung beidseitig bedienter Regale als Parameter. Da keine Schmalgangsysteme verwendet werden, ist auch der Betrieb mit gassengebundener Lagerbedienung nicht möglich. Stattdessen erfolgt die Entnahme jeweils durch eine Person mit Sammelfahrzeug, während Gegengewichts- und Schubmaststapler die Ein- und Umlagerung von Nachschub-Lagereinheiten vornehmen.

Gedanklich lässt sich ein Lagerbereich für Kommissionierung und Nachschub als zwei übereinander angeordnete Teilbereiche betrachten. Da jeder dieser Teilbereiche aus einem eigenen Lagerplatztyp aufgebaut ist, sind die auf den Lagerplatz bezogenen Parameter der Konfiguration für jeden der Bereiche separat angeführt.

2.3 Strategien

Die betrieblichen Abläufe in einem Lagersystem lassen sich mit Hilfe von Strategien organisieren. Im Rahmen des Projekts OptiMAL werden drei Gruppen von Strategien betrachtet, welche Einfluss auf die Geometrie von Lagerbereichen sowie auf die Spielzeit und damit auf die Leistung der Bediengeräte haben. Es gilt die Vorgabe, dass Lagerplätze artikelrein belegt werden. Weiterhin wird, sofern nicht alle Lagereinheiten in direktem Zugriff sind, die Einhaltung chargenweisen FIFOs gefordert. Demzufolge müssen jeweils die Lagereinheiten der ältesten im Lager befindlichen Charge zuerst ausgelagert werden.

- Die Belegungsstrategie gibt an, welche Artikel in welche Lagerplätze eingelagert werden dürfen. Bei fester Lagerplatzordnung werden für jeden Artikel so viele

Lagerplätze reserviert, dass der maximal zu erwartende Bestand aufgenommen werden kann. Die reservierten Lagerplätze dürfen nicht mit Lagereinheiten anderer Artikel belegt werden. Im Gegensatz dazu dürfen bei der freien Lagerplatzordnung Lagereinheiten in beliebige freie Lagerplätze eingelagert werden. Die Schnellläuferkonzentration basiert auf der ABC-Analyse der Umschlagshäufigkeit und des Platzbedarfs der eingelagerten Artikel. Lagereinheiten häufig umgeschlagener Artikel werden nahe am Ein- und Ausgang der Gasse gelagert, um den im Mittel je Lagereinheit zurückzulegenden Weg zu reduzieren. [Gün-2015a, S. 4-17]

- Die Einlagerstrategie gibt an, ob angebrochene Lagerplätze durch Einlagerung neuer Lagereinheiten des selben Artikels aufgefüllt werden. Bei der prozessorientierten Einlagerung erfolgt die Einlagerung einer neuen Charge in leere Lagerplätze, um zu gewährleisten, dass Lagereinheiten älterer Chargen im direkten Zugriff sind und nicht verdeckt werden. Auf diese Weise werden zusätzliche Umlagerspiele vermieden, wobei allerdings Stellplätze ungenutzt bleiben. Nimmt man jedoch zusätzliche Umlagerspiele in Kauf, können Lagerplätze durch Lagereinheiten aus neuen und alten Chargen belegt werden, wobei die Artikel im Lagerplatz nach ihrem Einlagerzeitpunkt geordnet werden. Die platzorientierte Einlagerungsstrategie senkt so den Stellplatzverlust je Artikel bei gleichzeitiger Erhöhung der Einlagerspielzeit. [Sta-2015]
- Die Bewegungsstrategie dient der Organisation des Arbeitsspiels und beschreibt, in welcher Reihenfolge die Lagerplätze des Auftrags angefahren werden [Arn-2009, S. 218]. Je nach Bewegungsart des Bediengeräts und Anwendungsfall sind unterschiedliche Strategien sinnvoll, die in den folgenden Kapiteln im Detail erläutert werden.

2.3.1 Strategien bei Einheitenlagerung

Die Ausprägungen der drei Strategien der Einheitenlagerung sind in einem morphologischen Kasten zusammengefasst (Tabelle 2-5).

Tabelle 2-5: Morphologischer Kasten der Strategien bei Einheitenlagerung

Parameter	Ausprägungen	
Belegungsstrategie	Frei	Fest
Einlagerstrategie	Prozessorientiert	Platzorientiert
Bewegungsstrategie	Stichgangstrategie	

Für die Bewegungsstrategie bestehen bei der Einheitenlagerung wenige Freiheitsgrade, da pro Spiel lediglich ein Lagerplatz (Einzelspiel für Ein-/Auslagerung) oder

zwei Lagerplätze (Doppelspiel) angefahren werden müssen. Die Anwendung der Stichgangstrategie ist zweckhaft, da sie einfach umzusetzen ist und dabei dem kürzesten Weg zwischen der Basis und dem Lagerfach entspricht (Abbildung 2-5a). Bei dieser Strategie betritt und verlässt das Bediengerät die Lagergassen jeweils vom Verkehrsgang aus. Demzufolge findet die Fahrt zwischen Basis und Lagergassen sowie zwischen zwei Lagergassen beim Doppelspiel im Verkehrsgang an der Stirnseite statt (Abbildung 2-5b).

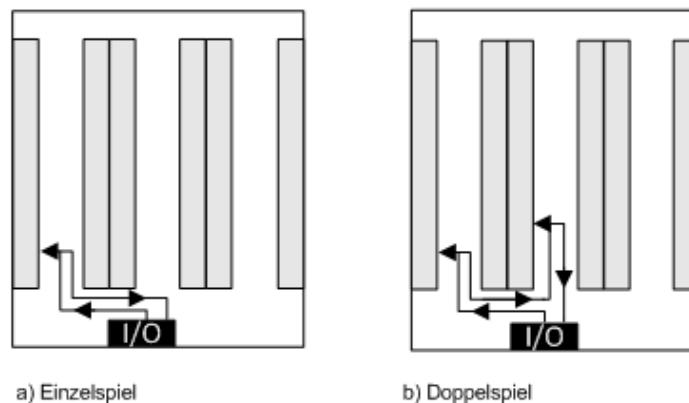


Abbildung 2-5: Bewegungsstrategien bei Einheitenlagerung

2.3.2 Strategien bei Kommissionierung

Die Ausprägungen der Strategien sind im morphologischen Kasten in Tabelle 2-6 zusammengefasst.

Tabelle 2-6: Morphologischer Kasten der Strategien bei Kommissionierung

Parameter	Ausprägungen		
Belegungsstrategie	Frei	Fest	Schnellläuferkonzentration
Einlagerstrategie	Prozessorientiert	Platzorientiert	
Bewegungsstrategie (Entn.)	Stichgangstrategie mit Wiederholung	Stichgangstrategie ohne Wiederholung	Schleifenstrategie mit Überspringen
	Schleifenstrategie ohne Überspringen	Mittelpunktheuristik	
	Ungeordnet	Einfache Strategie	v-Streifenstrategie
Bewegungsstrategie (Nach.)	Wie Bewegungsstrategie Entn.	Wie Einheitenlagerung	

Die Belegungsstrategie und Einlagerstrategie umfassen die unter 2.3.1 vorgestellten Ausprägungen. Zusätzlich möglich ist die Schnellläuferkonzentration als Belegungsstrategie. Da bei der Kommissionierung in der Regel mehrere Lagerplätze angefahren werden müssen und die Reihenfolge variiert werden kann, existieren verschiedene Bewegungsstrategien. Sie werden für Entnahme und Nachschubversorgung getrennt festgelegt. Sofern ein Einzel- oder Doppelspiel durchgeführt werden muss, beispielsweise bei der Einlagerung des Nachschubs als Palette in ein Bodenzeilenlager, können die Strategien der Einheitenlagerung verwendet werden. Bei mehr als zwei anzufahrenden Lagerplätzen und abhängig von der Fortbewegungsart des Bediengeräts gliedern sich die Strategien in solche für die ein-/zweidimensionale Bewegung in der Ebene und die zwei-/dreidimensionale Bewegung mit ausgeprägtem Hub [Wis-2009, S. 40].

Bewegungsstrategien bei ein-/zweidimensionaler Bewegung

Die ein- oder zweidimensionale Kommissionierung nach dem Prinzip „Mann zur Ware“ wird dadurch charakterisiert, dass sich der Kommissionierer ebenerdig bewegt und lediglich vernachlässigbare Hubbewegungen ausführt, die unter anderem beim gebückten Griff in untere Regalebene auftreten [Arn-2009, S. 215]. Eine Zusammenstellung der aus der Literatur bekannten Bewegungsstrategien für die ein-/zweidimensionale Kommissionierung findet sich beispielsweise bei Sadowsky [Sad-2007, S. 40].

Bei der Schleifenstrategie ohne Überspringen (Abbildung 2-6a) durchläuft der Kommissionierer alle Lagergassen des Systems mäanderförmig. Die Routenführung ist unabhängig von der Lage der anzufahrenden Lagerplätze, sodass auch Gassen durchquert werden, in denen kein Material entnommen werden muss. Eine in der Literatur häufig behandelte Variation der Schleifenstrategie ist die Schleifenstrategie mit Überspringen (auch als *traversal strategy* bezeichnet, Abbildung 2-6b). Der Kommissionierer durchquert dabei lediglich die Lagergassen, in denen mindestens ein Lagerplatz angefahren werden muss. [Hal-1993; Car-1998; Hwa-2004; Sad-2007, S. 40f.]

Wie die Schleifenstrategie besitzt auch die Stichgangstrategie zwei Varianten. Bei der Stichgangstrategie ohne Wiederholung (auch als *return policy* bezeichnet, Abbildung 2-7a) betritt der Kommissionierer vom Verkehrsgang aus die Lagergassen, in denen sich mindestens ein Pick befindet. Sobald er in der Gasse alle Entnahmeeinheiten gepickt hat, kehrt er um und verlässt die Gasse auf der selben Seite wieder. Die Stichgangstrategie kann neben der beschriebenen Art auch so ausgeführt werden, dass der Kommissionierer eine Gasse mehrfach betritt und dabei jeweils nur eine Pickeinheit entnimmt. Die Pickeinheit wird anschließend im Verkehrsgang beispielsweise auf einen Wagen übergeben. Die Stichgangstrategie mit Wiederholung (Abbildung 2-7b) stellt also eine Möglichkeit dar, die Gangbreite zu reduzieren, da der Wagen nicht

hindurchpassen und manövriert werden muss. Gleichzeitig steigt jedoch die zurückzulegende Wegstrecke deutlich an. [Car-1998; Hwa-2004; Sad-2007, S. 42f.]

Aus der Schleifenstrategie lässt sich die Mittelpunkt-Heuristik (auch als *midpoint policy* bezeichnet, Abbildung 2-8) ableiten. Hier werden die Lagergassen halbiert. Der Kommissionier bewegt sich nun analog zur Schleifenstrategie entlang des Verkehrsgangs, betritt die Lagergassen jedoch nur für Picks in der vorderen Hälfte. Anschließend wechselt er am Ende des Lagerbereichs auf die Rückseite und betritt die Lagergassen erneut von hinten, um die fehlenden Picks in der hinteren Hälfte durchzuführen. [Hal-1993; Car-1998; Hwa-2004; Sad-2007, S. 43f.]

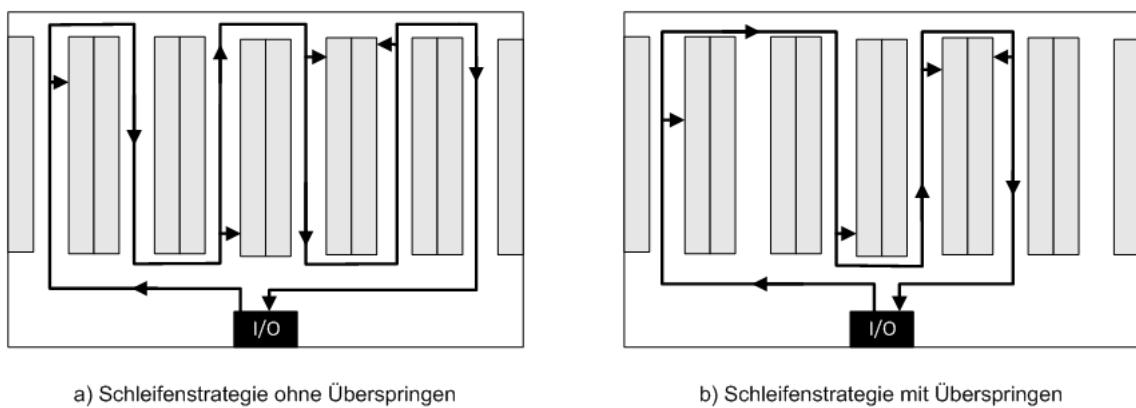


Abbildung 2-6: Bewegungsstrategien der eindimensionalen Kommissionierung: Schleifenstrategie

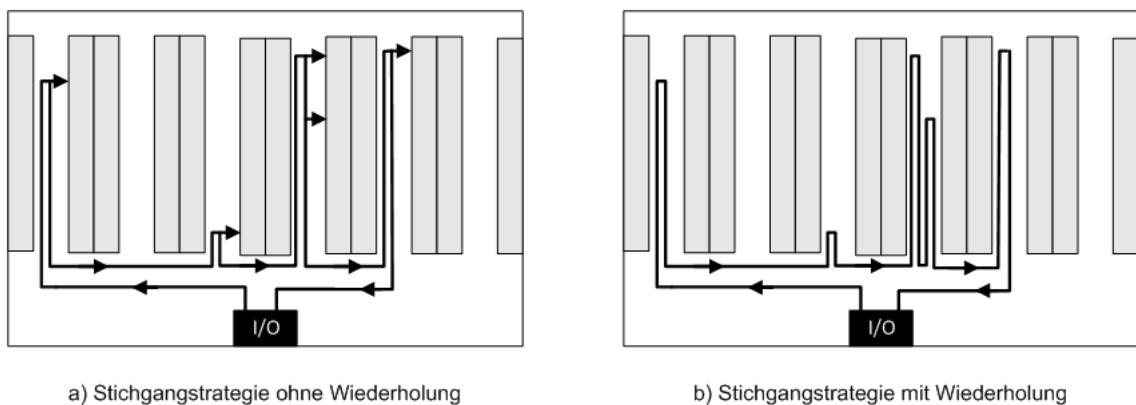


Abbildung 2-7: Bewegungsstrategien der eindimensionalen Kommissionierung: Stichgangstrategie

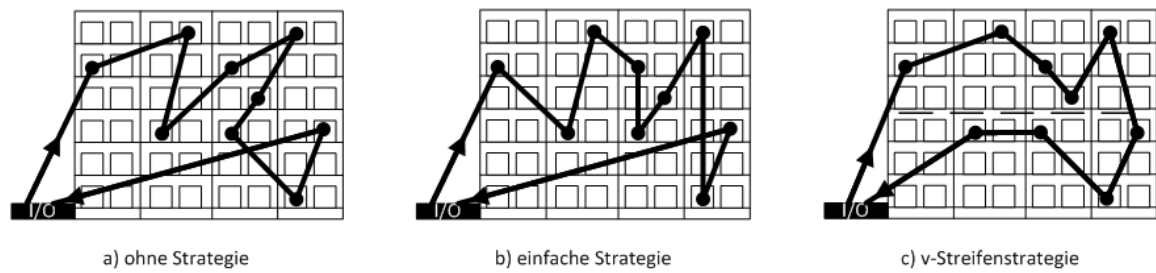


Abbildung 2-9: Bewegungsstrategien der zweidimensionalen Kommissionierung

2.3.3 Strategien bei kombinierten Bereichen

Die Strategien und mögliche Ausprägungen bei kombinierten Lagerbereichen sind in Tabelle 2-7 zusammengefasst.

Tabelle 2-7: Morphologischer Kasten der Strategien bei Kommissionierung mit Nachschub

Parameter	Ausprägungen		
Belegungsstrategie (Entn.)	Frei	Fest	Schnellläuferkonzentration
Belegungsstrategie (Nach.)	Frei	Fest	
Einlagerstrategie (Entn.)	Prozessorientiert	Platzorientiert	
Einlagerstrategie (Nach.)	Prozessorientiert	Platzorientiert	
Bewegungsstrategie (Entn.)	Stichgangstrategie mit Wiederholung	Stichgangstrategie ohne Wiederholung	Schleifenstrategie mit Überspringen
	Schleifenstrategie ohne Überspringen	Mittelpunktheuristik	
Bewegungsstrategie (Nach.)	-		

Lagerbereiche mit Kommissionierung und Nachschublagerung können als zwei aneinander angepasste Teilbereiche betrachtet werden, wobei für jeden die Belegungs-, Einlager- und Bewegungsstrategie separat festgelegt werden. Die entsprechenden Ausprägungen wurden unter 2.3.1 und 2.3.2 erläutert. Zu beachten ist, dass bei kombinierten Lagerbereichen die Kommissionierung ein-/zweidimensional erfolgt, weswegen nur Bewegungsstrategien für diese Fortbewegungsart möglich sind.

2.4 Dimensionierung

Die dritte Klasse der Freiheitsgrade neben der Konfiguration und den Strategien ist die Dimensionierung des Lagerbereichs. Die Dimensionierung umfasst alle Freiheitsgrade, welche die Ausdehnung des Lagerbereichs beschreiben. Entsprechend der drei Raumrichtungen legen die Anzahl der Lagergassen, die Anzahl der Ebenen und die Länge der Lagergassen die Anzahl an Lagerplätzen im Lagerbereich und damit die Kapazität fest [Gün-2011, S. 35]. In Tabelle 2-8 sind die Freiheitsgrade der Dimensionierung sowie ihre Ausprägungen dargestellt. Für alle drei Prozessarten sind die Gassenlänge und Gassenzahl Bestandteil der Dimensionierung. Die Anzahl der Ebenen muss für kombinierte Bereiche zweifach vorgesehen werden, um jeden der Teilbereiche separat beschreiben zu können.

Tabelle 2-8: Morphologischer Kasten der Dimensionierung

Parameter	Ausprägungen
Gassenlänge	1...N
Gassenzahl	1...N
Ebenenzahl (Standard/Entn.)	1...N
Ebenenzahl (Nach.)	1...N

2.5 Planung manuell bedienter Lagersysteme

Der Bedarf, eine Planung durchzuführen, besteht immer dann, wenn Ist- und Sollzustand voneinander abweichen. Der Planer hat nun die Aufgabe, aus verschiedenen Alternativen zur Beseitigung dieser Differenz eine auszuwählen. Demzufolge bedeutet Planung, ein Entscheidungsproblem zu lösen und die Alternative zu wählen, die im Hinblick auf eine bestimmte Zielsetzung die Differenz zwischen Ist- und Sollzustand bestmöglich auflöst. [Ada-1996, S. 2f.; Kle-2011, S. 1]

Adam identifiziert einen dreistufigen Prozess zur Lösung des Entscheidungsproblems: auf die Erkenntnis und Analyse des Problems folgt die kreative Ideenfindung. In dieser Phase werden verschiedene Alternativen generiert mit dem Ziel, eine breite Entscheidungsbasis zu erzeugen. Die dritte Stufe besteht in der Bewertung der generierten Alternativen hinsichtlich bestimmter, aus der Analyse des Problems abgeleiteter Kriterien. Diese Bewertung dient dazu, die Planungsalternative zu identifizieren, die hinsichtlich der Zielsetzung das meiste Potenzial bietet. [Ada-1996, S. 35]

Übertragen auf manuell bediente Lagersysteme bedeuten die Ausführungen von *Adam* sowie *Klein und Scholl*: Der Istzustand der Lagerung eines bestimmten Sortiments wurde als unzureichend erkannt. Dies ist beispielsweise bei Neuplanungen der Fall (keine Lagermöglichkeit für das Sortiment vorhanden), aber auch bei Umbau/Erweiterung eines bestehenden Lagers (Lagermöglichkeit vorhanden, jedoch den zukünftigen Randbedingungen nicht entsprechend). Der Sollzustand lässt sich beschreiben als Lagerung des Sortiments in einem Lagersystem, welches hinsichtlich bestimmter Bewertungskriterien am besten geeignet ist. Die möglichen Bewertungskriterien werden in Abschnitt 2.5.1 erläutert. Um den Sollzustand zu erreichen, müssen verschiedene Planungsalternativen generiert werden. Auf existierende Ansätze sowohl für Materialflusssysteme als auch für Lagersysteme wird in Kapitel 2.5.2 eingegangen.

2.5.1 Bewertung von Lagersystemen

Die Bewertung von Lagersystemen dient dazu, verschiedene Alternativen gegenüberzustellen und so die Grundlage für den Entscheidungsprozess zu bilden, der Bestandteil jeder Planung ist. Um die Vergleichbarkeit der Alternativen zu gewährleisten, muss die Bewertung möglichst einheitlich erfolgen. Die Vielzahl an unterschiedlichen Ausprägungen manuell bedienter Lagersysteme erschwert jedoch die Formulierung von Bewertungsmodellen mit einem breiten Anwendungsspektrum. [Ash-1985; Gu-2010]

Allgemein lässt sich der Ressourcenverbrauch als Bewertungskriterium heranziehen, wobei die Ressourcen die Faktoren Fläche, Zeit und Kosten umfassen [Wis-2009, S. 45]. Unter der Annahme, dass alle betrachteten Planungsalternativen die an sie gestellten Anforderungen erfüllen, stellen diese drei Faktoren die zu minimierenden Zielgrößen dar. Die Fläche umfasst über den Flächenbedarf hinaus weitere Größen der Geometrie wie das vom Lagersystem eingenommene Volumen oder dessen Kapazität. Der Faktor Zeit umfasst die Zeiten der Tätigkeiten, die durch das Personal durchzuführen sind und die sich direkt mit der Lager- und Kommissionieraufgabe verknüpfen lassen. Hierzu zählen im Wesentlichen die Spielzeiten zur Ein-, Um- und Auslagerung von Lager- und Bereitstelleinheiten. Er drückt sich letztendlich in der erzielbaren Leistung der Bediengeräte und in einer geringen Anzahl an benötigten Bediengeräten und benötigtem Personal aus. Unter dem Faktor Kosten werden sämtliche mit der Investition in das geplante System verbundenen Kosten verstanden, die beispielsweise aus den Faktoren Zeit und Fläche entstehen, jedoch auch weitere Aspekte wie Investition in die Lagereinrichtung umfassen. Die folgenden Abschnitte widmen sich aus der Literatur bekannten Modellen, in denen ein oder mehrere der Faktoren zur Bewertung von Lagersystemen behandelt werden.

Modelle zur Bewertung des Faktors Zeit

Der Faktor Zeit wirkt sich direkt auf Personal- und Bediengerätebedarf aus. Mit steigendem Zeitbedarf pro Auftrag sinkt die Leistung des einzelnen Bediengerätes, was sich in einem höheren Bedarf an Bediengeräten und Personal für die termingerechte Erfüllung der Aufträge niederschlägt. In der Literatur existieren zahlreiche Ansätze, den Zeitbedarf in Abhängigkeit der unterschiedlichen Bewegungsformen verschiedener Bediengeräte und der Bewegungsstrategien zu modellieren. Die Bewertung der Zeit ist gleichbedeutend mit der Bewertung der Spielzeit und der Bewertung der Leistung. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt zwischen diesen Größen nicht unterschieden.

Den einfachsten Fall der Fortbewegung stellt die Einheitenlagerung mit additiver Fortbewegung dar. Das Bediengerät führt hierbei die Fahr- und Hubbewegung nacheinander aus. Analytische Modelle für die Berechnung der zurückgelegten Wegzeit basieren auf einem idealisierten Geschwindigkeitsverlauf mit konstanter Anfahr- und Bremsbeschleunigung (Dreiecks- und Trapezfahrt) [Gud-1973, S. 56f.]. Dieser Ansatz wird an verschiedener Stelle aufgegriffen, beispielsweise bei *Fahnert* [Fah-1978, S. 47] sowie *Appelt und Krampe* [App-1985, S. 286f.]. Durch Mittelwertbildung über alle Lagerplätze in der Regalwand lässt sich aus der allgemeinen Wegzeitformel ein analytisches Modell für Einzel- und Doppelspiele gewinnen [Fah-1978, S. 53; Gud-2010, S. 622f.].

Im Gegensatz zur additiven Bewegung sind einige Lagerbedienungsvarianten in der Lage, gleichzeitig Fahr- und Hubbewegungen durchzuführen (Diagonalfahrt). Die Grundformel des idealisierten Geschwindigkeitsverlaufs lässt sich auch für diese simultane Fortbewegungsart anwenden, indem die Fahrzeit dem Maximum der Hub- und Fahrzeit gleichgesetzt wird [Gud-1973, S. 74]. Grundsätzlich sind sowohl Regalbediengeräte als auch bestimmte Flurförderzeuge (Hochregal- oder Kommissionierstapler wie in Kapitel 2.1.3 definiert) in der Lage, Diagonalfahrten durchzuführen. Eine Übersicht von Modellen zur Spielzeitberechnung bei automatisierten Lagersystemen, die nicht Gegenstand des Projektes OptiMAL sind, findet sich beispielsweise bei *Günthner et al.* [Gün-2011, S. 43ff.]. Da sich jedoch Flurförderzeuge nicht wie Regalbediengeräte oben und unten an zwei Führungsschienen abstützen, bestehen Einflüsse durch die Kippstabilität und Schwingungen des Mastes, die durch eine höhenabhängige Geschwindigkeitsregelung abgefangen werden [Bor-1994, S. 8]. Ein analytisches Modell, welches für Schmalgangsysteme die simultane Fortbewegung mit einem höhenabhängigen Geschwindigkeitsprofil kombiniert, wurde von *Bruns* entwickelt [Bru-1990]. Dieses Modell wurde von *Borcherdt* und *Weidlich* weiterentwickelt

[Bor-1994; Wei-1995] und letztlich in die *VDI-Richtlinie 2516* überführt [VDI-2516], so dass auch Beschleunigungen und Verzögerungen sowie Lagerplatzabmessungen einbezogen werden können.

Auch im Bereich der Kommissionierung nutzt ein Großteil der bekannten Modelle analytische Formeln zur Bestimmung der Spielzeit. Die grundlegende Arbeit zur ein-/zweidimensionalen Kommissionierung stammt von *Kunder und Gudehus* [Kun-1975]. Das von ihnen vorgestellte Modell gibt für Stichgang- und Durchgangstrategie die mittlere Wegzeit in Abhängigkeit von Auftragsdaten und Lagerdimensionen an. Erweitert wird das Modell beispielsweise von *Hall* um die Berücksichtigung der Wegzeit beim Queren der Lagergasse sowie um weitere Bewegungsstrategien (Mittelpunkt-Heuristik und Largest-Gap-Heuristik) [Hal-1993]. *Caron et al.* [Car-1998] sowie *Chew und Tang* [Che-1999] berücksichtigen ebenfalls weitere Bewegungsstrategien und untersuchen die Auswirkungen einer Schnellläuferkonzentration als Belegungsstrategie. Eine umfassende Zusammenstellung der verschiedenen Bewegungsstrategien in Kombination mit Schnellläuferkonzentration und freier Lagerordnung findet sich bei *Sadowsky* [Sad-2007]. Neben analytischen Ansätzen existieren auch simulationsgestützte. *Gibson und Sharp* untersuchen mit Hilfe eines Simulationsmodells die Auswirkungen unterschiedlicher Belegungsstrategien und Batching-Strategien mit dem Kriterium der mittleren Tourlänge [Gib-1992]. Die Batching-Strategie beschreibt, welche Kundenaufträge zu einem Kommissionierauftrag zusammengestellt und gemeinsam gepickt werden. Einen weiteren Ansatz zur Integration der Simulation in die Grobplanung von Kommissioniersystemen beschreibt *Ulbrich* [Ulbr-2010]: Mit Hilfe eines modularen Bausteinkastens lassen sich unterschiedliche Kommissioniersysteme aufbauen. Als Bewertungskriterium dienen die anfallenden Kosten sowie die Leistung des Kommissionierers.

Das Problem der Beschreibung zwei-/dreidimensionaler Bewegung ist laut *Kunder und Gudehus* bereits 1975 „weitgehend analytisch gelöst“ [Kun-1975]. Die Autoren verweisen auf Modelle von *Zschau* für Einzelspiele von Stapelkränen sowie *Miebach* für Kommissionierung mit der n-Streifenstrategie [Zsc-1964; Mie-1972]. Eine ausführliche Herleitung und übersichtliche Darstellung mit breitem Anwendungsbereich liefert *Gudehus* für Kommissionierspiele in einer Regalwand mit den in 2.3.2 genannten Strategien [Gud-1973, S. 72ff.].

Modelle zur Bewertung der Faktoren Fläche und Kosten

Cormier und Gunn untersuchen den Einfluss der Wiederbeschaffungsmenge und der Lagerkapazität auf die Kosten. Das Kostenmodell beinhaltet sowohl Kosten für die Lagerhaltung als auch für Leasing zusätzlicher Lagerkapazität. Die kostenoptimale Wiederbeschaffungsmenge sowie der hierfür benötigte Leasing-Anteil lassen sich aus

der Zielfunktion analytisch ermitteln. Eine Weiterentwicklung des Modells findet sich bei *Goh et al.* Sie ermöglicht die Untersuchung stückweise linear ansteigender Kosten für die Lagerhaltung, für die sich ebenfalls auf analytischem Weg die kostenoptimale Wiederbeschaffungsmenge und Lagergröße bestimmen lassen. [Cor-1996; Goh-2001]

Weitere Modelle finden sich in der Grundlagenliteratur zur technischen Logistik. So untersuchen beispielsweise *Arnold und Furmans* die Auswirkungen dispositiver Lagerhaltung auf einen idealisierten sägezahnförmigen Bestandsverlauf. Die daraus resultierende Anzahl zusätzlich vorzusehender Lagerplätze sichert die Dimensionierung zu einem vorgegebenen Sicherheitsniveau gegen Ausfall in Form von Lieferunfähigkeit oder Überlaufen. [Arn-2009, S. 173ff.]

Gudehus stellt ein Modell zur Bestimmung des Bedarfs an Lagerplätzen je Artikel auf. Für feste und freie Lagerordnung und abhängig von der Lagerplatzkapazität lässt sich für einen gegebenen Maximal- und Sicherheitsbestand bei idealisiertem sägezahnförmigen Bestandsverlauf die Anzahl an Lagerplätzen berechnen, die im Lagerbereich vorgesehen werden müssen. Dieses Modell wird anschließend als Grundlage für die Berechnung der Geometrie verwendet. Dabei wird unabhängig von der Lagereinrichtung ein Lagerbereich modular aufgebaut. Die dadurch gewonnenen Abmessungen der einzelnen Module und des gesamten Lagerbereichs lassen sich zur Bewertung der Geometrie heranziehen. [Gud-2010, S. 601ff.; Gud-2010, S. 616ff.]

Ganzheitliche Modelle zur Bewertung der Faktoren Fläche, Zeit und Kosten

Neben den genannten Modellen, die sich mit der Bewertung von Lager- und Kommissioniersystemen hinsichtlich eines Faktors befassen, existieren Modelle, die Fläche, Zeit und Kosten zusammenfassen. Ein solches analytisches Modell kann leicht zur Ableitung der Zielfunktion für eine darauf aufbauende Optimierung verwendet werden, weshalb eine eventuell durchgeführte Optimierung ebenfalls in diesem Abschnitt behandelt wird.

Bereits 1967 stellt *Francis* ein Modell zur Ermittlung der kostenminimalen Abmessungen eines rechteckigen Lagerbereichs auf. Für die Bewertung der Zeit wird die Bewegung des Lagerguts zwischen einem beliebigen Punkt der Lagerfläche und dem Dock verwendet; die Fläche fließt an Hand des Umfangs in die Kostenfunktion ein. Auf Grund der Vernachlässigung von weiteren Freiheitsgraden wie Strategien oder Lagereinrichtung besitzt die Kostenfunktion einen einfachen Aufbau, sodass die optimalen Abmessungen analytisch bestimmt werden können. [Fra-1967]

Roberts und Reed Jr. entwickeln ein einfaches Modell zur Bewertung der Handlings- und Baukosten eines Lagers. Die Kosten für die anfallenden Lagerspiele stehen in linearem Zusammenhang mit dem mittleren zurückgelegten Weg. Die Baukosten bestehen aus den Kosten für die benötigte Fläche sowie für den Umfang des Gebäudes. Mit Hilfe dynamischer Programmierung werden kostenminimale Anordnungen sogenannter Lagerfelder ermittelt. Diese Lagerfelder bilden als rechteckige Flächenelemente beispielsweise Lagergassen ab, wobei zwei unterschiedliche Anordnungsprinzipien angewandt werden. Der genaue Aufbau der Lagerfelder sowie unterschiedliche Strategien werden vernachlässigt. [Rob-1972]

Das von *Fahnert* vorgestellte Modell ist sowohl auf Lagersysteme mit Einheitenlagerung als auch auf Kommissionierung nach dem Prinzip „Mann zur Ware“ anwendbar. Fläche und Spielzeiten werden zur Bestimmung der Lagerkosten und Investitionshöhe herangezogen, wobei zusätzliche Kostenanteile wie Steuern und Versicherungen oder Brandschutz einbezogen werden [Fah-1978, S. 78ff.]. Rechnergestützt werden anschließend Lagerart, die Anzahl der Regalebenen und Lagergassen sowie die Art und Anzahl der Bediengeräte variiert und aus der vollständigen Berechnung aller technisch möglichen Varianten die kostenminimale ausgewählt [Fah-1978, S. 98ff.].

Bassan et al. entwickeln ein Modell für analytischen Bewertung der Kosten, die sich bei Einheitenlagerung aus der Fläche, der Leistung sowie aus dem Gebäude ergeben. Die Kosten lassen sich nach den betrachteten Freiheitsgraden Gassenzahl und Stellplatzzahl je Gasse ableiten, sodass die kostenminimale Lösung gefunden wird. Der Aspekt der Layoutgrundform wird ebenfalls aufgegriffen, jedoch werden für beide untersuchten Varianten (Stirnganglayout, zoniertes Layout) separate Formeln aufgestellt und jeweils als eigenes Optimierungsproblem betrachtet. [Bas-1980]

Das Modell von *Bassan et al.* wird von *Rosenblatt und Roll* weiterentwickelt, sodass neben den Kosten für Fläche und Handling auch Kosten durch Fehlbestand bei nicht ausreichender Lagergröße einbezogen werden. Zusätzlich werden verschiedene Belegungsstrategien untersucht, wobei eine rein analytische Betrachtung nicht mehr möglich ist. Stattdessen erfolgt die Einbindung eines Simulationsmodells zur rechnergestützten Untersuchung. [Ros-1984]

Ein weiterer Ansatz zur Bewertung von Lager- und Kommissioniersystemen stammt von *Wisser*. Ziel der Arbeit ist eine standardisierte Vorgehensweise zur Bewertung verschiedener Lagersysteme. Berücksichtigt werden acht ausgewählte, häufig auftretende Lösungen von Lager- und Kommissioniersystemen. Mit Hilfe statischer Berechnungsmodelle werden die Faktoren Zeit, Fläche und Kosten dieser Systeme bewertet

und im Rahmen eines Referenzmodells beispielsweise für das Benchmarking genutzt. [Wis-2009]

2.5.2 Planungsvorgehen für manuell bediente Lagersysteme

Als Element von Logistikketten unterliegen Lager- und Kommissioniersysteme nicht nur Planungsansätzen, die sie isoliert von anderen Materialflusselementen betrachten. Vielmehr beschäftigen sich auch allgemein für die Materialflussplanung entwickelte Ansätze mit Lager- und Kommissioniersystemen.

So identifiziert *Allgayer* die Methode der Variantenbildung als wichtiges Werkzeug im Planungsprozess [All-1999, S. 21f.]. Die zunehmende Verfeinerung von Varianten erfordert die gleichzeitige Reduktion der Anzahl betrachteter Varianten. Dieser Prozess der Lösungsfindung erfolgt während eines stufenweisen, iterativen Vorgehens, bei dem für Anpassungen gegebenenfalls in frühere Planungsstufen zurückgesprungen wird. Der Ablauf der Materialflussplanung besteht aus den vier Planungsphasen Vorarbeiten, Grob- und Feinplanung sowie Realisierung (Abbildung 2-10), die wiederum aus zahlreichen Teilphasen bestehen. Als Hauptaufgaben der Grobplanungsphase werden die Struktur- und die Systemplanung identifiziert. Ziel der Strukturplanung ist „der Entwurf verschiedener Ablauffolgen, die sich aus einzelnen Arbeitsschritten, Materialflussoperationen oder Transportvorgängen zusammensetzen“ [All-1999, S. 34]. Die Systemplanung baut auf verschiedene Strukturvarianten auf, indem „für die einzelnen Arbeitsschritte und Materialflussoperationen [...] qualitativ geeignete Materialflussmittel ausgewählt werden“ [All-1999, S. 41]. Übertragen auf Lagersysteme erfolgt in der Strukturplanung die Einordnung des Lagers in die Werksstruktur, beispielsweise durch Festlegung der Position und Abschätzung der Fläche in einem Blocklayout. Die Systemplanung hat die Aufgabe, das Lagersystem auszugestalten. Darunter fällt unter anderem die Auswahl der Lagereinrichtung und Lagerbedienung, wobei Randbedingungen durch die Strukturplanung eingehalten oder angepasst werden müssen. Weitere Aufgaben wie die Dimensionierung und die Erstellung von Groblayouts finden ebenfalls in dieser Phase statt. Zum Abschluss der Grobplanungsphase erfolgt die Bewertung verschiedener Systemvarianten sowie die Entscheidung für ein System [All-1999, S. 33ff.].

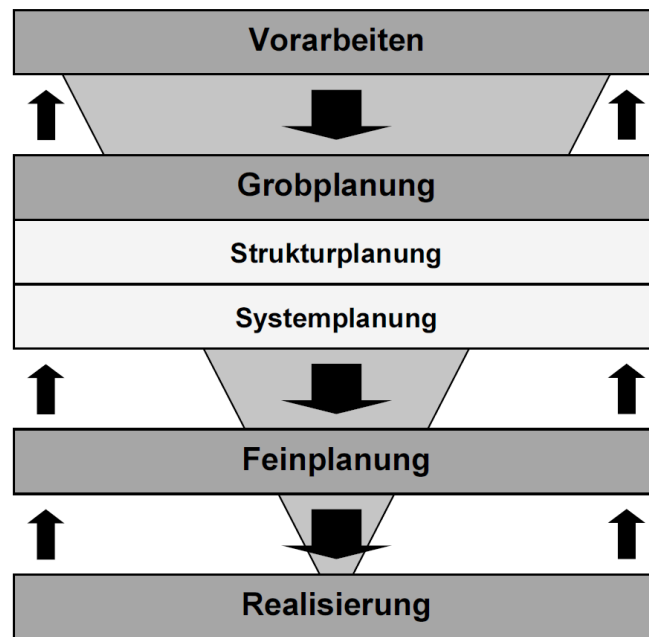


Abbildung 2-10: Allgemeiner Planungsablauf für Materialflusssysteme [All-1999, S. 25]

Einen auf die Lagerplanung zugeschnittenen Ansatz bestehend aus den Phasen Systemfindung, Layoutplanung und Detailplanung beschreibt *Gudehus*. Die Systemfindung entspricht den von *Allgayer* als Systemplanung zusammengefassten Tätigkeiten. Das auf diese Weise ausgestaltete und dimensionierte Lagersystem wird in der anschließenden Layoutplanung in die Struktur der Gesamtanlage eingefügt. Die beiden Phasen der Struktur- und Systemplanung erfolgen daher in umgekehrter Reihenfolge wie bei *Allgayer*, jedoch lassen sich auch im Ansatz von *Gudehus* die Reduzierung der Varianten und die zunehmende Verfeinerung als wichtige Merkmale der Planung erkennen. [Gud-2010, S. 614ff.]

Während die von *Allgayer* und *Gudehus* vorgestellten Ansätze als Vorgehensmodelle angesehen werden können, die den Ablauf und die Teilziele der Lagerplanung angeben und unabhängig von den angewandten Methoden gültig sind, existieren Ansätze, die speziell auf die Anwendung rechnerunterstützter Werkzeuge oder mathematischer Methoden setzen. Einige dieser Ansätze wurden bereits in 2.5.1 beschrieben, so beispielsweise [Fah-1978] und [Bas-1980].

Ein aktueller Ansatz ist die Nutzung dezentraler Agentensysteme zur Grobplanung. Die komplexe Aufgabe der Planung eines Materialflusssystems wird durch den dezentralen Charakter in einfachere Teilprobleme zerlegt, deren leichter zu gewinnende Lösungen zu einer Gesamtlösung zusammengefügt werden. Verschiedene Anwendungen von Agentensystemen für die Materialflussplanung beschäftigen sich mit Intalogistiksystemen [You-2014] sowie Kommissioniersystemen [Eil-2012].

2.6 Fazit zur Planung manuell bedienter Lagersysteme

Der Stand der Forschung zur Planung manuell bedienter Lagersysteme lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Als relevante Bewertungskriterien und damit als Zielgrößen der Planung wurden die Faktoren Fläche, Zeit und Kosten identifiziert. Es existieren zahlreiche Quellen, die sich mit der Bewertung von Lagersystemen hinsichtlich dieser Faktoren befassen (siehe 2.5.1). In vielen Fällen wird jedoch nicht jeder der Faktoren berücksichtigt.
- Um die analytische Bewertung eines Lager- oder Kommissioniersystems mit Hilfe geschlossener Formeln zu ermöglichen, wird häufig der Betrachtungsraum eingeschränkt. Die Vergleichbarkeit zweier Lagersysteme ist nur dann uneingeschränkt möglich, wenn das verwendete Bewertungsmodell für beide Systeme anwendbar ist.
- Die Einschränkung des Betrachtungsraums betrifft zumeist die Bereiche Konfiguration und Strategien. Die Frage nach dem kostenoptimalen Lagersystem wird auf diese Weise zur Frage nach der kostenoptimalen Dimensionierung bei Vorgabe einer eingeschränkten Auswahl an Konfigurationen und Strategien, z. B. bei *Francis* [Fra-1967] und *Bassan et al.* [Bas-1980].

Diese Gründe verhindern die einfache Anwendbarkeit der in der Literatur vorgestellten Ansätze. Bezogen auf Kommissioniersysteme bestätigen *de Koster et al.* dies, indem sie einen Mangel an generell anwendbaren Planungsansätzen feststellen, bedingt durch die Betrachtung ausgewählter Systeme [Kos-2007].

In Expertengesprächen mit Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses wird der Planungsprozess in der Praxis aufgenommen. Die Ergebnisse bestätigen den von *Allgayer* beschriebenen Ablauf der Planung: auf die Datenaufnahme und -aufbereitung folgt eine Vorauswahl von Varianten, unter Umständen verbunden mit der Entscheidung für ein automatisiertes oder manuell bedientes System. In den anschließenden Phasen der Grob- und Feinplanung werden schrittweise einige wenige Varianten ausgewählt und ausgeführt. Die am Ende stehende Dokumentation bildet den Abschluss der Planung. Gemeint ist hier weniger die während des gesamten Planungsprozesses erfolgende fortlaufende Dokumentation, sondern vielmehr die Erstellung finaler, formalisierter Dokumente zur Übergabe an den Auftraggeber des Lagerplaners (Abbildung 2-11). Die genannten Planungsschritte werden nicht streng linear durchgeführt. Vielmehr ist der Prozess rekursiv, da immer wieder zurückgesprungen werden muss. Dies kann soweit führen, dass bei fortgeschrittener Planung z. B. durch geänderte

Rahmenbedingungen oder zusätzliche Informationen des Auftraggebers bis zur Datenaufnahme zurückgegangen wird. Die bis zu diesem Zeitpunkt entwickelten (Zwischen)ergebnisse besitzen abhängig von den Änderungen der Eingangsdaten nur noch eingeschränkte Gültigkeit und müssen angepasst oder gar verworfen werden. Als weiteres Risiko bei der Planung wird die Subjektivität genannt. Gerade in frühen Phasen legt der Planer erfahrungsbedingt einige Varianten fest, die ausgeplant werden. Diese subjektiven Entscheidungen beeinflussen stark die betrachtete Lösungsmenge und damit die erzielbare Qualität des Planungsergebnisses. Eine von *Wunderle und Sommer* durchgeführte Umfrage unter 80 Beratungs- und Planungsunternehmen mit Sitz in Deutschland bestätigen die in den Experteninterviews gewonnenen Ergebnisse: so geben knapp 90 % der befragten Unternehmen als Quelle für die Auswahl intralogistischer Betriebsmittel Erfahrung an. Daneben besitzen das Internet und persönliche Kriterien mit fast 70% den stärksten Einfluss [Wun-2014].

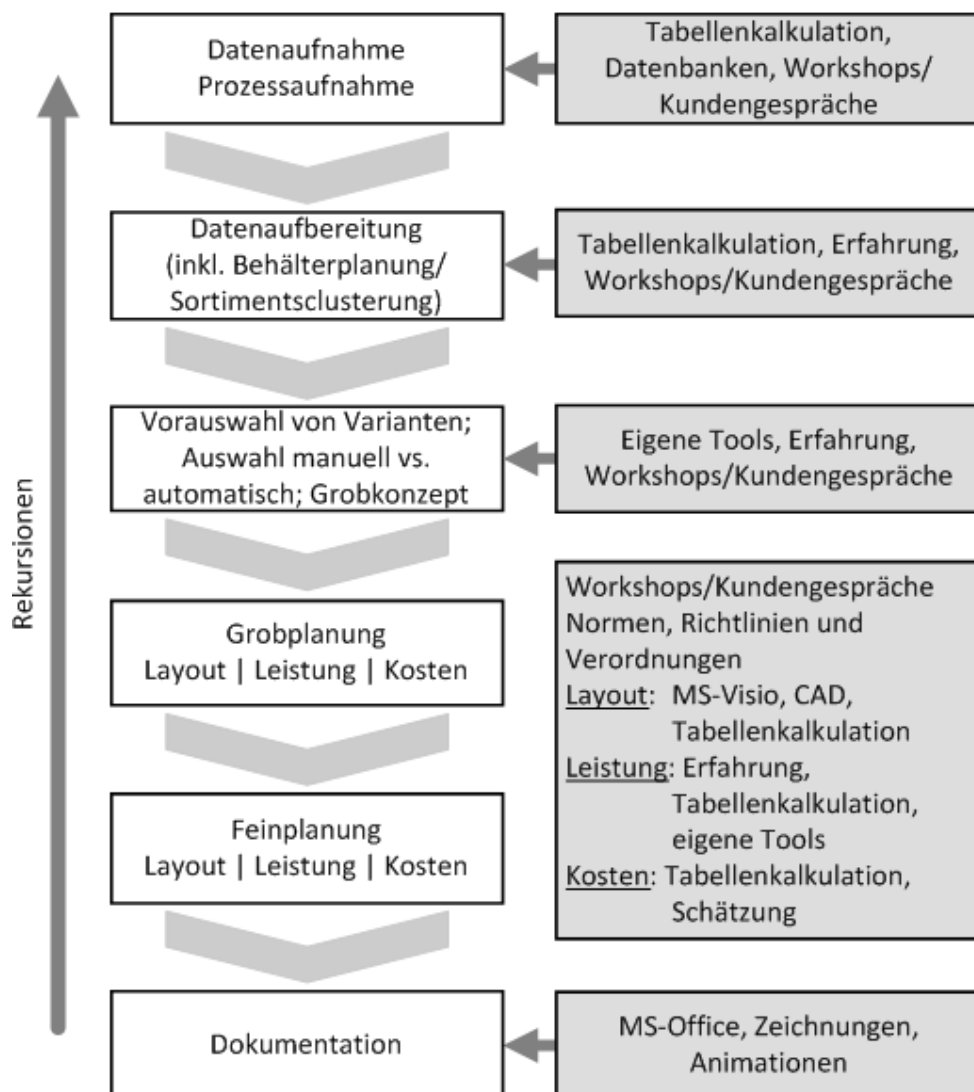


Abbildung 2-11: Herkömmlicher Planungsablauf basierend auf Expertengesprächen mit Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses

Als Schwachstellen des Planungsprozesses werden folgende Punkte identifiziert:

- Auf Grund von Zeit- und Kostenzielen erfolgt eine Fokussierung auf einige wenige Planungsalternativen.
- Die Auswahl der Alternativen, die ausgeplant werden, erfolgt subjektiv und birgt das Risiko, dass vielversprechende Alternativen vernachlässigt werden.
- Auf Grund der eingeschränkten Lösungsmenge können über die Qualität der ausgeplanten Alternativen nur ungenaue Aussagen gemacht werden. Eine Alternative kann zwar den Anforderungen entsprechen und von ausreichender Qualität sein - die optimale Lösung und damit die erzielbare Qualität sind jedoch unbekannt.

Um diesen Schwachstellen zu begegnen, ist in der Grobplanungsphase eine rechnergestützte, systematische Untersuchung der Lösungsmenge in Verbindung mit einer objektiven, einheitlichen Bewertung der zu vergleichenden Planungsalternativen nötig. Die aus der Literatur bekannten Ansätze zur Bewertung und Auswahl von Planungsalternativen sind nur teilweise geeignet, den Planungsprozess auf diese Weise zu unterstützen. Teilweise werden lediglich Bewertungsmodelle für die Faktoren Fläche, Zeit und Kosten vorgestellt, die gegebenenfalls im Anwendungsbereich erweitert oder mit anderen Bewertungsmodellen kombiniert werden müssen. Für die Anwendung im Planungsprozess müssen sie in ein rechnergestütztes Planungswerkzeug integriert werden. Teilweise erfolgt in den vorgestellten Ansätzen zum Auffinden der optimalen Lösung eine Einschränkung auf bestimmte Systeme, damit eine analytische Ermittlung des Optimums möglich ist.

Die Zielsetzung des Forschungsprojekts OptiMAL, eine Planungsmethode zur optimalen Planung manuell bedienter Lagersysteme zu entwickeln, bestätigt sich daher durch den Stand der Wissenschaft und Technik.

3 Grundsätzliche Überlegungen zur Planungsmethode

Für die Erstellung einer Planungsmethode sind einige grundsätzliche Überlegungen nötig, die in diesem Kapitel ausgeführt werden. Der von *Adam* formulierte dreistufige Planungsprozess wie in Kapitel 2.4 erläutert ist für Planungsprobleme allgemein gültig. Er eignet sich daher für grundsätzliche Überlegungen zur Planungsmethode, die unabhängig von bestehenden Planungsansätzen für manuell bediente Lagersysteme sind. Die drei Stufen Problemerkennntnis und -analyse, Generierung von Planungsalternativen sowie Bewertung und Entscheidung [Ada-1996, S. 35] lauten übertragen auf manuell bediente Lagersysteme:

1. Als Erkenntnis des Problems können die Ausführungen in Kapitel 2 betrachtet werden. Die Problemanalyse wird in den folgenden Kapiteln bei der Erstellung der Planungsmethode durchgeführt.
2. Die Lagersystemplanung stellt ein wiederholt auftretendes Planungsproblem dar, wobei sich verschiedene Planungsfälle durch verschiedene Anforderungen und Rahmenbedingungen unterscheiden. Die Generierung von Planungsalternativen muss daher so allgemeingültig gestaltet sein, dass für den jeweils untersuchten Planungsfall passende Lagersysteme erzeugt werden können.
3. Im dritten Schritt der Planung werden die generierten Planungsalternativen hinsichtlich der identifizierten Zielgrößen mit Hilfe geeigneter Modelle bewertet.

Abbildung 3-1 zeigt den grundlegenden Ablauf, dessen Elemente in den folgenden Kapiteln genauer erläutert werden. Die Generierung von Planungsalternativen umfasst die Zuweisung aller einzulagernden Artikel zu einem der Lagerbereiche sowie die Gestaltung der Lagerbereiche mit Festlegung der Konfiguration, Strategien und Dimensionierung. Basierend auf der anschließenden Bewertung der Planungsalternativen hinsichtlich der Faktoren Fläche, Zeit und Kosten erfolgt die Auswahl der zu präferierenden Planungsalternative. Die Auswahl einer geeigneten Vorgehensweise zur Generierung und Bewertung von Lösungen ist abhängig von dem zu lösenden Planungsproblem. Dieses besteht aus der Zielfunktion, die zur Bewertung herangezogen wird, sowie eventuellen Randbedingungen. Die Zielfunktion wiederum ergibt sich aus den Modellen zur Bewertung. Die Festlegung auf ein bestimmtes Verfahren ist daher erst nach Erstellung der Bewertungsmodelle möglich (Kapitel 7).

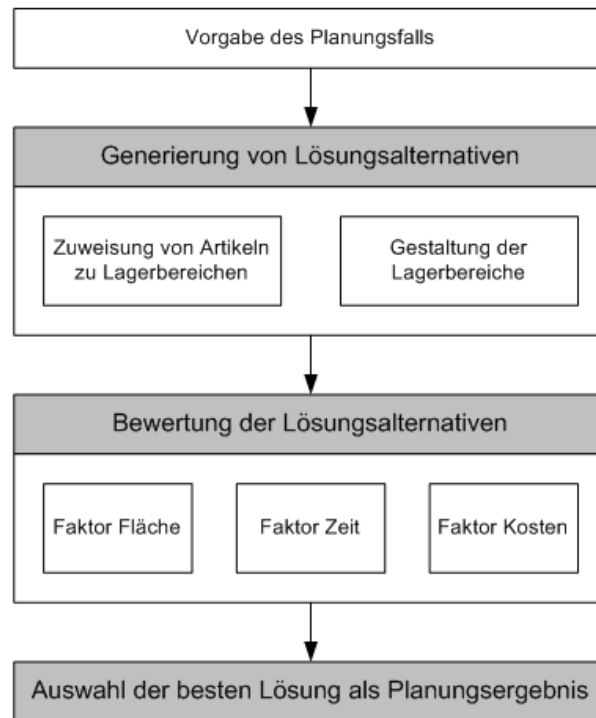


Abbildung 3-1: Grundlegender Ablauf der Planung

3.1 Generierung von Planungsalternativen

Die Generierung von Planungsalternativen dient allgemein dazu, Lösungen des Planungsproblems zu finden. Im mathematischen Sinn ist das gleichbedeutend damit, dass die Lösungsmenge ermittelt wird, die alle existierenden Planungsalternativen umfasst. Die Anzahl der insgesamt in der Lösungsmenge enthaltenen Planungsalternativen wird als deren *Mächtigkeit* M bezeichnet. Lässt sich das Planungsproblem mathematisch formulieren, so folgt die Mächtigkeit der Lösungsmenge aus den bestehenden Freiheitsgraden sowie den für die Freiheitsgrade zulässigen Ausprägungen. Sofern die Ausprägungen der Freiheitsgrade voneinander unabhängig gewählt werden können, ergibt sich die Mächtigkeit der Lösungsmenge aus dem Produkt der Anzahl an Ausprägungen jedes Freiheitsgrades:

$$M = \prod_i n_i \quad \text{für } \forall i \text{ Freiheitsgrade} \quad (3-1)$$

Sollen beispielsweise in einem existierenden Kommissioniersystem mit ein-/zweidimensionaler Bewegung die Bewegungsstrategie des Kommissionierers und die Belegungsstrategie festgelegt werden, besitzt das zugehörige Planungsproblem zwei Frei-

heitsgrade. Der Freiheitsgrad Bewegungsstrategie besitze die zwei möglichen Ausprägungen Stichgang- und Schleifenstrategie. Analog dazu besitze der Freiheitsgrad Belegungsstrategie die Ausprägungen feste Lagerordnung, freie Lagerordnung und Schnellläuferkonzentration. Die Mächtigkeit dieses Planungsproblems ergibt sich aus (3-1) zu:

$$M = n_{\text{Bewegungsstrat}} * n_{\text{Belegungsstrat}} = 2 * 3 = 6 \quad (3-2)$$

Formel (3-1) gilt jedoch nur, wenn die Ausprägungen der Freiheitsgrade frei miteinander kombinierbar sind. Ist das nicht erfüllt, gibt die Formel eine obere Schranke der Mächtigkeit an. Die tatsächliche Mächtigkeit liegt unter diesem Wert, da durch die eingeschränkte Kombinierbarkeit Lösungen entfallen.

Zusammenfassend lässt sich die Generierung von Planungsalternativen also als Variation der Ausprägungen der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade definieren. Teilweise ergeben sich die für einen Freiheitsgrad möglichen Ausprägungen aus im Vorfeld getroffenen Abgrenzungen der betrachteten Systeme, insbesondere für die betrachteten Konfigurationen (Kapitel 2.2) und Strategien (Kapitel 2.3). In vielen Fällen fließen jedoch auch die Eingangsdaten mit in die Ermittlung der Ausprägungen ein. Die Auswahl der Lagereinrichtung unterliegt beispielsweise den verwendeten Ladehilfsmitteln. So können Kleinladungsträger nicht in einem Palettenregal gelagert werden, weswegen in diesem Fall auf andere Ausprägungen der Lagereinrichtung zurückgegriffen werden muss. Weiterhin können bestimmte Ausprägungen von Freiheitsgraden bestimmte Ausprägungen anderer Freiheitsgrade nach sich ziehen, wie im Fall der Dimensionierung. Aus der Festlegung der Kapazität eines Lagerplatzes und den eingegebenen Artikeldaten resultiert die Anzahl an Lagerplätzen, die insgesamt im Lagerbereich vorhanden sein muss. Die Freiheitsgrade der Dimensionierung müssen nun so gewählt werden, dass mindestens die geforderte Anzahl an Lagerplätzen zur Verfügung steht.

Um die Vergleichbarkeit verschiedener generierter Planungsalternativen zu gewährleisten, werden folgende Festlegungen getroffen:

- Jede Planungsalternative stellt genügend Lagerplätze zur Verfügung, um das vorgegebene Sortiment einlagern zu können.
- Jede Planungsalternative stellt genügend Personal und Bediengeräte zur Verfügung, um die mit dem Sortiment vorgegebenen Bewegungen der Lagereinheiten durchführen zu können.

Im vorliegenden Fall besteht die Generierung einer Planungsalternative aus zwei Teilaufgaben. Zum einen müssen alle Artikel des einzulagernden Sortiments einem für sie geeigneten Lagerbereich zugewiesen werden. Je heterogener das Sortiment ist, je stärker sich also die Eigenschaften der Artikel voneinander unterscheiden, desto sinnvoller ist die Einrichtung unterschiedlicher Lagerbereiche im Lagersystem und desto mehr Potenzial steckt in der Zuweisung der Artikel zu dem jeweils am besten geeigneten Lagerbereich. Weiterhin müssen die verschiedenen Lagerbereiche ausgestaltet werden, indem die existierenden Freiheitsgrade der Konfiguration, Strategien und Dimensionierung festgelegt werden.

3.1.1 Zuweisung von Artikeln zu Lagerbereichen

Vor Ausgestaltung der Lagerbereiche (Kapitel 3.1.2) erfolgt die Zuweisung von n_{Art} Artikeln zu Lagerbereichen, welche gleichbedeutend mit der Gruppierung von Artikeln ist. Im Anschluss wird der Lagerbereich jeder dieser Gruppen ausgestaltet. Es gelten folgende Annahmen:

- Alle Artikel können innerhalb der Prozessvarianten Einheitenlagerung, Kommissionierung sowie Kommissionierung mit Nachschublagerung miteinander gruppiert werden.
- Jeder Artikel wird genau einer Gruppe zugeordnet.
- Die Anzahl an Artikeln in einer Gruppe ist beliebig. Sie liegt damit zwischen 1 und n_{Art} (bei n_{Art} Artikeln).

Zu untersuchen sind alle möglichen Kombinationen von N Artikeln. Auf Grund der separaten Betrachtung der drei Prozesse ergibt sich die Menge aller Kombinationen (n_K) durch Kombination aller Zuweisungen jedes der drei Prozesse:

$$n_K = n_{K,Einh} * n_{K,Komm} * n_{K,KoNa} \quad (3-3)$$

Die Berechnung der Anzahl an Zuweisungen ist für jeden Prozess identisch und soll am Beispiel der Einheitenlagerung ($n_{K,Einh}$ und $n_{Art,Einh}$ mit $n_{Art,Einh} > 0$) demonstriert werden. Die Anzahl an Artikeln in einer Gruppe liegt zwischen eins (d. h. jeder Artikel bildet eine Gruppe) und $n_{Art,Einh}$ (d. h. alle Artikel befinden sich in der selben Gruppe). Daraus folgt, dass die Anzahl an Gruppen und damit an Lagerbereichen ($n_{LB,Einh}$) für den Prozess Einheitenlagerung zwischen folgenden Schranken liegt:

$$1 \leq n_{LB,Einh} \leq n_{Art,Einh} \quad \forall n_{Art,Einh} > 0 \quad (3-4)$$

Die Berechnung der Anzahl an möglichen Gruppen basiert auf der Partitionsfunktion. Eine Partition der Zahl n ist definiert als die „Zerlegung von n in eine Summe von positiven natürlichen Zahlen“ [Zei-1996, S. 729]. Die Partitionsfunktion $P(n)$ gibt die Anzahl aller Partitionen der Zahl n an. Sie lässt sich beispielsweise rekursiv darstellen, wobei $P(n)$ mit zunehmendem n schnell ansteigt und für große n exponentiell wächst [Mat-2005, S. 369]. Die Zahl 5 besitzt beispielsweise 7 Partitionen (5, 1+4, 2+3, ...), die Zahl 10 bereits 42 (10, 9+1, 8+2, ...). Die Zahl der Partitionen gibt jedoch nur an, wie viele der $n_{Art,Einh}$ Artikel jedem Lagerbereich zugewiesen sind. Durch Anwendung des Binomialkoeffizienten auf jede Partition und anschließende Summenbildung lässt sich die Anzahl der möglichen Zuweisungen berechnen. In Tabelle 3-1 wird die Berechnung für $n_{Art,Einh} = 5$ beispielhaft durchgeführt ($n_{K,Einh} = 67$). Mit Formel (3-3) resultieren aus je 5 Artikeln für jeden der drei Prozesse bereits über 300.000 Kombinationsmöglichkeiten:

$$n_K = 67^3 = 300763 \quad (3-5)$$

Tabelle 3-1: Berechnung der Anzahl möglicher Zuweisungen bei $n_{Art,Einh} = 5$

Partition	Anzahl an Lagerbereichen	Anzahl an Zuweisungen für die Partition
5	1	$\binom{5}{5} = 1$
4+1	2	$\binom{5}{4} * \binom{5-4}{1} = 5$
3+2	2	$\binom{5}{3} * \binom{2}{2} = 10$
3+1+1	3	$\binom{5}{3} * \binom{2}{1} * \binom{1}{1} * 1/2! = 10$
2+2+1	3	$\binom{5}{2} * \binom{3}{2} * \binom{1}{1} = 30$
2+1+1+1	4	$\binom{5}{2} * \binom{3}{1} * \binom{2}{1} * \binom{1}{1} * 1/3! = 10$
1+1+1+1+1	5	$\binom{5}{1} * \binom{4}{1} * \binom{3}{1} * \binom{2}{1} * \binom{1}{1} * 1/5! = 1$
SUMME		67

Um die Zuweisung beispielsweise im Rahmen eines Optimierungsproblems beschreiben zu können, wird für jeden Artikel und jeden Lagerbereich eine binäre Variablen x_{ij} eingeführt:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{wenn Artikel } i \text{ in Lagerbereich } j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3-6)$$

Da n_{Art} Artikel maximal n_{Art} Lagerbereiche belegen, umfasst das Zuweisungsproblem insgesamt n_{Art}^2 Variablen.

3.1.2 Ausgestaltung der Lagerbereiche

Eine Planungsalternative wird durch ein Lager-/Kommissioniersystem gebildet, welches aus verschiedenen Lagerbereichen besteht. Bei gegebener bzw. zuvor festgelegter Zuweisung von Artikeln zu Lagerbereichen müssen diese Lagerbereiche passend ausgestaltet werden. Dabei sind die Freiheitsgrade der Konfiguration, Strategien und Dimensionierung wie in Kapitel 2.2, 2.3 und 2.4 beschrieben festzulegen. Da jeder Freiheitsgrad in der Regel mehrere zulässige Ausprägungen besitzt, entstehen durch deren Variation verschiedene alternative Lagerbereiche für die selbe Zuweisung.

Zwischen den beiden Teilaufgaben der Zuweisung von Artikeln zu Lagerbereichen und der Ausgestaltung dieser Lagerbereiche besteht eine gegenseitige Abhängigkeit. So können Artikel nur Lagerbereichen zugeordnet sein, mit denen sie kompatibel sind, also z. B. die Lagereinrichtung geeignet ist und die Lagerplätze groß genug sind. Umgekehrt können Lagerbereiche auch angepasst werden, um Kompatibilität mit weiteren Lagereinheiten zu erzeugen, die nun neben den bisherigen Artikeln ebenfalls eingelagert werden können. Bei der späteren Erarbeitung einer Planungsmethode ist diese gegenseitige Abhängigkeit zu berücksichtigen.

3.2 Bewertung der Planungsalternativen

Die Bewertung der generierten Planungsalternativen erfolgt mit Hilfe geeigneter Modelle, die in den folgenden Kapiteln entwickelt werden. Dabei muss gewährleistet sein, dass alle benötigten Zielgrößen ermittelt werden können. Um die Zielgrößen zu identifizieren und zu klassifizieren, werden folgende Schritte durchgeführt:

1. Sammlung von Zielgrößen

Basierend auf Expertengesprächen und ergänzt durch eine Analyse verschiedener Literaturquellen (siehe Kapitel 2.5.1) wird eine Sammlung von Größen

aus den Bereichen Fläche, Zeit und Kosten erstellt, die potenziell für die Planung relevant sind.

2. Identifikation der Beziehungstypen zwischen den Zielgrößen

Zwischen den gesammelten Größen können verschiedene Beziehungen bestehen, die die Verwendung als Zielgrößen in einer Planungsmethode beeinflussen. Ziele können voneinander unabhängig (Zielneutralität), positiv korreliert (Zielkomplementarität) oder gegensätzlich sein (Zielkonkurrenz) [Ada-1996, S. 107]. Diese Beziehungstypen zwischen den gesammelten Zielgrößen werden identifiziert.

3. Klassifizierung der Zielgrößen

Basierend auf den Beziehungen zwischen den Zielgrößen wird eine Klassifizierung in primäre und sekundäre Zielgrößen sowie ergänzende Größen vorgenommen. Die primären Zielgrößen bilden das Zielsystem und sind für die Entscheidung relevant. Sekundäre Zielgrößen sind zu den primären komplementär - je besser die primäre Zielgröße, desto besser auch die komplementäre sekundäre Zielgröße - und können deshalb für die Bildung des Zielsystems vernachlässigt werden. Als Zusatzinformation interessante, nicht entscheidungsrelevante Größen bilden die ergänzenden Größen.

4. Definition operationaler Ziele

Um verschiedene Planungsalternativen nachvollziehbar und vollständig ordnen zu können, ist eine sog. kardinale Messung an metrischen Skalen nötig. Monetär messbare Zielgrößen erfüllen diese Anforderung, da eine Messung in Geldeinheiten eine solche metrische Skala bildet und die Planungsalternativen eindeutig und vollständig nach aufsteigenden Kosten geordnet werden können. Die zuvor klassifizierten Zielgrößen werden daher im letzten Schritt in monetäre Zielgrößen überführt. [Ada-1996, S. 101]

Eine Übersicht über die so entwickelte Ordnung der Zielgrößen liefert Tabelle 3-2.

Tabelle 3-2: Strukturierung der Zielgrößen für das Projekt OptiMAL

	Fläche	Zeit	Kosten
Primär	Lagerfläche (operationalisiert: Laufende Flächenkosten)	Anzahl Bediengeräte (operationalisiert: Laufende Bediengerätekosten)	Laufende Gesamtkosten
	Lagerfüllgrad	Durchsatzreserve	L. K. für das Gebäude
Sekundär	Flächennutzungsgrad	Benötigtes Personal	L. K. für Lagereinrichtung
	Raumnutzungsgrad Flächenreserve	(operationalisiert: Laufende Personalkosten)	

4 Modell zur Bewertung der Geometrie

In diesem Kapitel wird das Modell zur Bewertung der Geometrie erarbeitet. Grundlage bildet die Anforderungsdefinition in Kapitel 4.1, die gleichzeitig das Modell in Beziehung zu den Eingangsdaten, Zielgrößen und den Modellen zur Bewertung von Leistung und Kosten setzt. Aus dem anschließend beschriebenen grundlegenden Aufbau des Modells (Kapitel 4.2) resultieren die weiteren Kapitel 4.3 bis 4.9, die Bezug zu einzelnen Elementen der Lagergeometrie nehmen.

4.1 Einordnung des Modells und Anforderungsdefinition

Das Modell zur Bewertung der Geometrie muss drei Aufgaben erfüllen:

- Eindeutige Beschreibung der Geometrie eines Lagerbereichs basierend auf einem kleinstmöglichen Set von Freiheitsgraden.
- Berechnung der Zielgrößen aus dem Bereich der Fläche.
- Berechnung weiterzugebender Größen, die von den Modellen zur Bewertung der Leistung und Kosten benötigt werden.

Betrachtet man das Modell vorerst als Blackbox, so ergibt sich das in Abbildung 4-1 dargestellte Bild. Aus Eingabedaten des Benutzers und Freiheitsgraden der Konfiguration, Strategien und Dimensionierung werden Größen berechnet, die entweder direkt Zielgrößen darstellen oder aber für die Bewertung der Faktoren Zeit und Kosten benötigt werden. Die Systemgrenze des Modells werden wie folgt festgelegt:

- Es werden jeweils Lagerbereiche mit rechteckiger Form beschrieben.
- Es handelt sich um eingeschossige Gebäude.
- Die möglichen Lagereinrichtungen umfassen die Varianten Bodenblock- und Bodenzeilenlagerung, Palettenregal, Fachbodenregal, Einfahrregal, Durchfahrregal, Einschubregal und Durchlaufregal.
- Die Höhe des Lagerbereichs kann durch eine vorgegebene maximale Höhe eingeschränkt sein.
- Berücksichtigte Flächen umfassen Lagergassen, Verkehrsgänge und Stellflächen der Lagereinrichtung. Weitere Flächen wie Abstellflächen für Bediengeräte, Büro- oder Sozialräume werden nicht berücksichtigt.

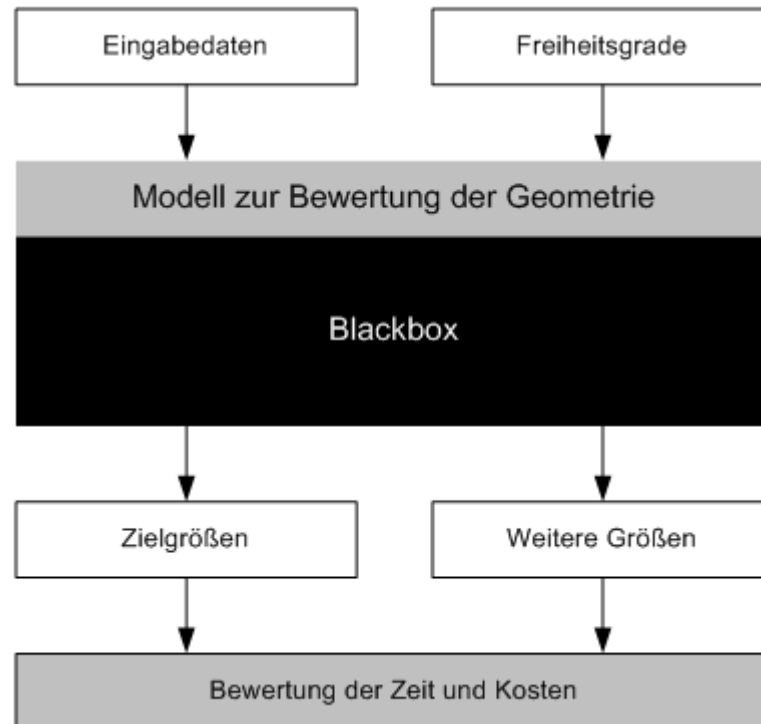


Abbildung 4-1: Einordnung des Modells zur Bewertung der Geometrie (als Blackbox dargestellt)

4.2 Grundlegender Aufbau des Modells

Das von *Gudehus* vorgestellte Modell zur statischen Dimensionierung dient als Grundlage für das im Rahmen des Projekts OptiMAL erstellte und verwendete Bewertungsmodell. Es orientiert sich am physischen Aufbau der Lagereinrichtung. Abhängig von der Lagereinrichtung wird ein Lagerplatz definiert, der aus Stellplätzen als kleinster Einheit des Layouts besteht. Schrittweise werden dann aufeinander aufbauende Module zusammengesetzt: das Fachmodul (auch Regalfeld) besteht aus neben- und übereinander angeordneten Lagerplätzen und bildet seinerseits das Grundelement zur Erzeugung von Gangmodulen. Zuletzt werden mehrere Gangmodule zu einem Lagermodul kombiniert. [Gud-2010, S. 627ff.]

Als Grundlage für den Aufbau des Modells werden die betrachteten Lagereinrichtungsvarianten in einen morphologischen Kasten eingeordnet, der für jedes der Module (Lagerplatz, Fachmodul, Gangmodul, Lagermodul) gegebenenfalls verschiedene Ausprägungsformen enthält (Abbildung 4-2). [Sta-2015]

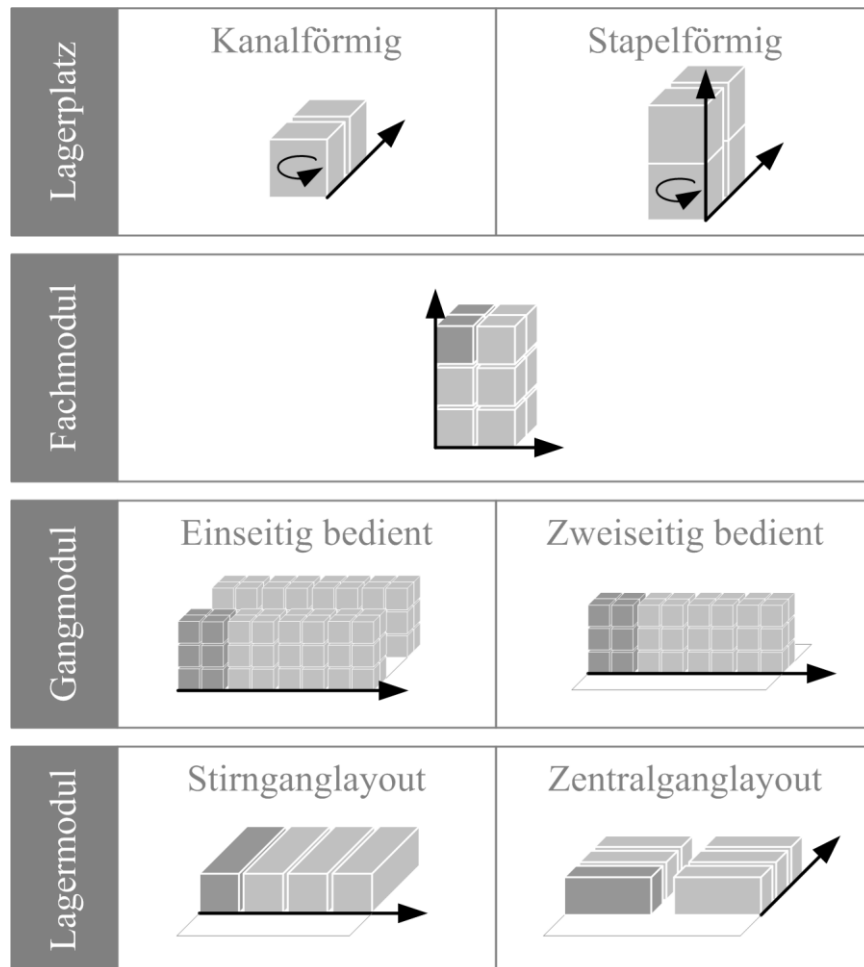


Abbildung 4-2: Morphologischer Kasten der Module zur Modellierung der Geometrie

Der morphologische Kasten lässt sich zugleich als bottom-up-Vorgehensweise zur Erstellung eines Layouts interpretieren. Beginnend mit dem Lagerplatz bis hin zum Lagermodul werden nacheinander die bestehenden Freiheitsgrade festgelegt und anschließend die daraus resultierenden Abmessungen in den drei Raumrichtungen sowie die Fläche und das eingenommene Volumen berechnet. Die Erzeugung und anschließende Bewertung des Layouts hängen dadurch eng zusammen und werden in den folgenden Kapiteln 4.3 bis 4.7 detailliert beschrieben. Als zusätzlicher Zwischenschritt muss nach Berechnung des Lagerplatzes und der damit verbundenen Festlegung der Lagerplatzkapazität die insgesamt im Lagerbereich benötigte Anzahl an Lagerplätzen berechnet werden (Kapitel 4.4). Auf diese Weise wird bei der Festlegung der Fach-, Gang- und Lagermodule gewährleistet, dass der Lagerbereich der Vorgabe genügt, alle einzulagernden Artikel aufnehmen zu können. Es lässt sich zeigen, dass sich aus den beschriebenen Modulen auch Lagerbereiche aufbauen lassen, die eine Kommissionierung und gleichzeitige Lagerung der Nachschubeinheiten ermöglichen und daher aus einer Kombination unterschiedlicher Lagereinrichtungen bestehen (Kapitel 4.8).

Das verwendete Koordinatensystem zeigt Abbildung 4-3. Der Ursprung befindet sich am Gassenanfang auf Bodenhöhe. Die x-Koordinate entspricht der Gassenlängsrichtung. Die z-Koordinate liegt in der Bodenebene senkrecht dazu. Dementsprechend zeigt die y-Koordinate die Höhe an. *Gudehus* folgend werden Strecken/Abmessungen in x-Richtung als Länge, solche in y-Richtung als Höhe und solche in z-Richtung als Breite bezeichnet.

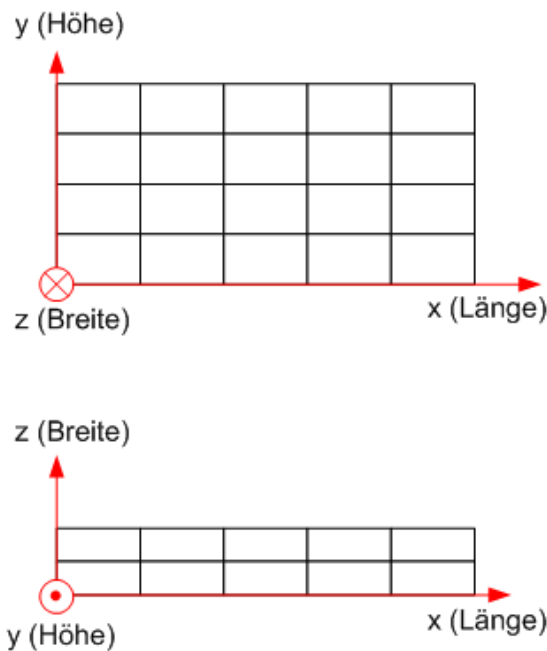


Abbildung 4-3: Verwendetes Koordinatensystem (Seitenansicht der Lagergasse oben, Draufsicht unten)

4.3 Berechnung des Lagerplatzes

Der Stellplatz ist die kleinste Einheit beim Aufbau eines Lagermoduls und definiert als der Bereich, der genau eine Lagereinheit aufnehmen kann. Sollen Stellplätze mit unterschiedlichen Lagereinheiten belegt werden können, müssen die effektiven Abmessungen der einzulagernden Artikel als Grundlage herangezogen werden. Diese berechnen sich unter der Annahme, dass ein etwaiger Überstand der Artikel auf dem Ladehilfsmittel bereits in den Abmessungen l , b und h der Lagereinheit enthalten ist, wie folgt:

$$l_{LE,eff} = \max(l_{LE,1}, l_{LE,2}, \dots, l_{LE,i}) \text{ mit } i \text{ Lagereinheiten} \quad (4-1)$$

$$b_{LE,eff} = \max(b_{LE,1}, b_{LE,2}, \dots, b_{LE,i}) \text{ mit } i \text{ Lagereinheiten} \quad (4-2)$$

$$h_{LE,eff} = \max(h_{LE,1}, h_{LE,2}, \dots, h_{LE,i}) \text{ mit } i \text{ Lagereinheiten} \quad (4-3)$$

Mehrere Stellplätze können auf zwei Arten zu *Lagerplätzen* angeordnet werden: kanalförmige Lagerplätze kennzeichnet eine eindimensionale Anordnung von Stellplätzen hintereinander, während für stapelförmige Lagerplätze eine zweidimensionale Anordnung hinter- und übereinander gewählt wird.

4.3.1 Kanalförmiger Lagerplatz

In einem kanalförmigen Lagerplatz sind mehrere Stellplätze hintereinander angeordnet (Abbildung 4-4 links). Der Lagerplatz ist durch die Festlegung der zwei Konfigurations-Freiheitsgrade Lagerplatztiefe ($n_{SP,z}$) und Einlagerichtung vollständig definiert.

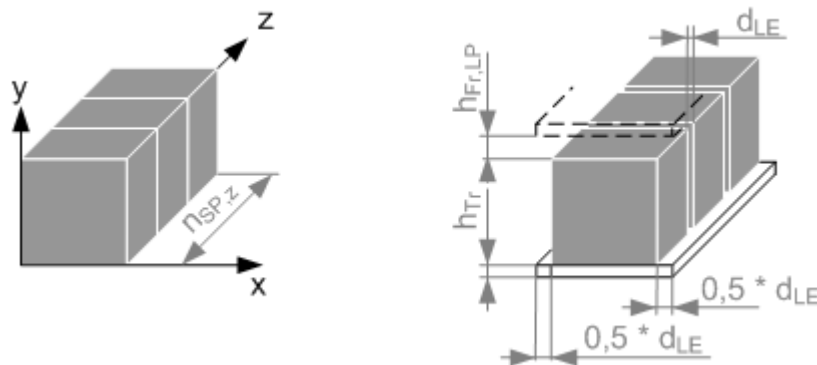


Abbildung 4-4: Schemazeichnung und Skizze des kanalförmigen Lagerplatzes

Die Kapazität ergibt sich daraus zu

$$K_{LP} = n_{SP,z} \quad (4-4)$$

Mit Kenntnis der effektiven Abmessungen der Lagereinheiten sowie der Größen Freimaß im Lagerplatz ($h_{Fr,LP}$), Traversenhöhe (h_{Tr}) und Abstand zwischen Lagereinheiten (d_{LE}) ergeben sich die Abmessungen, Fläche und Volumen wie folgt (vgl. auch Abbildung 4-4 rechts):

$$l_{LE} = \begin{cases} l_{LE,eff} & \text{bei Quereinlagerung} \\ b_{LE,eff} & \text{bei Längseinlagerung} \end{cases} \quad (4-5)$$

$$b_{LE} = \begin{cases} b_{LE,eff} & \text{bei Quereinlagerung} \\ l_{LE,eff} & \text{bei Längseinlagerung} \end{cases} \quad (4-6)$$

$$l_{LP} = l_{LE} + d_{LE} \quad (4-7)$$

$$b_{LP} = n_{SP,z} * b_{LE} + (n_{SP,z} - 1) * d_{LE} \quad (4-8)$$

$$h_{LP} = h_{LE,eff} + h_{Fr,LP} + h_{Tr} \quad (4-9)$$

$$A_{LP} = l_{LP} * b_{LP} \quad (4-10)$$

$$V_{LP} = A_{LP} * h_{LP} \quad (4-11)$$

Diese Grundformeln müssen je nach Lagereinrichtung noch angepasst werden, um technisch mögliche und sinnvolle Lösungen zu erzeugen. Tabelle 4-1 enthält alle Lagereinrichtungen mit kanalförmigem Lagerplatz sowie die eventuell nötigen Restriktionen und Anpassungen der obigen Grundformeln. Entgegen einiger Definitionen in der Literatur wird das Bodenzeilenlager im Rahmen des Projekts OptiMAL ausschließlich für die Kommissionierung verwendet und stellt den Sonderfall eines einfachtiefen, ebenerdigen Lagerplatzes dar. Die häufig ebenfalls als Bodenzeilenlager bezeichneten einfachtiefen Stapel von Lagereinheiten (vgl. z. B. [Gün-2015b, S. 4-16]) stellen den Sonderfall des Bodenblocklagers mit einer Lagerplatztiefe von 1 dar und werden im Rahmen des Projekts diesem zugeordnet.

Tabelle 4-1: Restriktionen zur Anpassung des kanalförmigen Lagerplatzes an die Lagereinrichtung

Lagereinrichtung	Restriktion	Bedeutung
Palettenregal	$n_{SP,z} = 1$	Lagerplätze sind einfachtief
Fachbodenregal		
Einschubregal	$d_{LE} = 0$ in (4-8)	Lagereinheiten laufen aufeinander auf, sodass in z-Richtung kein Abstand existiert
Durchlaufregal		
Bodenzeilenlager	$n_{SP,z} = 1$ $h_{Tr} = 0$	Lagerplätze sind einfachtief Es existiert kein Regal

4.3.2 Stapelförmiger Lagerplatz

In einem stapelförmigen Lagerplatz sind die Artikel gestapelt und in einem bis mehreren Stapeln hintereinander angeordnet (Abbildung 4-5). Im Gegensatz zu übereinander angeordneten kanalförmigen Lagerplätzen ist bei Lagereinrichtungsvarianten mit stapelförmigen Lagerplätzen keine unabhängige Auslagerung übereinander angeord-

meter Lagereinheiten möglich. Der Lagerplatz ist durch Festlegung der drei Freiheitsgrade Stapelhöhe ($n_{SP,y}$), Lagerplatztiefe ($n_{SP,z}$) und Einlagerungsrichtung vollständig definiert.

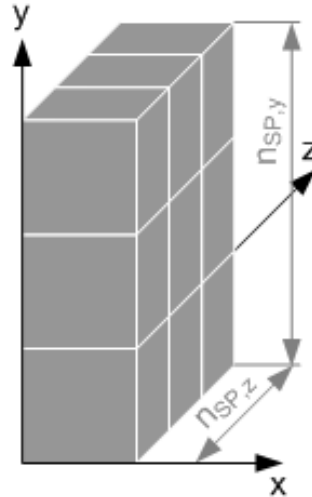


Abbildung 4-5: Schemazeichnung des stapelförmigen Lagerplatzes

Die Kapazität ergibt sich daraus zu

$$K_{LP} = n_{SP,z} * n_{SP,y} \quad (4-12)$$

Mit Kenntnis der effektiven Abmessungen der Lagereinheit sowie der Größen Freimaß im Lagerplatz ($h_{Fr,LP}$), Traversenhöhe (h_{Tr}), Steherlänge (l_{St}) und Abstand zwischen Lagereinheiten (d_{LE}) (vgl. Abbildung 4-4) ergeben sich die Abmessungen, Fläche und Volumen wie folgt (Längseinlagerung und Quereinlagerung wie in (4-5) und (4-6):

$$l_{LP} = l_{LE} + d_{LE} \quad (4-13)$$

$$b_{LP} = n_{SP,z} * b_{LE} + (n_{SP,z} - 1) * d_{LE} \quad (4-14)$$

$$h_{LP} = n_{SP,y} * (h_{LE,eff} + h_{Fr,LP} + h_{Tr}) \quad (4-15)$$

$$A_{LP} = l_{LP} * b_{LP} \quad (4-16)$$

$$V_{LP} = A_{LP} * h_{LP} \quad (4-17)$$

Diese Grundformeln müssen je nach Lagereinrichtung noch angepasst werden, um technisch mögliche und sinnvolle Lösungen zu erzeugen. Tabelle 4-2 enthält alle Lagereinrichtungen mit stapelförmigem Lagerplatz sowie die eventuell nötigen Restriktionen und Anpassungen der obigen Grundformeln. Abbildung 4-6 ergänzt die Restriktion für Einfahr- und Durchfahrregale: das Bediengerät muss in den Lagerplatz einfahren können. Seine Breite (b_{Bed}) muss daher geringer sein als der zwischen den beiden Traversen mit der Länge l_{Tr} verbleibende Platz.

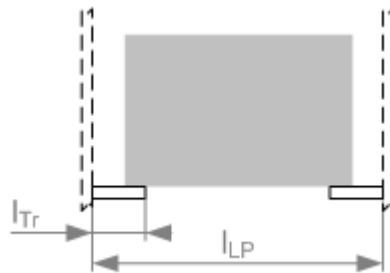


Abbildung 4-6: Skizze des Lagerplatzes bei Einfahr- und Durchfahrregalen

Tabelle 4-2: Restriktionen zur Anpassung des stapelförmigen Lagerplatzes an die Lagereinrichtung

Lagereinrichtung	Restriktion	Bedeutung
Bodenblocklager	$h_{Tr} = 0$	Es existiert keine Regaltechnik
	$h_{Fr,LP} = 0$	Es existiert keine Regaltechnik
	$n_{SP,y} \leq n_{SP,y,tech}$	Die Stapelhöhe ist durch die max. Stapelbarkeit der Lagereinheiten limitiert
Einfahrregal Durchfahrregal	$l_{LP} - 2 * l_{Tr} > b_{Bed}$	Das Bediengerät muss in den Lagerplatz einfahren können

4.4 Berechnung der Anzahl benötigter Lagerplätze

Die Anzahl an Lagerplätzen eines Lagerbereichs ist abhängig von der Konfiguration und Dimensionierung sowie vom Bestandsverlauf der Artikel. Der von *Gudehus* vorgestellt analytische Ansatz zur Berechnung der benötigten Anzahl an Lagerplätzen legt einen sägezahnförmigen Bestandsverlauf zugrunde, der für die dispositive Lagerung typisch ist (Abbildung 4-7). Ausgehend von einem Maximalbestand ($M_{B,Max}$) zum Anlieferzeitpunkt erfolgt ein linearer Abgang über den Anlieferzyklus (t_{Anl}), bis der Sicherheitsbestand ($M_{B,s}$) erreicht wird. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt die Einlagerung von Nachschub, sodass der Bestand wieder auf den Maximalwert aufgefüllt wird. Die Berechnung des Lagerplatzbedarfs basierend auf diesem Bestandsverlauf erfolgt durch

Betrachtung des anteiligen Platzverlusts für jeden Artikel. Da der Rest der Ganzzahl-division von Bestand und Lagerplatzkapazität gleichverteilt zwischen den Werten eins und der Lagerplatzkapazität liegt, ist ein Lagerplatz nur zum Teil nutzbar. Einzige Ausnahme ist der Fall, dass der Bestand ein ganzzahliges Vielfaches der Lagerplatzkapazität ist. Durch Verwendung des Maximalbestands ($M_{B,Max}$) oder mittleren Bestands (M_B) können sowohl feste als auch freie Lagerordnung modelliert werden. [Gud-2010, S. 601ff.]

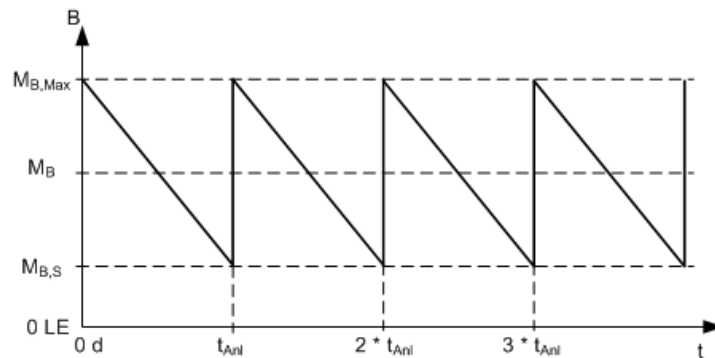


Abbildung 4-7: Sägezahnförmiger Bestandsverlauf

Die Einlagerstrategie dagegen wird von Gudehus nicht berücksichtigt. Der für jeden Artikel eingerechnete Leerplatzverlust von einem Stellplatz entspricht jedoch der platzorientierten Einlagerung. Das Modell lässt sich um die prozessorientierte Einlagerstrategie erweitern, indem der anteilige Platzverlust sowohl für den Sicherheitsbestand als auch für den Losbestand mit einbezogen wird. Durch Summierung über i Artikel berechnet sich die Anzahl an Lagerplätzen ($n_{LP,Soll}$) aus dem Lagerplatzbedarf je Artikel $n_{LP,Soll,i}$ mit Tabelle 4-3. [Sta-2015]

$$n_{LP,Soll} = \sum_i n_{LP,Soll,i} \quad (4-18)$$

Tabelle 4-3: Berechnung des Lagerplatzbedarfs je Artikel nach [Sta-2015]

Strategie	Lagerplatzbedarf je Artikel $n_{LP,Soll,i}$
Platzorientiert, frei	$\max\left(1; \frac{M_B}{K_{LP}} + \frac{(K_{LP} - 1)}{K_{LP}}\right)$
Platzorientiert, fest	$\max\left(1; \frac{M_{BMax}}{K_{LP}} + \frac{(K_{LP} - 1)}{K_{LP}}\right)$
Prozessorientiert, frei	$\max\left(1; \frac{M_B}{K_{LP}} + \frac{(K_{LP} - 1)}{K_{LP}}\right)$
Prozessorientiert, fest	$\max\left(1; \frac{M_{BMax}}{K_{LP}} + \frac{(K_{LP} - 1)}{K_{LP}}\right)$

Bevor mit der Berechnung von Fachmodul, Gangmodul und des Lagermodul fortgefahren werden kann, muss die Anzahl benötigter Lagerplätze nach (4-18) bekannt sein. Durch einen Vergleich der Kapazität des jeweiligen Moduls mit dem Produkt aus Lagerplatzkapazität und Solllagerplatzzahl kann in den folgenden Schritten geprüft werden, ob das Lagermodul groß genug dimensioniert ist und gleichzeitig keine Überkapazitäten aufweist.

4.5 Berechnung des Fachmoduls

Das Fachmodul fasst mehrere Lagerplätze unabhängig von deren Ausprägung zusammen. Bei der Festlegung des Fachmoduls existieren zwei Freiheitsgrade: entlang der Gasse (x-Richtung) werden so viele Lagerplätze nebeneinander angeordnet, wie zwischen zwei Stehern Platz finden [Gud-2010, S. 617f.]. Mehrere derartige Ebenen werden übereinander gesetzt (Abbildung 4-8 links).

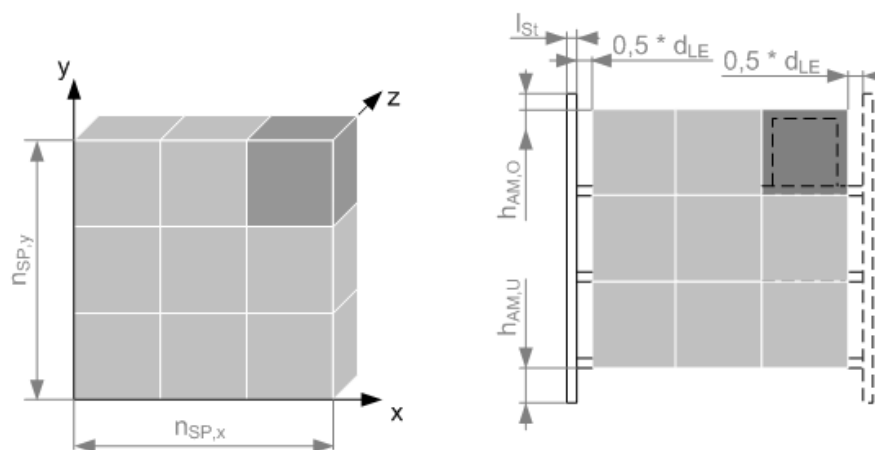


Abbildung 4-8: Schemazeichnung und Skizze des Fachmoduls; Lagerplatz als Grundelement dunkelgrau dargestellt

Die Kapazität ergibt sich unter Einsetzen von K_{LP} nach (4-4) bzw. (4-12) zu

$$K_{FM} = n_{LP,x} * n_{LP,y} * K_{LP} \quad (4-19)$$

Mit Kenntnis der Größen Steherlänge (l_{St}), Abstand zwischen Lagereinheiten (d_{LE}) sowie oberem und unterem Anfahrmaß ($h_{AM,U}$, $h_{AM,O}$) der Bedientechnik lassen sich die Abmessungen berechnen (Abbildung 4-8 rechts). Da in der Lagergasse mehrere Fachmodule nebeneinander angeordnet werden und den dazwischen befindlichen Steher gemeinsam nutzen, wird für jedes Fachmodul einseitig ein Steher berücksichtigt. Der darüber hinaus an einer Seite der Gasse fehlende Steher wird in der Länge des Gangmoduls berücksichtigt.

$$l_{FM} = n_{LP,x} * l_{LP} + d_{LE} + l_{St} \quad (4-20)$$

$$b_{FM} = b_{LP} \quad (4-21)$$

$$h_{FM} = n_{LP,y} * h_{LP} + h_{AM,U} + h_{AM,O} \quad (4-22)$$

$$A_{FM} = l_{FM} * b_{FM} \quad (4-23)$$

$$V_{FM} = A_{FM} * h_{FM} \quad (4-24)$$

Die Fachmodulhöhe ist gleichbedeutend mit der Höhe des gesamten Lagerbereichs, da in den folgenden Schritten Gangmodul und Lagermodul keine weiteren Maße in y-Richtung berücksichtigt werden müssen. Es kann also auf Ebene des Fachmoduls geprüft werden, ob eine eventuelle Begrenzung der Höhe durch das Gebäude oder die verwendeten Bediengeräte besteht. Es muss gelten:

$$h_{FM} \leq \text{Min}(h_{Geb}; h_{Bed}) \quad (4-25)$$

Sofern diese Bedingung nicht erfüllt ist, muss bei kanalförmigen Lagerplätzen die Ebenenzahl $n_{FM,y}$ gesenkt werden, bei stapelförmigen Lagerplätzen dagegen die Stapelhöhe $n_{LP,y}$. Darüber hinaus lässt sich die Obergrenze aus (4-25) in diesem Fall durch Einsetzen in (4-22) oder (4-15) zur Berechnung der maximal möglichen Ebenenzahl/Stapelhöhe nutzen.

Abhängig von der Lagereinrichtung müssen die Grundformeln (4-20) bis (4-24) angepasst werden. Die entsprechenden Restriktionen sind in Tabelle 4-4 zusammengefasst.

Tabelle 4-4: Restriktionen zur Anpassung des Fachmoduls an die Lagereinrichtung

Lagereinrichtung	Restriktion	Bedeutung
Bodenblocklager	$n_{LP,x} = 1$	Fachmodul entspricht einem Lagerplatz
	$n_{LP,y} = 1$	Fachmodul entspricht einem Lagerplatz
	$l_{St} = 0$	Es existiert keine Regaltechnik
Einfahrregal	$n_{LP,x} = 1$	Fachmodul entspricht einem Lagerplatz
Durchfahrregal	$n_{LP,y} = 1$	Fachmodul entspricht einem Lagerplatz

4.6 Berechnung des Gangmoduls

Um Gangmodule zu erhalten, werden Fachmodule nebeneinander angeordnet. Im Gegensatz zu dem zu Grunde liegenden Modell von *Gudehus* werden jedoch keine Fachmodule übereinander angeordnet. Der Freiheitsgrad der Ebenenzahl ist in das Fachmodul vorgezogen, welches dadurch einen Regalabschnitt darstellt, der durch Regalsteher, Boden und Decke begrenzt wird. Je nach Ausprägung des Gangmoduls werden entweder Fachmodule zu beiden Seiten eines Ganges (einseitig bediente Lagereinrichtung) oder zwei Gänge zu beiden Seiten der Fachmodule (beidseitig bediente Lagereinrichtung) angeordnet. [Gud-2010, S. 618f.]

4.6.1 Einseitig bediente Lagereinrichtung

Bei einseitig bedienter Lagereinrichtung erfolgen Entnahme und Einlagerung nicht räumlich getrennt. Dadurch lassen sich entlang eines Ganges zu beiden Seiten Fachmodule anordnen, wobei als einziger Freiheitsgrad die Gassenlänge ($n_{FM,x}$) besteht (Abbildung 4-9).

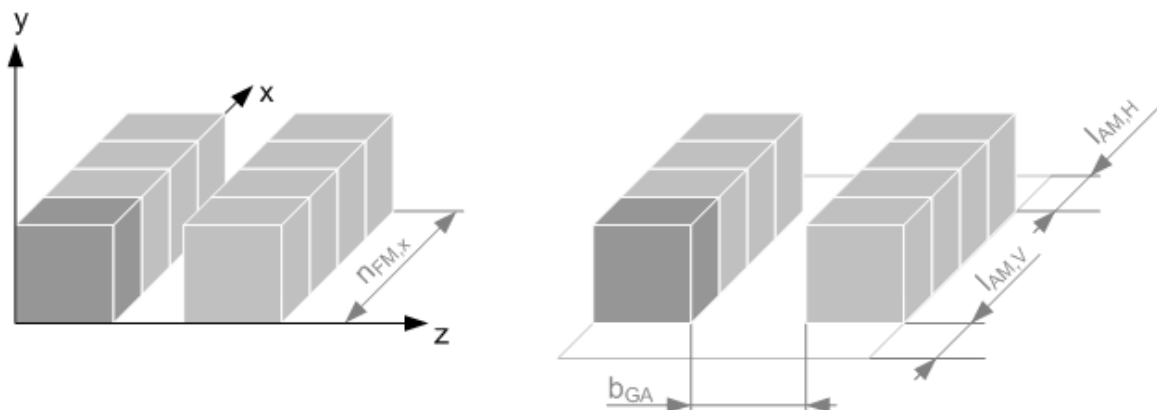


Abbildung 4-9: Schemazeichnung und Skizze des einseitig bedienten Gangmoduls; Fachmodul als Grundelement dunkelgrau dargestellt

Die Kapazität berechnet sich zu

$$K_{GM} = 2 * n_{FM,x} * K_{FM} \quad (4-26)$$

Mit Kenntnis der Größen Gangbreite (b_{GA}) sowie vorderem und hinterem Anfahrmaß ($l_{AM,V}$, $l_{AM,H}$) der Bedientechnik lassen sich die Abmessungen berechnen (in Anlehnung an [Gud-2010, S. 618f.]). Da die Fachmodule nebeneinander angeordnet werden und jeweils nur einseitig einen Steher besitzen, muss der an einem Ende der Gasse noch fehlende Steher einberechnet werden.

$$l_{GM} = n_{FM,x} * l_{FM} + l_{St} + l_{AM,V} + l_{AM,H} \quad (4-27)$$

$$b_{GM} = 2 * b_{FM} + b_{Ga} \quad (4-28)$$

$$h_{GM} = h_{FM} \quad (4-29)$$

$$A_{GM} = l_{GM} * b_{GM} \quad (4-30)$$

$$V_{GM} = A_{GM} * h_{GM} \quad (4-31)$$

Lediglich für Bodenblock- und Bodenzeilenlager sind Restriktionen bei der Übertragung der Grundformeln (4-27) bis (4-31) auf die einzelnen Lagereinrichtungsvarianten nötig (Tabelle 4-5).

Tabelle 4-5: Restriktionen zur Anpassung des einseitig bedienten Gangmoduls an die Lagereinrichtung

Lagereinrichtung	Restriktion	Bedeutung
Bodenblocklager	$l_{St} = 0$	Es existiert keine Regaltechnik
Bodenzeilenlager	$l_{St} = 0$	Es existiert keine Regaltechnik

4.6.2 Beidseitig bediente Lagereinrichtung

Wenn Ein- und Auslagerung räumlich getrennt erfolgen sollen, wird auf jeder Seite der Fachmodule ein Lagergang (Einlager-/Auslagergang) angeordnet (Abbildung 4-10), wobei wie bei einseitig bedienter Lagereinrichtung der einzige Freiheitsgrad die Gasenlänge ($n_{FM,x}$) darstellt.

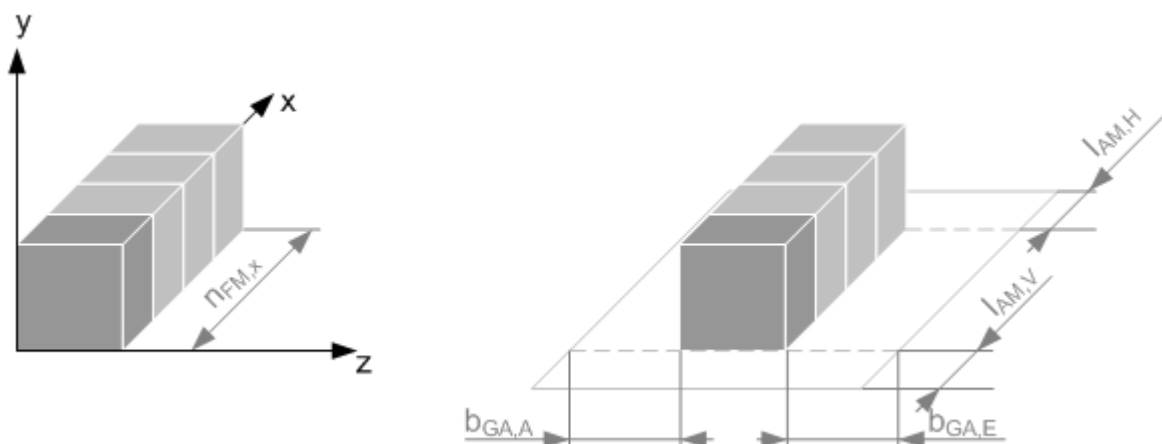


Abbildung 4-10: Schemazeichnung und Skizze des beidseitig bedienten Gangmoduls; Fachmodul als Grundelement dunkelgrau dargestellt

Die Kapazität berechnet sich zu

$$K_{GM} = n_{FM,x} * K_{FM} \quad (4-32)$$

Mit den Größen vorderes und hinteres Anfahrmaß ($l_{AM,V}$, $l_{AM,h}$), Ein- und Auslagergangbreite ($b_{Ga,E}$, $b_{Ga,A}$) sowie der Steherlänge (l_{St}) lassen sich die Abmessungen berechnen (in Anlehnung an [Gud-2010, S. 618f.]):

$$l_{GM} = n_{FM,x} * l_{FM} + l_{St} + l_{AM,V} + l_{AM,H} \quad (4-33)$$

$$b_{GM} = b_{FM} + b_{Ga,E} + b_{Ga,A} \quad (4-34)$$

$$h_{GM} = h_{FM} \quad (4-35)$$

$$A_{GM} = l_{GM} * b_{GM} \quad (4-36)$$

$$V_{GM} = A_{GM} * h_{GM} \quad (4-37)$$

4.7 Berechnung des Lagermoduls

Der letzte Schritt beim Aufbau des Layouts besteht in der Anordnung der Gangmodule zu einem Lagermodul, wobei im Rahmen des Projekts OptiMAL zwei Anordnungsvarianten (Stirngang- und Zentralganglayout) untersucht werden. Das Lagermodul entspricht einem Lagerbereich.

4.7.1 Berechnung bei Anordnung als Stirnganglayout

Gemäß Kapitel 2.2.1 werden im Stirngang alle Gangmodule parallel angeordnet und an der Stirnseite durch einen Verkehrsgang verbunden, der die Beförderung von Lagereinheiten zwischen der Basis und den Lagergängen ermöglicht (Abbildung 4-11) [Gud-2010, S. 619]. Neben der Layoutgrundform bildet die Festlegung der Gassenzahl ($n_{GM,z}$) einen weiteren Freiheitsgrad.

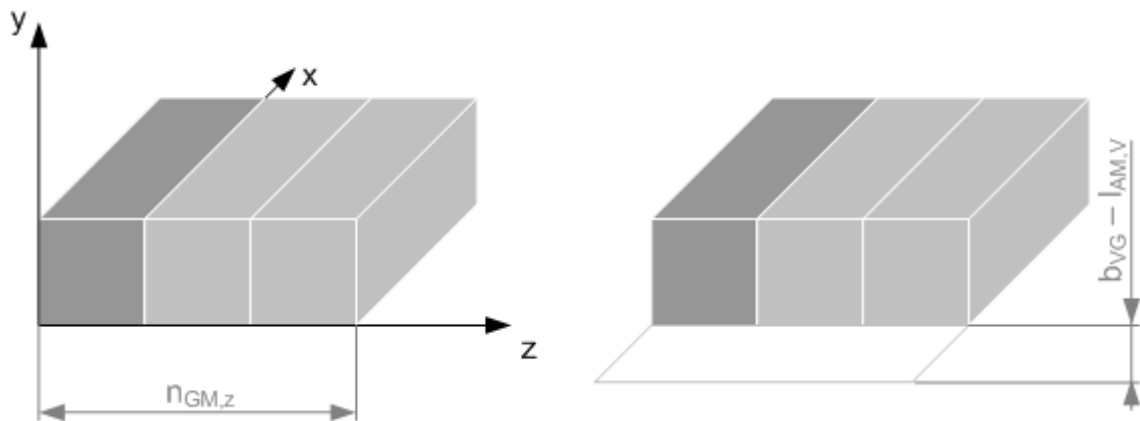


Abbildung 4-11: Schemazeichnung und Skizze des Lagermoduls mit Stiringanglayout; Gangmodul als Grundelement dunkelgrau dargestellt

Die Kapazität ergibt sich damit zu

$$K_{LM} = n_{GM,z} * K_{GM} \quad (4-38)$$

Mit Kenntnis der Verkehrs-gangbreite (b_{VG}) ergeben sich die Abmessungen des Lagermoduls wie folgt (in Anlehnung an [Gud-2010, S. 619]). Dabei wird angenommen, dass die Verkehrs-gangbreite größer als das eventuell für die Bedientechnik benötigte vordere Anfahrmaß ausfällt.

$$l_{LM} = l_{GM} + (b_{VG} - l_{AM,V}) \quad (4-39)$$

$$b_{LM} = n_{GM,z} * b_{GM} \quad (4-40)$$

$$h_{LM} = h_{GM} \quad (4-41)$$

$$A_{LM} = l_{LM} * b_{LM} \quad (4-42)$$

$$V_{LM} = A_{LM} * h_{LM} \quad (4-43)$$

4.7.2 Berechnung bei Anordnung als Zentralganglayout

Das Zentralganglayout besteht aus zwei Blöcken parallel angeordneter Gangmodule, die im rechten Winkel zu einem dazwischen liegenden Verkehrs-gang angeordnet werden (Kapitel 2.2.1, Abbildung 4-12). Auch beim Zentralganglayout besteht als einziger Freiheitsgrad die Gangzahl ($n_{GM,z}$).

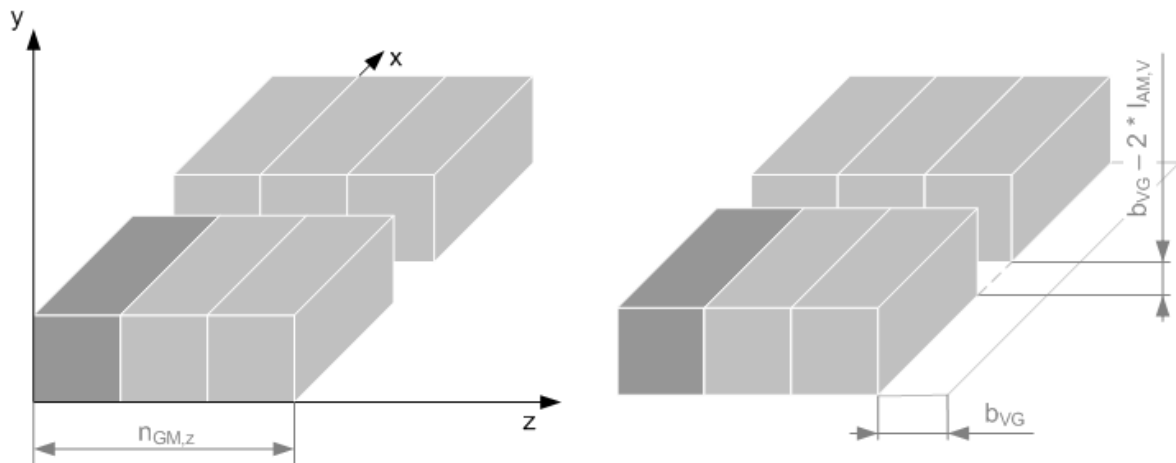


Abbildung 4-12: Schemazeichnung und Skizze des Lagermoduls mit Zentralganglayout; Gangmodul als Grundelement dunkelgrau dargestellt

Die Kapazität eines Lagermoduls mit Zentralganglayout ergibt sich also zu

$$K_{LM} = 2 * n_{GM,z} * K_{GM} \quad (4-44)$$

Die Abmessungen folgen daraus mit Kenntnis der Verkehrs-gangbreite (b_{VG}) (in Anlehnung an [Gud-2010, S. 619]) zu

$$l_{LM} = 2 * l_{GM} + (b_{VG} - 2l_{AM,V}) \quad (4-45)$$

$$b_{LM} = n_{GM,z} * b_{GM} + b_{VG} \quad (4-46)$$

$$h_{LM} = h_{GM} \quad (4-47)$$

$$A_{LM} = l_{LM} * b_{LM} \quad (4-48)$$

$$V_{LM} = A_{LM} * h_{LM} \quad (4-49)$$

4.8 Erweiterung um die Kombination von Kommissionier- und Nachschubbereich

Die bisherigen Ausführungen ermöglichen den Aufbau von Lagerbereichen aus einheitlichen Lagerplätzen, von *Arnold und Furmans* als homogenes Lager bezeichnet

[Arn-2009, S. 176f.]. In manuell bedienten Lagerbereichen finden sich jedoch häufig Speziallösungen wie die Anordnung eines Kommissionierbereichs auf mehreren Bühnen übereinander zur Ausnutzung der Gebäudehöhe, die Verwendung unterschiedlich hoher Lagerplätze oder die Kombination von Kommissionierung und Lagerung der Nachschubeinheiten in einem Lagerbereich (Abbildung 4-13). Letztere Speziallösung wird in Zusammenarbeit mit dem Projektbegleitenden Ausschuss als besonders wichtig identifiziert und daher aufbauend auf den Grundformeln aus Kapitel 4.3 bis 4.7 umgesetzt. Gleichzeitig dient die Umsetzung dieser Speziallösung mit Hilfe der bereits bekannten Module als Beispiel für die Erweiterbarkeit des entwickelten Modells zur Bewertung der Geometrie.

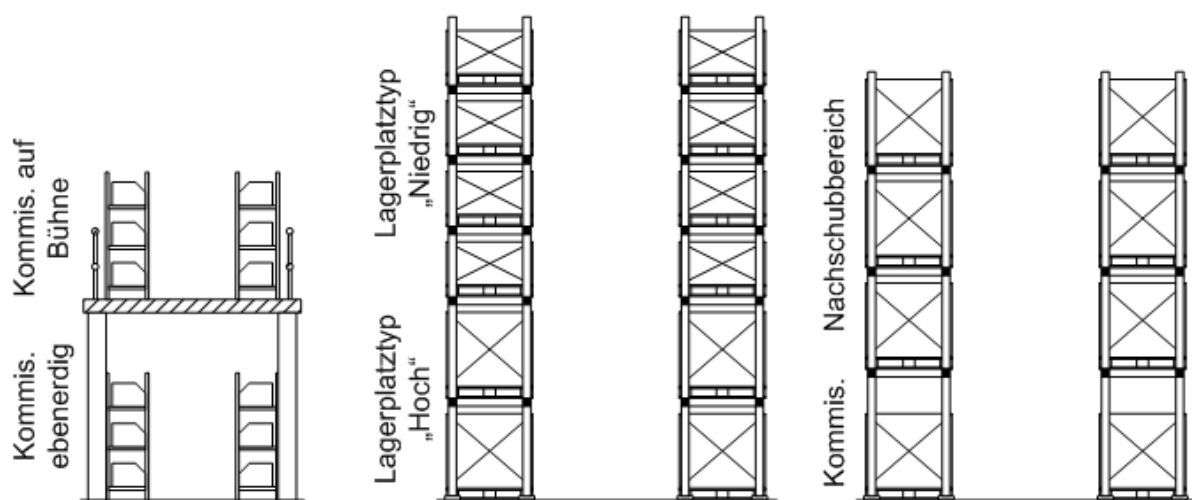


Abbildung 4-13: Schemazeichnung von Lagerbereichen mit Kommissionierung auf einer Bühne (links), mit unterschiedlich hohen Lagerplätzen (Mitte) und mit Kombination von Nachschub und Kommissionierung (rechts); jeweils Schnitt durch eine Lagergasse

4.8.1 Vorüberlegungen für die Abbildung kombinierter Lagerbereiche

Für die Lagerbereiche mit Kommissionierung und Nachschublagerung werden drei Ausführungen erarbeitet, die einen Großteil derartiger Lagerbereiche abdecken. Allen drei Ausführungen ist die Lagerung des Nachschubs in einem Palettenregal gemein, wobei die unteren Lagerebenen durch ein Bodenzeilenlager, Fachboden- oder Einschubregal für die Kommissionierung ersetzt werden. Dabei gilt:

- Die beiden Bereiche für Kommissionierung und Nachschub werden jeweils aus den Standardmodulen aufgebaut und berechnet.
- Die Regalsteher müssen im oberen und unteren Bereich dieselben Abstände zueinander haben, um beide Bereiche übereinander anordnen zu können.

- Der Kommissionierbereich wird durch eine Person mit Sammelfahrzeug bedient. Deren Greifhöhe (üblicherweise ca. 2 Meter [Hom-2010, S. 81]) definiert die Grenze zwischen beiden Bereichen.
- Die Ganglänge (als Freiheitsgrad gemessen in Fachmodulen: $n_{FM,x}$) und Gangzahl ($n_{GM,z}$) sowie die Anordnung der Gangmodule stimmen in beiden Bereichen überein.

4.8.2 Aufbau des Layouts kombinierter Lagerbereiche

Der Aufbau des Layouts eines kombinierten Lagerbereichs besteht aus 7 Schritten. Die verwendeten Formelzeichen wurden bereits in den vorherigen Kapiteln eingeführt und werden um die Indizes „Komm“ oder „Nach“ erweitert, sofern sie sich auf einen der beiden Bereiche beziehen.

Schritt 1: Festlegung des Lagerplatzes im Nachschubbereich

Der Lagerplatz des Kommissionierbereichs ist durch die Greiftiefe des Kommissionierers in seiner Breite auf ca. 0,8 Meter beschränkt [App-1985, S. 39f.]. Diese Einschränkung existiert im Nachschubbereich nicht, wobei dort die Längseinlagerung der Nachschubeinheiten aus Gründen des Platzbedarfs vorteilhafter ist. Der Lagerplatz im Nachschubbereich wird daher zuerst festgelegt und bildet mit seiner Breite eine Obergrenze für den Kommissionierbereich. Die Definition des Lagerplatzes geschieht gemäß den bekannten Grundformeln des kanalförmigen Lagerplatzes mit den Einschränkungen des Palettenregals.

Schritt 2: Festlegung des Lagerplatzes im Kommissionierbereich

Je nach Lagereinrichtung im Kommissionierbereich wird ein Lagerplatz des Bodenzeilenlagers, Fachboden- oder Einschubregals aufgebaut, wobei gelten muss:

$$b_{LP,Komm} \leq b_{LP,Nach} \quad (4-50)$$

Durch die zusätzliche Einschränkung der Greiftiefe auf 0,8 Meter sind insbesondere beim Bodenzeilenlager und beim Fachbodenregal keine Anpassungen gegenüber einem homogenen Lagerbereich zu erwarten, da der Palettenregal-Lagerplatz im Nachschubbereich mit Längseinlagerung tiefer ausfällt. Dadurch wird ein Teil der Fläche bzw. des Volumens im Kommissionierbereich nicht nutzbar sein (Abbildung 4-14 links und Mitte), während durch Verwendung von Einschubregalen eine möglichst gute Anpassung der Lagerplatztiefe an die des Nachschubbereichs erfolgen kann (Abbildung 4-14 rechts).

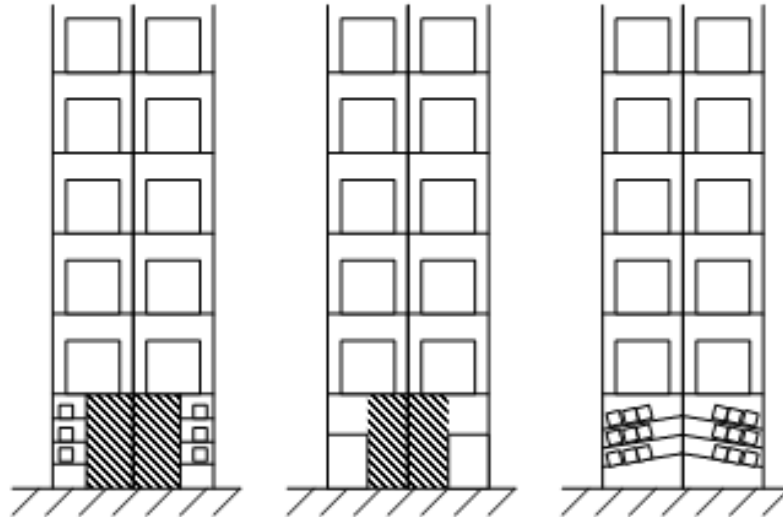


Abbildung 4-14: Schemazeichnung der drei betrachteten kombinierten Lagerbereiche: Palettenregal + Fachbodenregal (links), Palettenregal + Bodenzeilenlager (Mitte), Palettenregal + Einschubregal (rechts); nicht nutzbarer Raum schraffiert

Schritt 3: Anpassung der Fachmodullänge

Um die Bereiche übereinander anordnen zu können, muss der Abstand der Regalsteher in Gangrichtung festgelegt werden. Hierfür wird zuerst der maximale Steherabstand ermittelt, der mit beiden Lagereinrichtungsvarianten umsetzbar ist:

$$d_{St,max,eff} = \text{Min}(d_{St,max,Komm}; d_{St,max,Nach}) \quad (4-51)$$

Aus diesem effektiven maximalen Steherabstand ergibt sich in jedem der Bereiche die Anzahl an Lagerplätzen, die nebeneinander Platz finden ($n_{LP,x}$). Die eckigen Klammern drücken aus, dass das Ergebnis auf ganze Lagerplätze abgerundet wird.

$$n_{LP,x,Komm,max} = \left\lfloor \frac{d_{St,max,eff} - d_{LE,Komm}}{l_{LP,Komm}} \right\rfloor \quad (4-52)$$

$$n_{LP,x,Nach,max} = \left\lfloor \frac{d_{St,max,eff} - d_{LE,Nach}}{l_{LP,Nach}} \right\rfloor$$

Um unnötigen Platzverlust zu vermeiden, werden anschließend der tatsächliche Steherabstand und damit die Länge des Fachmoduls möglichst klein und zugleich so gewählt, dass die Lagerplätze aus Formel (4-52) Platz finden:

$$l_{FM,eff} = \text{Max}(n_{LP,x,Komm,max} * l_{LP,Komm} + d_{LE,Komm}; n_{LP,x,Nach,max} * l_{LP,Nach} + d_{LE,Nach}) \quad (4-53)$$

Schritt 5: Erzeugung der Fachmodule

Da im vorigen Schritt die Anzahl an Lagerplätzen nebeneinander im Fachmodul bereits festgelegt wurde, fehlen lediglich die Ebenenzahlen in beiden Bereichen. Der Kommissionierbereich ist in seiner Höhe durch den Kommissionierer eingeschränkt, weswegen er auf dessen Greifhöhe ausgelegt wird. Da sich außerdem der Nachschubbereich über dem Fachmodul befindet, kann angenommen werden, dass gilt:

$$h_{AM,O,Komm} = 0 \quad (4-54)$$

Formel (4-22) wird also umgestellt, sodass aus der maximalen Höhe von 2 Metern die maximal mögliche Ebenenzahl ermittelt werden kann:

$$n_{LP,y,Komm} = \frac{2 \text{ m} - h_{AM,U,Komm} - h_{AM,O,Komm}}{h_{LP,Komm}} \quad (4-55)$$

Die Höhe wird dann durch Einsetzen von (4-55) in (4-22) berechnet. Für die Berechnung der weiteren Größen des Fachmoduls werden die Grundformeln aus Kapitel 4.5 verwendet.

Das Fachmodul des Nachschubbereichs wird ebenfalls auf die maximale Höhe ausgelegt, die sich aus der bedienbaren Höhe des Bediengeräts und der von der gesamten Gebäudehöhe verbleibenden Resthöhe ergibt:

$$h_{FM,Nach,max} = \text{Min} (h_{bed}, h_{geb} - h_{FM,Komm}) \quad (4-56)$$

Da sich unterhalb des Nachschubbereichs der Kommissionierbereich befindet, kann angenommen werden, dass gilt:

$$h_{AM,U,Nach} = 0 \quad (4-57)$$

Zur Berechnung der maximal möglichen Ebenenzahl wird Formel (4-22) umgestellt und unter Verwendung von (4-56) und (4-57) ergibt sich:

$$n_{LP,y,Nach} = \frac{h_{FM,Nach,Max} - h_{AM,O,Nach}}{h_{LP,Nach}} \quad (4-58)$$

Für die fehlenden Größen des Fachmoduls im Nachschubbereich kommen die Grundformeln aus Kapitel 4.5 zum Einsatz.

Schritt 6: Erzeugung der Gangmodule

Für beide Bereiche werden aus den Fachmodulen Gangmodule zusammengesetzt. Da es sich bei allen Varianten um einseitig bediente Regale handelt, werden die Grundformeln aus Kapitel 4.6.1 verwendet. Es gilt zusätzlich, dass die Gassenlänge für beide Bereiche identisch sein muss, was durch die aneinander angepassten Fachmodullängen beider Bereiche zu folgender Bedingung führt:

$$n_{FM,x,Komm} = n_{FM,x,Nach} \quad (4-59)$$

Weiterhin muss der Gang so breit ausgeführt sein, dass beide Bedientechnikvarianten (für Kommissionierung und Nachschub) ausreichend Platz für die benötigten Bewegungen haben:

$$b_{GA} = \text{Max}(b_{GA,Komm}; b_{GA,Nach}) \quad (4-60)$$

Auch die Anfahrmaße an Gassenanfang und -ende nehmen den größten von einer Bedientechnikvariante benötigten Wert an:

$$l_{AM,V} = \text{Max}(l_{AM,V,Komm}; l_{AM,V,Nach}) \quad (4-61)$$

$$l_{AM,H} = \text{Max}(l_{AM,H,Komm}; l_{AM,H,Nach}) \quad (4-62)$$

Schritt 7: Erzeugung des Lagermoduls

Die Gangmodule für Kommissionier- und Nachschubbereich besitzen durch die in den vorherigen Schritten vorgenommenen Anpassungen identische Maße und dasselbe Steherraster. Für Länge, Breite, Fläche und Volumen eines kombinierten Lagermoduls lassen sich daher die Grundformeln aus 4.7.1 und 4.7.2 verwenden. Für die Höhe gilt davon abweichend:

$$h_{LM} = h_{GM,Komm} + h_{GM,Nach} \quad (4-63)$$

Da Kommissionier- und Nachschubbereich aus unterschiedlichen Stellplätzen bestehen und mit Ausnahme der Variante Palettenregal + Bodenzeilenlager unterschiedliche Ladungsträger beinhalten, wird die Kapazität getrennt angegeben, wobei die Grundformeln aus 4.7.1 und 4.7.2 verwendet werden können, bezogen auf das jeweils zugehörige Gangmodul.

4.9 Zielgrößen und weiterzugebende Größen aus dem Bereich Geometrie

Neben der in den Kapiteln 4.2 bis 4.8 ausgeführten Beschreibung der Geometrie eines Lagerbereichs muss das Modell zur Bewertung der Geometrie in der Lage sein, die benötigten Zielgrößen (vgl. Tabelle 3-2) und weiterzugebenden Größen aus der Geometrie abzuleiten.

Berechnung primärer Zielgrößen der Geometrie

Im Rahmen der Definition operationaler Ziele wurden als primäre Zielgröße der Geometrie die Flächenkosten ermittelt, welche direkt proportional zu der Fläche des Lagerbereichs sind. Die Fläche eines Lagerbereichs stellt daher die einzige primäre Zielgröße bzw. die einzige einer primären Zielgröße zugrunde liegende Größe dar. Sie berechnet sich zu:

$$A = A_{LM} \quad (4-64)$$

Berechnung sekundärer Zielgrößen der Geometrie

Weitere gesammelte Größen konnten auf Grund der Zielkomplementarität mit der Fläche zu der Gruppe der sekundären Zielgrößen sowie der informativen Größen zusammengefasst werden. Eine Optimierung der komplementären primären Zielgröße Fläche/Flächenkosten führt also zu einer gleichzeitigen Optimierung der folgenden Größen.

Die tatsächliche Lagerhöhe beschreibt die Höhe des Lagerbereichs, eingenommen durch die Lagereinrichtung sowie benötigte vertikale Anfahrmaße der Bedientechnik:

$$h = h_{LM} \quad (4-65)$$

Der Flächennutzungsgrad beschreibt das Verhältnis von Netto-Nutzfläche zur gesamten Fläche. Als Netto-Nutzfläche ist der Teil der Fläche definiert, welcher durch Lagereinrichtung und Ladungsträger belegt ist. Hierfür ist es zweckmäßig, zwei Korrekturfaktoren für die Ausprägung des Gangmoduls sowie die Layoutgrundform einzuführen:

$$f_{GM} = \begin{cases} 1 & \text{für beidseitig bediente Gangmodule} \\ 2 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4-66)$$

$$f_{Layout} = \begin{cases} 1 & \text{für Stirngang – Layout} \\ 2 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4-67)$$

Unter Verwendung der beiden Korrekturfaktoren lässt sich die Netto-Nutzfläche aus Gassenzahl, Gassenlänge und Fachmodulfläche berechnen, sodass sich nach Vereinfachung ergibt:

$$\eta_A = \frac{A_{Netto}}{A} = \frac{f_{GM} * f_{Layout} * n_{GM,z} * b_{FM} * (n_{FM,x} * l_{FM} + l_{St})}{A} \quad (4-68)$$

Analog zum Flächennutzungsgrad lässt sich der Raumnutzungsgrad angeben als Verhältnis zwischen Netto-Nutzvolumen und Gesamt-Volumen. Er ergibt sich aus dem Flächennutzungsgrad zu

$$\eta_V = \eta_A * \frac{h_{FM} - h_{AM,o} - h_{AM,U}}{h} \quad (4-69)$$

Bedingt durch die Annahme quaderförmiger, homogener Lagerbereiche liegt die tatsächliche Lagerbereichskapazität in der Regel über der Kapazität, welche mindestens benötigt Kapazität wird (vgl. Kapitel 4.4): Da sich jeweils nur komplette Gassen, Lager Ebenen und Fachmodule hinzufügen lassen, ist es möglich, dass in allen drei Raumrichtungen zusätzliche Stellplätze entstehen. Der tatsächliche Füllgrad ist umgekehrt proportional zur Kapazität des Lagerbereichs und berechnet sich durch Summierung über den mittleren Bestand aller eingelagerten Artikel $M_{B,i}$ zu

$$\eta_{Füll,tats} = \sum_i^{n_{Art}} \frac{M_{B,i}}{K_{LM}} \quad (4-70)$$

Für kombinierte Lagerbereiche lassen sich die hier vorgestellten Formeln teils ohne Anpassung übernehmen ((4-65) bis (4-68)), teils müssen sie für jeden der beiden Bereiche gesondert angewendet werden ((4-69) und (4-70)).

5 Modell zur Bewertung der Leistung

Das folgende Kapitel beschreibt das Modell zur Bewertung der Leistung. Basierend auf der Anforderungsdefinition und Einordnung des Modells (Kapitel 5.1) wird der grundlegende Aufbau des Modells dargelegt (Kapitel 5.2). Die detaillierten formelmäßigen Zusammenhänge werden in den anschließenden Kapiteln für die Prozesse Einheitenlagerung (Kapitel 5.3), Kommissionierung (Kapitel 5.4) und Kommissionierung mit Nachschublagerung (Kapitel 5.5) beschrieben.

5.1 Einordnung des Modells und Anforderungsdefinition

Das Modell zur Bewertung der Leistung muss drei Aufgaben erfüllen:

- Eindeutige Beschreibung aller relevanten Arbeitsspiele basierend auf der Geometrie gemäß des Modells aus Kapitel 4.
- Berechnung der Zielgrößen aus dem Bereich Zeit.
- Berechnung weiterzugebender Größen, die vom Modell zur Bewertung der Kosten benötigt werden.

Wie Abbildung 5-1 zeigt, stehen dem Modell Eingabedaten des Benutzers, Freiheitsgrade aus den Bereichen Konfiguration und Strategien sowie Größen aus dem Modell zur Bewertung der Geometrie zur Verfügung. Die daraus berechneten Größen stellen selbst Zielgrößen dar oder dienen der Bewertung der Kosten.

Die Systemgrenze des Modells werden wie folgt festgelegt:

- Betrachtet werden Ein- und Auslagervorgänge, wobei gilt, dass langfristig weder Bestand auf- noch abgebaut wird. Die benötigte Einlager- und Auslagerleistung pro Stunde werden daher als gleich angenommen.
- Es werden keine Bewegungen von Lagereinheiten betrachtet, die nicht direkt mit der Ein- oder Auslagerung in Verbindung stehen. Demzufolge werden Umlagerungen innerhalb des Lagerbereichs nicht betrachtet. Einzige Ausnahme bildet die Umlagerung einer Lagereinheit aus dem Nachschubbereich in den Kommissionierbereich bei kombinierter Kommissionierung und Nachschublagerung.
- Es werden keine Tätigkeiten von Bedientechnik und Personal außerhalb des Lagerbereichs betrachtet. Start und Ende der durchgeführten Spiele ist jeweils die

Basis. Nach Beendigung eines Spiels an der Basis stehen Bedientechnik und Personal sofort für ein neues Spiel bereit.

- Die Leistungsanforderung für die Bestimmung des Bediengerätebedarfs leitet sich aus dem Auftragsaufkommen der Spitzenstunde des Spitzentages eines Jahres ab [Gud-2010, S. 568].
- Die Leistungsanforderung für die Bestimmung des Personalbedarfs leitet sich aus dem mittleren Auftragsaufkommen über ein Jahr ab. Diese Annahme erfolgt in Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss, da Spitzen im Personalbedarf durch Maßnahmen der Arbeitszeitgestaltung aufgefangen werden können.
- Es sind vier Bedientechnikvarianten vorgesehen, die gemäß Tabelle 5-1 für die verschiedenen Prozesse und deren Spiele zum Einsatz kommen.

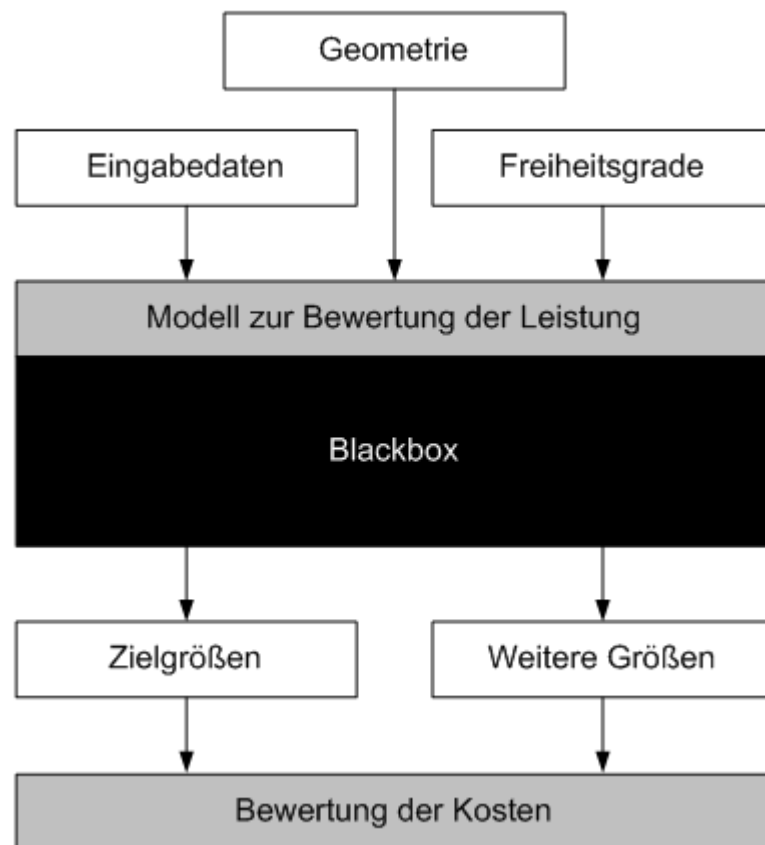


Abbildung 5-1: Einordnung des Modells zur Bewertung der Leistung (als Blackbox dargestellt)

Tabelle 5-1: Betrachtete Bedientechnikvarianten und deren Anwendung in den Prozessen

	Breitgangstapler	Hochregaltapler	Person mit Sammelfahrzeug	Kommissionierstapler
Einheitenlagerung	X	X		
Kommissionierung	X (Nachschub, Lagergasse)		X (Entnahme und Nachschub)	X (Entnahme und Nachschub)
Kommissionierung mit Nachschub	X (Nachschub)		X (Entnahme)	

5.2 Grundlegender Aufbau des Modells

Die Bestimmung des Bediengeräte- und Personalbedarfs erfordert die vorherige Berechnung der Spielzeiten der relevanten Arbeitsspiele. Hierfür existieren unterschiedliche Ansätze, die den grundlegenden Aufbau des Modells bestimmen. Diese Ansätze lassen sich hinsichtlich ihrer Abbildungsgenauigkeit und des für die Anwendung zu leistenden Aufwands qualitativ klassifizieren (Abbildung 5-2). Während die Schätzung vor allem bei Planungsaufgaben in der Praxis zum Einsatz kommt, liegt der Schwerpunkt in der Literatur auf der Herleitung analytischer Formeln für die Spielzeitberechnung. Hier wird versucht, durch Mittelwertbildung über alle möglichen Arbeitsspiele ein repräsentatives Arbeitsspiel zu erhalten, dessen Spielzeit stellvertretend berechnet wird. Entsprechende Modelle zu Einzel- und Doppelspielen sowie Kommissionierung werden beispielsweise beschrieben in [Gud-1973, S. 56ff.; Kun-1975; Bru-1990; Car-1998; Sad-2007; Gud-2010, S. 622ff.]. Ist eine Mittelwertbildung nicht möglich oder mit zu großer Ungenauigkeit für den Anwendungsfall behaftet, kann die Spielzeit simulativ ermittelt werden. Diese Methode findet bei Planungstools in der Praxis Anwendung, beispielsweise in [UlB-2010; Gro-2014].

Als Ansatz für die im Rahmen des Projektes OptiMAL entwickelte Planungsmethode werden analytische Formeln gewählt. Einerseits ergibt sich aus den durchgeführten Experteninterviews, dass die Ergebnisse der analytischen Formeln hinreichend genau für die Grobplanungsphase sind und mit vertretbarem Aufwand erreicht werden können. Andererseits besteht durch die Verwendung analytischer Formeln gegebenenfalls die Möglichkeit, das Planungsproblem als Optimierungsproblem zu formulieren, welches auf analytischem Wege lösbar ist.

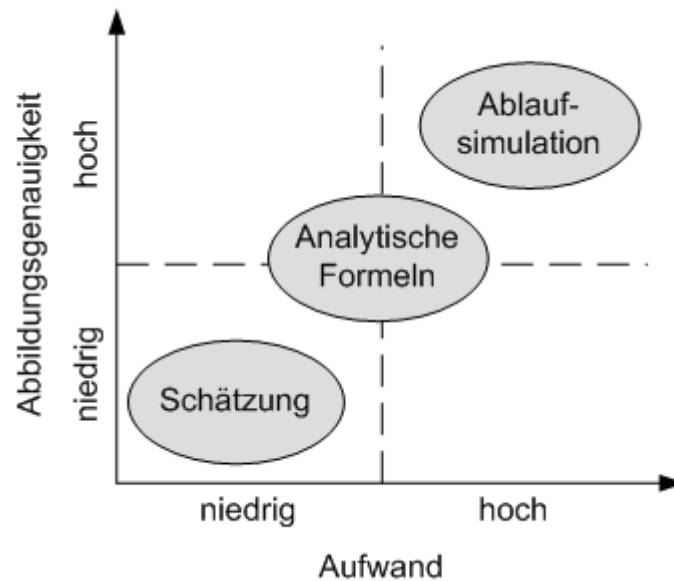


Abbildung 5-2: Klassifizierung der Ansätze zur Bestimmung des Bediengeräte- und Personalbedarfs

Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit verschiedener Planungsalternativen hinsichtlich der Leistung zu erreichen, baut das im Folgenden dargestellte Modell auf drei in der Literatur beschriebenen analytischen Modellen mit breitem Anwendungsbereich auf. Diese Modelle wurden zusammengefasst und erweitert, sofern bestimmte Spielarten und Geometrien nicht abgedeckt waren. Die drei Prozesse Einheitenlagerung, Kommissionierung und Kommissionierung kombiniert mit Nachschub werden durchgängig getrennt voneinander betrachtet, sodass für jeden Prozess ein separates Bewertungsmodell entwickelt wurde. Die folgenden Kapitel stellen für jedes der drei Modelle jeweils die Formeln zusammen, die für die Berechnung der Spielzeit und des Bediengerätebedarfs notwendig sind.

5.3 Bedientechnikbedarfs- und Spielzeitberechnung bei Einheitenlagerung

Der Bediengerätebedarf n_{Bed} bei Einheitenlagerung ergibt sich aus der Forderung, dass genügend Bediengeräte zur Verfügung stehen müssen, um den Ein- und Auslagerleistungsbedarf P_{Soll} der Spitzenstunde des Spitzenjahres zu decken:

$$n_{Bed} * P_{Bed} \geq P_{Soll} \quad (5-1)$$

Analog zu n_{Bed} lässt sich mit (5-1) die benötigte Anzahl an Personal (n_{Pers}) berechnen, indem P_{Soll} als durchschnittlich benötigter Ein- und Auslagerleistungsbedarf verwen-

det wird. Der Ein- und Auslagerleistungsbedarf eines Lagerbereichs ist abhängig davon, welche Artikel in diesem Lagerbereich gelagert werden. Er setzt sich additiv aus der je Artikel benötigten Anzahl an Ein- und Auslagerungen pro Periode zusammen. Die Leistung eines Bediengerätes P_{Bed} wird dagegen aus der Spielzeit ermittelt. Drei verschiedene Arbeitsspiele können auftreten:

- Einzelspiel zur Einlagerung, vgl. Abbildung 2-5 a)
Das Bediengerät nimmt an der Basis eine Lagereinheit auf, fährt zum Einlagerfach und gibt dort die Lagereinheit ab. Anschließend fährt das Bediengerät leer zur Basis zurück.
- Einzelspiel zur Auslagerung, vgl. Abbildung 2-5 a)
Das Bediengerät begibt sich leer von der Basis zum Auslagerfach und nimmt dort eine Lagereinheit auf. Anschließend fährt es zur Basis und gibt dort die Lagereinheit ab.
- Doppelspiel aus Ein- und Auslagerung, vgl. Abbildung 2-5 b) und c)
Das Bediengerät nimmt an der Basis eine Lagereinheit auf, fährt zum Einlagerfach und gibt dort die Lagereinheit ab. Anschließend fährt es von dort zum Auslagerfach und nimmt dort eine Lagereinheit auf. Vom Auslagerfach fährt es zurück zur Basis und gibt die Lagereinheit ab.

Bei der Ermittlung der Spielzeiten müssen weitere Besonderheiten berücksichtigt werden wie beispielsweise die Bewegungsform des Bediengeräts oder eine zusätzliche Übergabe der Lagereinheit zwischen Verkehrsgang und Lagergasse. Das von *Gudehus* beschriebene Modell [Gud-2010, S. 622ff.] deckt diese drei Spiele für die beiden Fälle additiver und simultaner Bewegungsform ab und ist für die betrachteten Konfigurationen entweder direkt geeignet oder zumindest mit geringem Aufwand anpassbar. Es wird daher für die Berechnung des Bediengerätebedarfs der Einheitenlagerung ausgewählt.

In den folgenden Kapiteln werden zuerst die jeweiligen Spielzeitformeln basierend auf den Ausführungen von *Gudehus* und auf dem in Kapitel 4 beschriebenen Modell zur Bewertung der Geometrie entwickelt. Anschließend erfolgt die Berechnung der Leistung eines Bediengerätes sowie der Bediengeräteanzahl. Den Ausführungen liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Es wird eine freie Lagerbelegung eingesetzt. Dadurch sind sowohl die Zugriffshäufigkeit auf die einzelnen Lagergassen als auch die Zugriffshäufigkeit auf die Lagerplätze innerhalb jeder Gasse gleich. Einzige Ausnahme sind beidseitig bediente Regale. Hier ist die Zugriffshäufigkeit der Lagergassen nicht gleich, sondern hängt von der Orientierung der Gangmodule ab.

- Die Anfahr- und Bremsbeschleunigung des Bediengerätes in alle drei Raumrichtungen ist linear bis zum Erreichen der Maximalgeschwindigkeit. Daraus ergibt sich abhängig von der zurückzulegenden Strecke s ein trapezförmiges oder dreiecksförmiges Geschwindigkeitsprofil (Abbildung 5-3). Diese Annahme resultiert in der eindimensionalen Wegzeitformel [Gud-2010, S. 622]:

$$t_m(s) = \begin{cases} 2 * \sqrt{\frac{s}{b_m}} & \text{für } s < s^* = \frac{v_{Max}^2}{b_m} \\ \frac{s}{v_{Max}} + \frac{v_{Max}}{b_m} & \text{sonst} \end{cases} \quad (5-2)$$

mit

$$b_m = \frac{2b^+b^-}{b^+ + b^-} \quad (5-3)$$

Eine simultane Bewegung in zwei Dimensionen ergibt sich unter Verwendung von (5-2) zu:

$$t_{xy}(l; h) = \text{MAX}(t_x(l); t_y(h)) \quad (5-4)$$

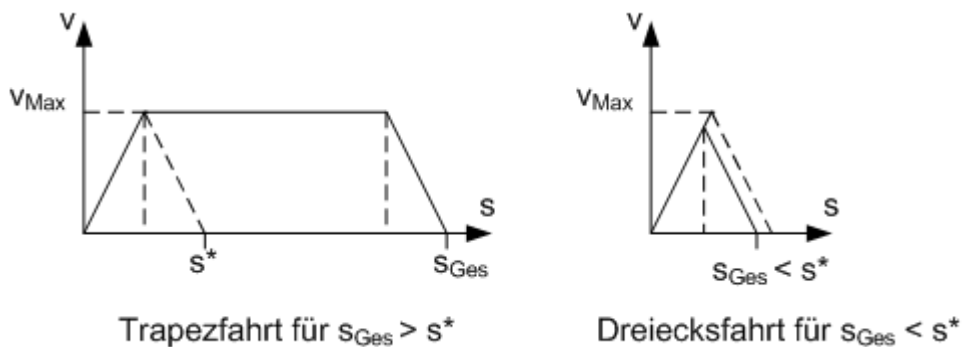


Abbildung 5-3: Eindimensionales Geschwindigkeitsprofil mit linearer Beschleunigung

5.3.1 Spielzeitberechnung des Einzelspiels zur Einlagerung

Die Spielzeit eines Einzelspiels zur Einlagerung lässt sich basierend auf einer Analyse der durchzuführenden Tätigkeiten ermitteln. Diese sind in Abbildung 5-4 in Form eines Flussdiagramms gegliedert nach dem Ort dargestellt.

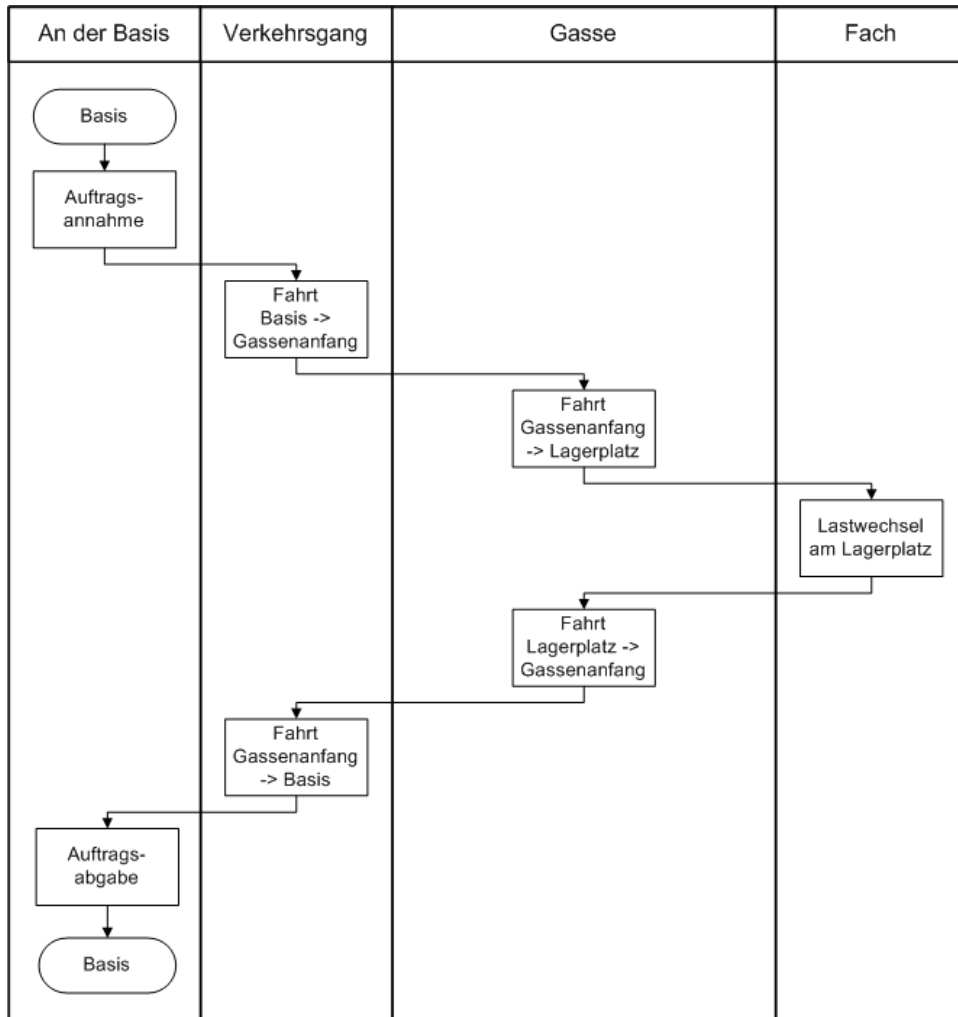


Abbildung 5-4: Flussdiagramm des Einzelspiels zur Einlagerung

Die Spielzeit setzt sich somit aus vier Zeitanteilen für Basis, Verkehrsgang, Gasse und Lagerplatz zusammen:

$$t_{ES, Ein} = t_{ES, Ein, VG} + t_{ES, Ein, GA} + t_{ES, Ein, LP} + t_{ES, Ein, Ba} \quad (5-5)$$

Spielzeitanteil im Verkehrsgang

Der Spielzeitanteil im Verkehrsgang besteht aus der Fahrt von der Basis zur Lagergasse mit dem Einlagerplatz ($t_{B \rightarrow G}$) und zurück ($t_{G \rightarrow B}$) sowie der Zeit $t_{0, B \rightarrow G}$, die den Zeitbedarf für das Ausrichten des Bediengeräts vor Einfahrt in die Gasse oder den Lastwechsel bei Gassenbindung abdeckt. Der zwischen Basis und Gasse zurückzulegende Weg ist unabhängig von der Fahrtrichtung gleich, weswegen sich vereinfacht für den Spielzeitanteil im Verkehrsgang ergibt:

$$t_{ES, Ein, VG} = 2 * t_{B \rightarrow G} + t_{0, B \rightarrow G} \quad (5-6)$$

Mit der eindimensionalen Wegzeitformel (5-2) folgt:

$$t_{ES, Ein, VG} = 2 * t_x(s_{B \rightarrow G}) + t_{0, B \rightarrow G} \quad (5-7)$$

Der Weg zwischen Basis und Lagergasse ist abhängig von der Layoutgrundform sowie der Gassenzahl und lässt sich für einseitig bediente Regale Tabelle 5-2 entnehmen.

Tabelle 5-2: *Layoutabhängige Berechnung des Wegs zwischen Basis und Lagergasse für einseitig bediente Lagereinrichtung*

Layout	analytische Formel
Stirnganglayout, Gassenzahl gerade	$s_{B \leftrightarrow G} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z} * b_{GM}}{4}$
Stirnganglayout, Gassenzahl ungerade	$s_{B \leftrightarrow G} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 - 1}{4n_{GM,z}} * b_{GM}$
Zentralganglayout, Gassenzahl gerade	$s_{B \leftrightarrow G} = \frac{3}{2} * b_{VG} + \frac{n_{GM,z} * b_{GM}}{2}$
Zentralganglayout, Gassenzahl ungerade	$s_{B \leftrightarrow G} = \frac{3}{2} * b_{VG} + \frac{n_{GM,z} * b_{GM}}{2}$

Für beidseitig bediente Regale hat auch die Orientierung der Gangmodule einen Einfluss auf den Weg zwischen Basis und Lagergasse. Die Annahme gleichhäufig angefahrener Lagergassen gilt nicht, da sich auf beiden, einer oder keiner Seite der Lagergasse Lagerplätze für die Einlagerung befinden können. Durch Gewichtung der möglichen Wegstrecken zwischen Basis und Lagergasse mit der jeweiligen Zugriffshäufigkeit auf die Lagergasse ergibt sich der Weg zwischen Basis und Lagergasse für diesen Fall:

$$s_{B \rightarrow G} = \sum_{i=1}^{n_{GM,z}} P_{Gasse\ i} * s_{B \rightarrow i} \quad (5-8)$$

Durch Einsetzen und Vereinfachen erhält man die im Anhang (Tabelle A-1) dargestellten Formeln.

Die für Formel (5-7) noch fehlende Größe $t_{0, B \rightarrow G}$ ist abhängig vom Fahranteil sowie der Gassenbindung und kann Tabelle 5-3 entnommen werden.

Tabelle 5-3: Konstanter Wegzeitanteil $t_{0,B \rightarrow G}$ bei Einzelspielen zur Einlagerung

Fahranteil	Gassenbindung	$t_{0,i}$
Basis -> Gasse	Gassengebunden	Lastwechsel ($t_{0,Lastw}$)
	Gassenungebunden	Ausrichten ($t_{0,Ausr}$)
Gasse -> Basis	Beide Varianten	Ausrichten ($t_{0,Ausr}$)

Spielzeitanteil in der Lagergasse

Der Spielzeitanteil in der Lagergasse besteht beim Einzelspiel zur Einlagerung aus zwei Teilen: einerseits aus der Fahrt vom Anfang der Gasse bis zum Lagerplatz ($t_{G \rightarrow LP}$) mit Ausrichten des Bediengerätes am Lagerplatz ($t_{0,G \rightarrow LP}$), andererseits nach erfolgtem Lastwechsel aus der Fahrt vom Lagerplatz zum Anfang der Gasse ($t_{LP \rightarrow G}$) sowie dem Ausrichten des Bediengerätes ($t_{0,LP \rightarrow G}$). Auch hier lässt sich die Symmetrie des Spiels ausnutzen, woraus mit der Ausrichtzeit ($t_{0,Ausr}$) folgt:

$$t_{ES, Ein, Ga} = 2 * t_{G \rightarrow LP} + t_{0,G \rightarrow LP} + t_{0,LP \rightarrow G} = 2 * t_{G \rightarrow LP} + 2 * t_{0,Ausr} \quad (5-9)$$

Bewegt sich das Bediengerät additiv, so kann für die Berechnung der Wegzeit auf Grund der gleichen Zugriffshäufigkeit aller Lagerplätze ein repräsentativer Lagerplatz mit folgenden Koordinaten angenommen werden:

$$x_{LP,rep} = \frac{L}{2} = \frac{l_{GM} - l_{AM,V} - l_{AM,H}}{2} \quad (5-10)$$

$$y_{LP,rep} = \frac{H}{2} = \frac{h_{LM} - h_{AM,O} - h_{AM,U}}{2} \quad (5-11)$$

Unter Verwendung der eindimensionalen Wegzeitformel und einer zusätzlichen konstanten Ausrichtzeit folgt:

$$t_{G \rightarrow LP} = t_x(x_{LP,rep}) + t_{0,Ausr} + t_y(y_{LP,rep}) \quad (5-12)$$

Bei simultaner Bewegungsform werden dagegen zwei repräsentative Lagerplätze verwendet mit den folgenden Koordinaten [Gud-2010, S. 625]:

$$x_{LP,rep,1} = 2 * \frac{L}{3} = 2 * \frac{l_{GM} - l_{AM,V} - l_{AM,H}}{3} \quad (5-13)$$

$$y_{LP,rep,1} = \frac{H}{5} = \frac{h_{LM} - h_{AM,O} - h_{AM,U}}{5} \quad (5-14)$$

$$x_{LP,rep,2} = \frac{L}{5} = \frac{l_{GM} - l_{AM,V} - l_{AM,H}}{5} \quad (5-15)$$

$$y_{LP,rep,2} = 2 * \frac{H}{3} = 2 * \frac{h_{LM} - h_{AM,O} - h_{AM,U}}{3} \quad (5-16)$$

Durch Mittelwertbildung über beide repräsentativen Lagerplätze und Anwendung der zweidimensionalen Wegzeitformel ergibt sich:

$$t_{G \rightarrow LP} = \frac{1}{2} * [t_{xy}(x_{LP,rep,1}, y_{LP,rep,1}) + t_{xy}(x_{LP,rep,2}, y_{LP,rep,2})] \quad (5-17)$$

Spielzeitanteil im Lagerplatz

Der Spielzeitanteil im Lagerfach beginnt mit der Einfahrt des Lastaufnahmemittels ($t_{LP,ein}$). Anschließend erfolgen der Lastwechsel in Form der Abgabe der Lagereinheit ($t_{0,Lastw}$) sowie das Ausfahren des Lastaufnahmemittels ($t_{LP,aus}$) und Ausrichten des Bediengeräts für die Rückfahrt zum Anfang der Lagergasse ($t_{0,Ausr}$). Auf Grund der Symmetrie von Ein- und Ausfahrt gilt:

$$t_{ES,Ein,LP} = 2 * t_{LP,ein} + t_{0,Lastw} + t_{0,Ausr} \quad (5-18)$$

Bei den betrachteten Bedientechnikvarianten erfolgt die Lastaufnahme jeweils am Ende des Lagerfachs [Gud-2010, S. 624]. Aus diesem Grund gilt mit Verwendung der Geometrie Größen aus Kapitel 4:

$$t_{LP,ein} = t_z \left(b_{LE,eff} + \frac{d_{LE}}{2} \right) \quad (5-19)$$

Spielzeitanteil an der Basis

Der Spielzeitanteil an der Basis umfasst die Lastaufnahme zu Beginn des Spiels ($t_{0,Lastw}$) sowie das Ausrichten des Bediengerätes an der Basis ($t_{0,Ausr}$) nach Abschluss. Damit kann das nächste Spiel direkt mit der Fahrt im Verkehrsgang beginnen.

$$t_{ES,Ein,Ba} = t_{0,Lastw} + t_{0,Ausr} \quad (5-20)$$

Zusammengefasste Spielzeitformel des Einzelspiels zur Einlagerung

Durch Einsetzen der Formeln (5-7), (5-9), (5-18) und (5-20) in (5-5) ergeben sich folgende Formeln für additive und simultane Fortbewegung:

$$t_{ES, Ein, Add} = 2 * t_x(s_{B \rightarrow G}) + t_{0, B \rightarrow G} + 2 * [t_x(x_{LP, rep}) + t_y(y_{LP, rep})] + 2 * t_z \left(b_{LE, eff} + \frac{d_{LE}}{2} \right) + t_{0, Lastw} + 4 * t_{0, Ausr} \quad (5-21)$$

$$t_{ES, Ein, Sim} = 2 * t_x(s_{B \rightarrow G}) + t_{0, B \rightarrow G} + * [t_{xy}(x_{LP, rep, 1}, y_{LP, rep, 2}) + t_{xy}(x_{LP, rep, 2}, y_{LP, rep, 2})] + 2 * t_z \left(b_{LE, eff} + \frac{d_{LE}}{2} \right) + t_{0, Lastw} + 3 * t_{0, Ausr} \quad (5-22)$$

Die zurückzulegende Strecke zwischen Basis und Lagergasse kann abhängig von der Geometrie Tabelle 5-2 und Tabelle A-1 entnommen werden. Bei Gassenbindung werden für die Beschleunigungen und Geschwindigkeiten in den Wegzeitformeln die Daten der jeweiligen Bedientechnik (im Verkehrsgang bzw. in der Lagergasse) verwendet. Die Zeitanteile $t_{0, B \rightarrow G}$ und $t_{0, G \rightarrow B}$ finden sich abhängig von der Gassenbindung in Tabelle 5-3.

Anhand des Einzelspiels zur Einlagerung zeigt sich bereits, dass abhängig von der Konfiguration unterschiedliche Formeln verwendet werden müssen. Für die folgenden Spiele der Einheitenlagerung und die Prozesse Kommissionierung und Kommissionierung mit Nachschublagerung wird daher darauf verzichtet, die durch Einsetzen entstehenden verschiedenen Formeln für die Spielzeit anzugeben.

5.3.2 Spielzeitberechnung des Einzelspiels zur Auslagerung

Die Spielzeitberechnung des Einzelspiels zur Auslagerung lässt sich durch geringfügige Änderungen aus dem Einzelspiel zur Einlagerung ableiten. Es gilt für die Spielzeiten bei additiver und simultaner Fortbewegung:

$$t_{ES, Aus, Add} = t_{ES, Ein, Add} \quad (5-23)$$

$$t_{ES, Aus, Sim} = t_{ES, Ein, Sim} \quad (5-24)$$

Die zurückzulegende Strecke im Verkehrsgang unterscheidet sich bei beidseitig bedienten Lagersystemen in einigen Fällen von der der Einlagerung und ist für alle möglichen Varianten in Tabelle A-2 dargestellt.

Der Zeitanteil $t_{0, B \rightarrow G}$ hängt von der Gassenbindung ab und kann Tabelle 5-4 entnommen werden.

Tabelle 5-4: Konstanter Wegzeitanteil $t_{0,B \rightarrow G}$ bei Einzelspielen zur Auslagerung

Fahranteil	Gassenbindung	$t_{0,i}$
Basis -> Gasse	Gassengebunden	Lastwechsel ($t_{0,Lastw}$)
	Gassenungebunden	Ausrichten ($t_{0,Ausr}$)
Gasse -> Basis	Beide Varianten	Lastwechsel ($t_{0,Lastw}$)

5.3.3 Spielzeitberechnung des Doppelspiels

Analog zu einem Einzelspiel lassen sich die durchzuführenden Tätigkeiten eines Doppelspiels in ein nach dem Ort gegliedertes Flussdiagramm überführen (Abbildung 5-5). Die Spielzeit besteht aus vier Zeitanteilen für Basis, Verkehrsgang, Gasse und Lagerplatz:

$$t_{DS} = t_{DS,VG} + t_{DS,ga} + t_{DS,LP} + t_{DS,Ba} \quad (5-25)$$

Spielzeitanteil im Verkehrsgang

Der Spielzeitanteil im Verkehrsgang besteht im allgemeinen Fall aus drei Anteilen: der Fahrt von der Basis zur Lagergasse mit dem Einlagerplatz ($t_{B \rightarrow G,E}$) mit Ausrichten oder Übergabe der Last an die gassengebundene Bedientechnik ($t_{0,B \rightarrow G,E}$); der Fahrt zwischen den Lagergassen mit Ein- und Auslagerplatz ($t_{G,E \rightarrow G,A}$) sowie zugehörigem Zeitbedarf zum Ausrichten am Gassenende ($t_{0,Ausr}$); der Fahrt von der Lagergasse mit Auslagerplatz zurück zur Basis ($t_{G,A \rightarrow B}$):

$$t_{DS,VG,mGW} = t_{B \rightarrow G,E} + t_{0,B \rightarrow G,E} + t_{G,E \rightarrow G,A} + t_{0,G,E \rightarrow G,A} + t_{G,A \rightarrow B} \quad (5-26)$$

Mit Ausnutzung der Symmetrie ($s_{B \rightarrow G,E} \approx s_{G,A \rightarrow B}$) und der eindimensionalen Wegzeitformel folgt:

$$t_{DS,VG,mGW} = 2 * t_x(s_{B \rightarrow G,E}) + t_{0,B \rightarrow G,E} + t_x(s_{G,E \rightarrow G,A}) + t_{0,G,E \rightarrow G,A} \quad (5-27)$$

Der mittlere Weg zwischen Basis und Gasse gleicht dem des Einzelspiels. $s_{B \rightarrow G,E}$ lässt sich also aus Tabelle 5-2 und Tabelle A-1 bestimmen, $s_{B \rightarrow G,A}$ analog aus Tabelle 5-2 und Tabelle A-2. Gleiches gilt für die Zeitbedarf $t_{0,B \rightarrow G,E}$: der zu verwendende Wert ist abhängig von der Gassenbindung und ergibt sich aus Tabelle 5-3.

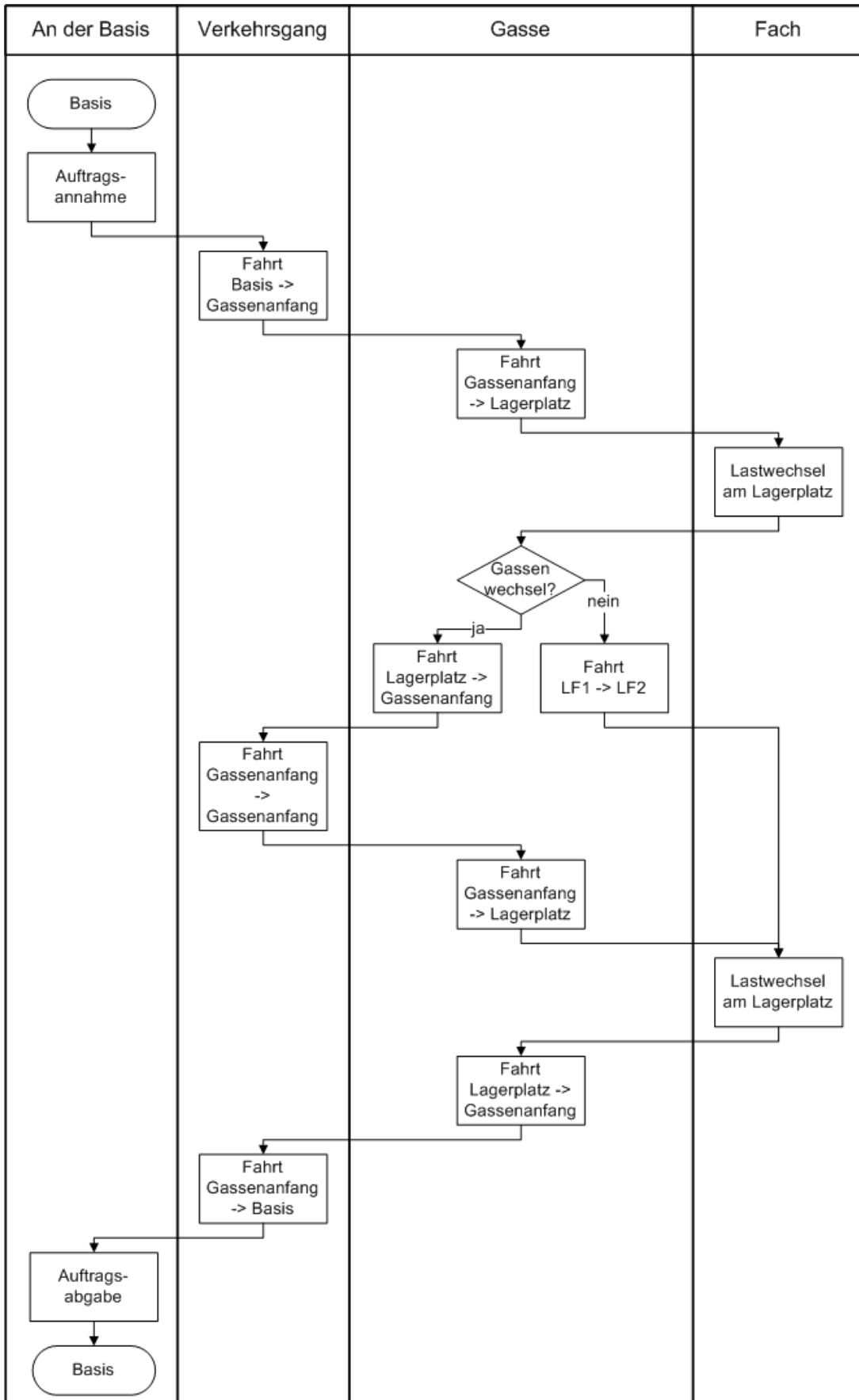


Abbildung 5-5: Flussdiagramm des Doppelspiels

Der Weg zwischen Einlager- und Auslagergasse ($s_{G,E \rightarrow G,A}$) ist davon abhängig, ob ein Gassenwechsel nötig ist. Falls ja, kann für einseitig bediente Regale angenommen werden, dass die Ein- und Auslagergasse um ein Drittel der Lagermodulbreite auseinander liegen [Gud-2010, S. 624]. Daraus resultieren für Stirngang- und Zentralganglayout die Formeln in Tabelle 5-5.

Tabelle 5-5: *Layoutabhängige Berechnung des Weges zwischen zwei Lagergassen für einseitig bediente Lagereinrichtung*

Layout	analytische Formel
Stirnganglayout	$s_{G,E \leftrightarrow G,A} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z} * b_{GM}}{3}$
Zentralganglayout	$s_{G,E \leftrightarrow G,A} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z} * b_{GM}}{6}$

Da bei beidseitig bedienten Regalen die Zugriffshäufigkeit auf die einzelnen Gassen nicht gleich ist, folgt die Wegstrecke in diesem Fall als Summe über alle möglichen Wegstrecken des Gassenwechsels, gewichtet mit den Zugriffshäufigkeiten beider Gassen:

$$s_{G,E \leftrightarrow G,A} = \sum_{i=1}^{n_{GM,z}} \sum_{j=1}^{n_{GM,z}} P_{Gasse\ i} * P_{Gasse\ j} * S_{i \rightarrow j} \quad (5-28)$$

Durch Einsetzen und Vereinfachen erhält man die im Anhang (Tabelle A-3) dargestellten Formeln. Fällt jedoch kein Gassenwechsel an, gilt:

$$s_{G,E \rightarrow G,A} = 0 \text{ und } t_x(s_{G,E \rightarrow G,A}) = 0 \quad (5-29)$$

$$t_{0,G,E \rightarrow G,A} = 0 \quad (5-30)$$

$$t_{DS,VG,oGW} = 2 * t_x(s_{B \rightarrow G,E}) + t_{0,B \rightarrow G,E} \quad (5-31)$$

Der Zeitanteil im Verkehrsgang lässt sich unter Verwendung der Gassenwechselwahrscheinlichkeit angeben zu:

$$t_{DS,VG} = t_{DS,VG,mGW} * P_{GW} + t_{DS,VG,oGW} * (1 - P_{GW}) \quad (5-32)$$

Die Gassenwechselwahrscheinlichkeit gibt an, wie wahrscheinlich ein zufällig gewählter Ein- und Auslagerplatz in verschiedenen Lagergassen liegen. Bei Zusammenfassung dieser beiden Lagerplätze zu einem Doppelspiel muss der Bediener entsprechend über den Verkehrsgang die Gasse wechseln. Bei einseitig bedienten Regalen beträgt die Gassenwechselwahrscheinlichkeit gemäß der hypergeometrischen Verteilung [Sad-2007, S. 105]:

$$\begin{aligned}
 P_{GW} &= 1 - \frac{\binom{K_{GM}/K_{LP}}{2} \binom{K_{GM}/K_{LP} * (n_{GM,z} - 1)}{0}}{\binom{K_{GM}/K_{LP} * n_{GM,z}}{2}} \\
 &= 1 - \frac{K_{GM}/K_{LP} - 1}{n_{GM,z} \binom{K_{GM}/K_{LP} * n_{GM,z} - 1}{1}}
 \end{aligned} \tag{5-33}$$

Auf Grund der ungleichen Zugriffswahrscheinlichkeit bei beidseitig bedienten Regalen gilt Formel (5-33) hier nicht. Abhängig von der Orientierung der Gangmodule ergeben sich die Formeln in Tabelle 5-6.

Tabelle 5-6: Gassenwechselwahrscheinlichkeit bei beidseitig bedienter Lagereinrichtung

Layout	analytische Formel
Stirnganglayout, kombinierte Gassen	$P_{GW} = \frac{n_{GM,z}^2 - n_{GM,z} + 1}{n_{GM,z}^2}$
Zentralganglayout, kombinierte Gassen	$P_{GW} = \frac{2n_{GM,z}^2 - n_{GM,z} + 1}{2n_{GM,z}^2}$
Getrennte Gassen	$P_{GW} = 1$

Spielzeitanteil in der Lagergasse

Der Spielzeitanteil in den Lagergassen mit Ein- und Auslagerplatz ist ebenfalls abhängig davon, ob ein Gassenwechsel erfolgt. Befinden sich Ein- und Auslagerplatz in verschiedenen Gassen, setzt sich der Spielzeitanteil des Doppelspiels additiv aus den Spielzeitanteilen für Ein- und Auslagereinzelspiel zusammen:

$$t_{DS,Ga,mGW} = t_{ES,E,Ga} + t_{ES,A,Ga} \tag{5-34}$$

Abhängig von Gassenbindung und Bewegungsform des Bediengeräts lässt sich (5-34) mit den entsprechenden Formeln aus Kapitel 5.3.1 und 5.3.2 weiter vereinfachen. Es gilt für additive Bewegung:

$$t_{DS,GA,mGW} = 4 * [t_x(x_{LP,rep}) + t_{0,Ausr} + t_y(y_{LP,rep})] + 4 * t_{0,Ausr} \quad (5-35)$$

Es gilt für simultane Bewegung ohne Gassenbindung:

$$t_{DS,GA,mGW} = 2 * [t_{xy}(x_{LP,rep,1}, y_{LP,rep,2}) + t_{xy}(x_{LP,rep,2}, y_{LP,rep,2})] + 4 * t_{0,Ausr} \quad (5-36)$$

Es gilt für simultane Bewegung mit Gassenbildung:

$$t_{DS,GA,mGW} = 2 * [t_{xy}(x_{LP,rep,1}, y_{LP,rep,2}) + t_{xy}(x_{LP,rep,2}, y_{LP,rep,2})] + 4 * t_{0,Ausr} \quad (5-37)$$

Sofern dagegen kein Gassenwechsel nötig ist, besteht der Spielzeitanteil in der Lagergasse aus drei Teilen: der Fahrt vom Anfang der Gasse zum Einlagerplatz ($t_{G \rightarrow LP,E}$) sowie dem dortigen Ausrichten des Bediengeräts ($t_{0,Ausr}$); der Fahrt vom Einlager- zum Auslagerplatz ($t_{LP,E \rightarrow LP,A}$) und dem dortigen Ausrichten des Bediengeräts ($t_{0,Ausr}$); der Fahrt vom Auslagerplatz zurück zum Anfang der Gasse ($t_{LP,A \rightarrow G}$) mit dem dortigen Ausrichten oder Lastwechsel bei Gassenbindung ($t_{0,LP,A \rightarrow G}$):

$$t_{DS,GA,oGW} = t_{G \rightarrow LP,E} + t_{0,Ausr} + t_{LP,E \rightarrow LP,A} + t_{0,Ausr} + t_{LP,A \rightarrow G} + t_{0,LP,A \rightarrow G} \quad (5-38)$$

Bei additiver Bewegungsform kann auf Grund gleicher Zugriffshäufigkeit aller Lagerplätze angenommen werden, dass der repräsentative Ein- und Auslagerplatz jeweils die Koordinaten aus (5-10) und (5-11) besitzen. Damit gilt:

$$t_{G \rightarrow LP,E} = t_{LP,A \rightarrow G} = t_x(x_{LP,rep}) + t_{0,Ausr} + t_y(y_{LP,rep}) \quad (5-39)$$

Für den Weg zwischen zwei Lagerplätzen gilt unter Berücksichtigung des Ausrichtens und mit den Größen L und H aus Formel (5-10) und (5-11):

$$t_{LP,E \rightarrow LP,A} = t_x\left(\frac{L}{3}\right) + t_y\left(\frac{H}{3}\right) + t_{0,Ausr} = t_x\left(\frac{2x_{LP,rep}}{3}\right) + t_y\left(\frac{2y_{LP,rep}}{3}\right) + t_{0,Ausr} \quad (5-40)$$

Zusammengefasst ergibt sich für die Doppelspielzeit bei additiver Fortbewegung ohne Gassenwechsel und ohne Gassenbindung:

$$t_{DS,GA,oGW} = 2 * [t_x(x_{LP,rep}) + t_y(y_{LP,rep})] + t_x\left(\frac{L}{3}\right) + t_y\left(\frac{H}{3}\right) + 6 * t_{0,Ausr} \quad (5-41)$$

Auch bei simultaner Fortbewegung lässt sich die Fahrzeit zwischen Gassenanfang und Ein-/Auslagerplatz durch die bekannten repräsentativen Lagerplätze aus (5-13) bis (5-16) berechnen:

$$t_{G \rightarrow LP, E} = t_{G \rightarrow LP, A} = \frac{1}{2} * [t_{xy}(x_{LP, rep, 1}, y_{LP, rep, 1}) + t_{xy}(x_{LP, rep, 2}, y_{LP, rep, 2})] \quad (5-42)$$

Für die Fahrzeit von Einlager- zu Auslagerplatz gilt mit den Größen L und H aus den Formeln (5-13) und (5-14) [Gud-2010, S. 628]:

$$t_{LP, E \rightarrow LP, A} = t_{xy} \left(\frac{14}{30} L, \frac{14}{30} H \right) \quad (5-43)$$

Zusammengefasst ergibt sich für die Doppelspielzeit bei simultaner Fortbewegung ohne Gassenwechsel:

$$t_{DS, GA, oGW} = [t_{xy}(x_{LP, rep, 1}, y_{LP, rep, 1}) + t_{xy}(x_{LP, rep, 2}, y_{LP, rep, 2})] + t_{xy} \left(\frac{14}{30} L, \frac{14}{30} H \right) + 2 * t_{0, Ausr} + t_{0, LP, A \rightarrow G} \quad (5-44)$$

mit

$$t_{0, LP, A \rightarrow G} = \begin{cases} t_{0, Ausr} & \text{ohne Gassenbindung} \\ t_{0, Lastw} & \text{mit Gassenbindung} \end{cases} \quad (5-45)$$

Spielzeitanteil im Lagerplatz

Bei einem Doppelspiel fällt für Ein- und Auslagerplatz jeweils der Spielzeitanteil des Einzelspiels an. Es gilt daher mit Formel (5-19):

$$t_{DS, LP} = 2 * t_{ES, Ein, LP} = 4 * t_{LP, Ein} + 2 * t_{0, Lastw} + t_{0, Ausr} \quad (5-46)$$

Spielzeitanteil an der Basis

Der Spielzeitanteil an der Basis umfasst die Lastaufnahme zu Beginn des Spiels ($t_{0, Lastw}$) sowie die Abgabe der Last ($t_{0, Lastw}$) und das anschließende Ausrichten ($t_{0, Ausr}$):

$$t_{DS, Ba} = 2 * t_{0, Lastw} + t_{0, Ausr} \quad (5-47)$$

5.3.4 Bedientechnikbedarfsberechnung

Mit den Spielzeiten $t_{ES, Ein}$, $t_{ES, Aus}$ und t_{DS} lässt sich die Einzel- und Doppelspielleistung eines Bediengeräts berechnen:

$$P_{ES, Ein} = \frac{1 LE}{t_{ES, Ein}} \quad (5-48)$$

$$P_{ES, Aus} = \frac{1 LE}{t_{ES, Aus}} \quad (5-49)$$

$$P_{DS} = \frac{2 LE}{t_{DS}} \quad (5-50)$$

Unter Verwendung von Verfügbarkeit (η_{Verf}) und Auslastbarkeit (η_{Ausl}) des Bediengeräts/Bedienpersonals sowie des Doppelspielanteils (η_{DS}) ergibt sich daraus die Leistung eines Bediengeräts:

$$P_{Bed} = \eta_{Verf} * \eta_{Ausl} * [\eta_{DS} * P_{DS} + (1 - \eta_{DS}) * 0,5 * (P_{ES, Ein} + P_{ES, Aus})] \quad (5-51)$$

Aus Formel (5-1) ergibt sich umgeformt für die benötigte Anzahl an Bediengeräten/Personal:

$$n_{BED} = \frac{P_{Soll}}{P_{Bed}} \quad (5-52)$$

Sofern die Bedienung mit gassengebundenen Flurförderzeugen erfolgt, ist die Anzahl an benötigten Bediengeräten zu prüfen. Überschreitet der in Formel (5-52) berechnete Bedarf die Anzahl an Lagergassen, lässt sich die benötigte Anzahl an Bediengeräten nicht vorsehen und der betrachtete Lagerbereich ist ungültig.

5.4 Bedientechnikbedarfs- und Spielzeitberechnung bei Kommissionierung

Die Berechnung des Bedientechnikbedarfs der Kommissionierung ähnelt derjenigen der Einheitenlagerung. Auch hier wird mit Hilfe der Spielzeit die Leistung eines Bediengeräts ermittelt, woraus sich dann die Anzahl an Bediengeräten berechnen lässt. Die Kommissionierleistung wird gemessen in kommissionierten Positionen pro Stunde [Gud-1973, S. 99]. Die Kommissionierung erfolgt durch Bearbeitung von Kommissionieraufträgen, die im Rahmen des Projekts OptiMAL wie folgt definiert sind:

- In einem Entnahmespiel wird ein Kommissionierauftrag bearbeitet.

- Ein Kommissionierauftrag beinhaltet lediglich Artikel aus einem Lagerbereich.
- Ein Kommissionierauftrag besteht aus mehreren Positionen. Eine Position wiederum beinhaltet einen Artikel, der in Entnahmeeinheiten entnommen wird. Eine Position umfasst min. eine Entnahmeeinheit.
- Ein Kommissionierauftrag ist nicht zwangsläufig mit einem Kundenauftrag gleichzusetzen. Durch Zusammenfassen oder Aufteilen von Kundenaufträgen entstehen ein oder mehrere Kommissionieraufträge.

Demzufolge umfasst der Prozess Kommissionierung zwei unterschiedliche Spiele:

- Ein Kommissionierspiel umfasst die Entnahme von n_{Pos} Positionen beim Durchlaufen eines Lagerbereichs.
- Ein Nachschubspiel umfasst die Bereitstellung eines oder mehrerer Behälter (= Bereitstellereinheit) im Kommissionierbereich.

Auf Grund der Unterschiedlichkeit der Spiele sowie der dabei bewegten Güter werden in den meisten Fällen unterschiedliche Bedientechnikvarianten eingesetzt.

Eine weitere Unterscheidung besteht hinsichtlich der Bewegungsform (vgl. Kapitel 2.3.2):

- Bei ein-/zweidimensionaler Bewegung bewegen sich die Bediengeräte für Entnahme und Nachschub ebenerdig.
- Bei zwei-/dreidimensionaler Bewegung bewegen sich die Bediengeräte für Entnahme und Nachschub mit maßgeblicher Hubbewegung.

Dieser Unterscheidung folgend wurden für die beiden Bereiche unterschiedliche Modelle zur Spielzeitberechnung aus der Literatur ausgewählt und auf die Anforderungen des Projekts OptiMAL angepasst. In den folgenden Kapiteln 5.4.1 und 5.4.2 wird basierend auf der Arbeit von *Sadowsky* [Sad-2007] die Spielzeitberechnung bei ein-/zweidimensionaler Bewegung für Entnahme und Nachschub vorgestellt. Analog dazu erfolgt die Beschreibung des Modells für zwei-/dreidimensionale Bewegung basierend auf der Arbeit von *Gudehus* [Gud-1973] in Kapitel 5.4.3.

5.4.1 Spielzeitberechnung der Entnahme bei ein-/zweidimensionaler Bewegung

Für ein allgemeines Kommissionierspiel zur Entnahme von n_{Pos} Positionen lässt sich der Ablauf in Form eines Flussdiagramms gegliedert nach dem Ort darstellen (Abbildung 5-6). Die Wegzeitberechnung stützt sich auf die hier vorgenommene Unterteilung der Anteile nach dem Ort, an dem sie anfallen.

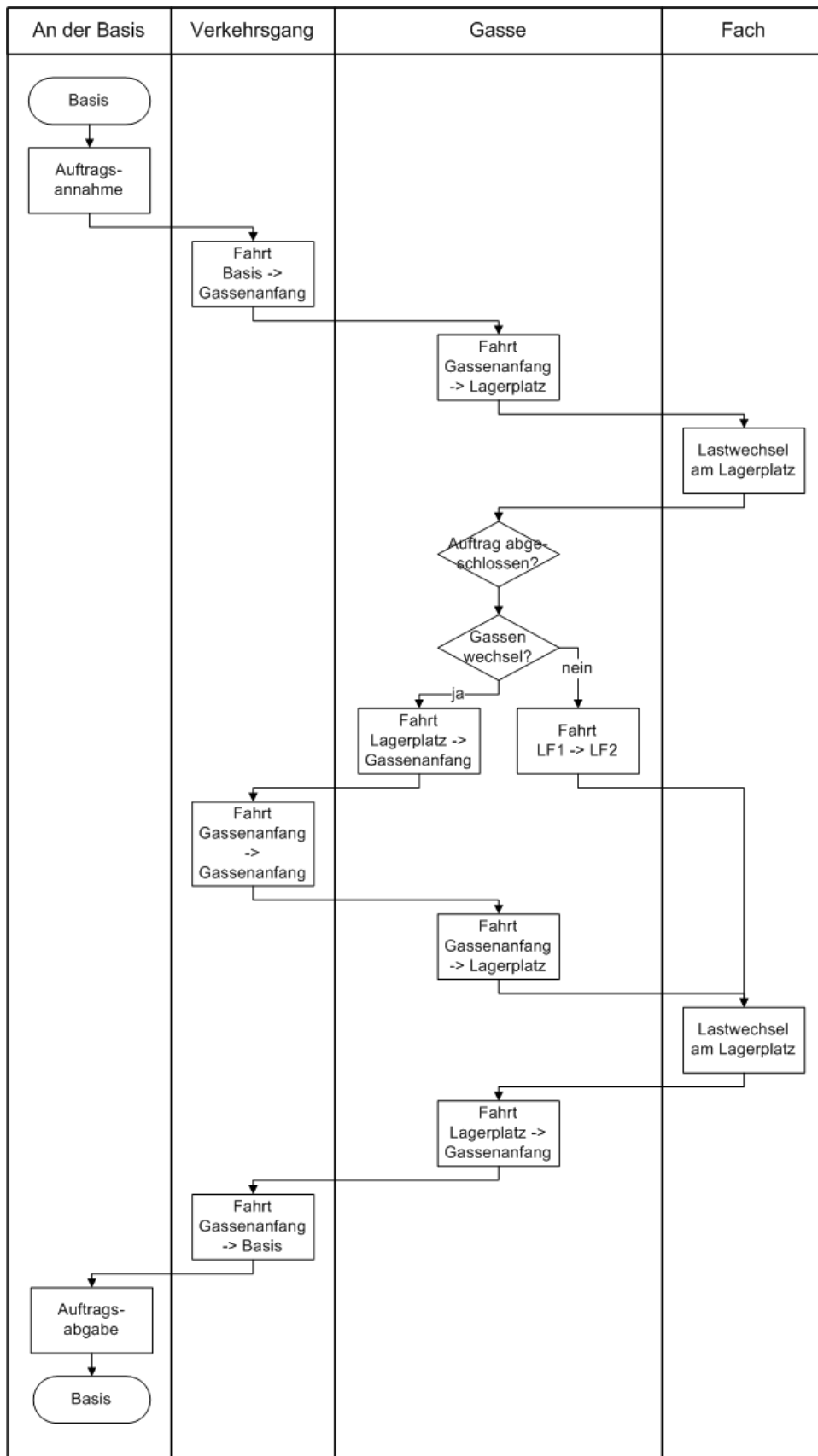


Abbildung 5-6: Flussdiagramm des Kommissionierspiels

Insgesamt besteht die Spielzeit pro Position (t_{KS}) aus zwei Zeitanteilen für die Zusammenführung von Kommissionierer und Ware ($t_{KS,Z}$) sowie für die ortsfest durchgeführten Tätigkeiten zur Bearbeitung ($t_{KS,B}$) [Sad-2007, S. 78]:

$$t_{KS} = t_{KS,Z} + t_{KS,B} \quad (5-53)$$

Da die Bearbeitungszeit auf Grund der Ortsunabhängigkeit vom Prozess und den Entnahmeeinheiten abhängig ist, kann sie als Eingabedaten erfasst oder daraus abgeleitet werden. Die Zusammenführungszeit dagegen variiert für unterschiedliche Geometrien und wird daher im Folgenden genauer untersucht. Dabei gelten folgende Annahmen:

- Pro Stopp wird eine Position entnommen.
- Die Lagerbelegung erfolgt über die Gassen hinweg so, dass die Zugriffshäufigkeit auf die einzelnen Lagergassen gleich ist. Einzige Ausnahme sind beidseitig bediente Regale. Hier ist die Zugriffshäufigkeit der Lagergassen unter Umständen nicht gleich, sondern hängt von der Orientierung der Gangmodule ab.
- Die Lagerbelegung innerhalb der Lagergassen erfolgt chaotisch oder nach exponential verteilter Zugriffshäufigkeit.
- Die Anfahr- und Bremsbeschleunigung des Bediengerätes in alle drei Raumrichtungen ist linear bis zum Erreichen der Maximalgeschwindigkeit (Abbildung 5-3).

Als Grundlage der Berechnung der Zusammenführungszeit muss die eindimensionale Wegzeitformel aus (5-2) auf die Anwendung für eine beliebige Anzahl Stopps verallgemeinert werden. Für die Wegzeit mit n_{Pos} Stopps gilt [Sad-2007, S. 111]:

$$t_n(s) = \begin{cases} (n_{Pos} + 1) * 2 * \sqrt{\frac{s}{n_{Pos} * b_m}} \text{ für } \frac{s}{n_{Pos}} < \frac{v_m^2}{b_m} \\ \frac{s}{v_m} + (n_{Pos} + 1) \frac{v_m}{b_m} \text{ sonst} \end{cases} \quad (5-54)$$

Die Zusammenführungszeit folgt daraus zu:

$$t_{KS,Z} = \frac{t_n}{n_{Pos}} \quad (5-55)$$

Die n_{Pos} Stopps zur Entnahme verteilen sich auf die gesamte zurückzulegende Strecke s . Diese besteht aus drei Teilstrecken zwischen Basis und Kommissionierbereich (s_B), im Verkehrsgang zum Gassenwechsel (s_{GW}) und in den Lagergassen (s_G):

$$s = s_B + s_G + s_{GW} \quad (5-56)$$

Die folgenden Formeln zur Berechnung der Teilstrecken stammen mit Ausnahme des Gassenwechselwegs bei beidseitiger Bedienung der Regaltechnik von *Sadowsky* [Sad-2007, S. 99ff.]. Formelzeichen, die sich auf die Geometrie beziehen, wurden an das Modell zur Bewertung der Geometrie (Kapitel 4) angepasst. Auf eine umfangreiche Wiedergabe der Herleitung wird verzichtet.

Berechnung des Basiswegs s_B

In seinem Modell unterscheidet *Sadowsky* zwischen innerer/äußerer sowie zentraler/dezentraler Basislage und folgt damit *Schulte* [Sch-1996, S. 68]. Da im Projekt *OptiMAL* die Lage und Ausprägung der Basis kein Freiheitsgrad ist, wird für alle zu vergleichenden Alternativen einheitlich die zentrale, innere Basislage gewählt (vgl. Abbildung 2-1). Demzufolge erfolgen alle an der Basis durchzuführenden Tätigkeiten (Auftragsannahme, Entgegennahme von Sammelbehältern, Abgabe der kommissionierten Entnahmeeinheiten, ...) am selben Ort.

Pro Kommissionierspiel fällt somit als Basisweg die zweimalige Querung des an der Lagerbereichsfront verlaufenden Verkehrsweges an:

$$s_B = 2 * b_{VG} \quad (5-57)$$

Berechnung des Gassenwechselwegs s_{GW}

Für den Gassenwechselweg, der an Vorder- oder Rückseite der Gangmodule zurückgelegt wird, muss unterschieden werden, ob der Kommissionierer Gassen auslassen darf, sofern es in der Gasse keine Position zu entnehmen gibt. Es gilt daher:

$$s_{GW} = \begin{cases} 2 * B & \text{ohne Überspringen} \\ 2 * \frac{n_{POS}}{n_{POS} + 1} * B & \text{mit Überspringen} \end{cases} \quad (5-58)$$

Die Größe B bezeichnet den Abstand zwischen erster und letzter Lagergasse und ist abhängig von der Layoutgrundform und der verwendeten Regaltechnik. Eine vollständige Aufstellung der Formeln zur Berechnung von s_{GW} abhängig von der Konfiguration beinhaltet Tabelle A-4 im Anhang.

Berechnung des Gassenwegs s_G

Die gewählte Bewegungs- und Lagerbelegungsstrategie legen fest, wie der Gassenweg zu berechnen ist. Die unterschiedlichen Formeln können dem Anhang (Tabelle A-5) entnommen werden. Dabei gilt für die verwendete Gassenlänge L :

$$L = l_{GM} - l_{AM,V} - l_{AM,H} \quad (5-59)$$

Die Lagerplatzbelegung nach Schnellläuferkonzentration wird durch eine negative Exponentialverteilung angenähert. Diese ist durch den λ -Wert definiert, dessen Kehrwert angibt, wie weit der Kommissionierer für einen Pick im Mittel in die Lagergasse laufen muss. Sofern die Schnellläuferkonzentration lediglich entlang der Gassenlänge erfolgt, kann die Regalfront in n Abschnitte mit einer dort gültigen mittleren Zugriffshäufigkeit eingeteilt werden (Abbildung 5-7). Mit dieser abschnittsweise konstanten Zugriffshäufigkeit P ergibt sich λ durch Summierung über alle Abschnitte zu

$$\lambda = \sum_i \frac{i}{n} * P\left(\frac{i}{n}\right) \quad (5-60)$$

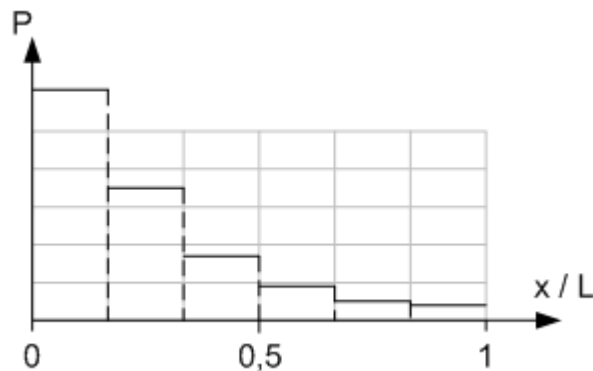


Abbildung 5-7: Abschnittsweise konstante Zugriffswahrscheinlichkeit zur Berechnung von λ

5.4.2 Spielzeitberechnung des Nachschubs bei ein-/zweidimensionaler Bewegung

Für die Bereitstellung von Nachschub in der ein-/zweidimensionalen Kommissionierung gibt es abhängig von der verwendeten Regal- und Bedientechnik zwei Möglichkeiten: Die Bereitstellung einer einzelnen Bereitstellungseinheit erfolgt beispielsweise bei Kommissionierung von auf Paletten befindlichen Entnahmeeinheiten. Die Spielzeit eines Nachschubspiels gleicht dann einem Einzelspiel zur Einlagerung der Einheitenlagerung unter Verwendung der entsprechenden Geometrie- und Bediengerätedaten (vgl. Kapitel 5.3.1):

$$t_{NS} = t_{ES,Ein} \quad (5-61)$$

Sofern mehrere Bereitstellungseinheiten in den Kommissionierbereich gebracht werden, beispielsweise Kleinladungsträger in einen Fachbodenregalbereich, gleicht die Spielzeitberechnung derjenigen der Kommissionierung.

$$t_{NS} = t_{KS} \quad (5-62)$$

5.4.3 Spielzeitberechnung der Entnahme bei zwei-/dreidimensionaler Bewegung

Die Spielzeitberechnung der Entnahme ist bei *Sadowsky* lediglich für den ein-/zweidimensionalen Fall ausgeführt. Um mit dem zu entwickelnden Modell auch den Bedientechnikbedarf der Kommissionierung bei zwei-/dreidimensionaler Bewegungsform abdecken zu können, werden die Ausführungen von *Gudehus* [Gud-1973, S. 72ff.] integriert. Der Ablauf des allgemeinen Kommissionierspiels gilt auch in diesem Fall (Abbildung 5-6), jedoch werden Gassenwechsel nicht berücksichtigt. Zu Grunde liegt die Annahme, dass der Kommissionierauftrag so gebildet wird, dass sich alle Positionen in der selben Gasse befinden.

Die Spielzeit setzt sich zwar auch in diesem Fall aus Zeitanteilen für die Zusammenführung und Bearbeitung zusammen, jedoch ist es für die Anwendung des Modells von *Gudehus* zweckmäßig, die Spielzeitanteile wie bei der Einheitenlagerung nach dem Ort einzuteilen, an dem sie stattfinden: an der Basis ($t_{KS,Ba}$), im Verkehrsgang ($t_{KS,VG}$), in der Gasse ($t_{KS,Ga}$) oder direkt am Lagerfach ($t_{KS,LF}$).

$$t_{KS} = t_{KS,Ba} + t_{KS,VG} + t_{KS,Ga} + t_{KS,LF} \quad (5-63)$$

Die bei der Berechnung geltenden Annahmen gleichen denen der ein-/zweidimensionalen Fortbewegung (5.4.1). Zusätzlich ist zu beachten, dass keine beidseitig bedienbare Regaltechnik verwendet werden kann, sondern lediglich Palettenregale für diese Systeme betrachtet werden. Sofern die Bediengeräte der Gasse keine Gassenwechsel durchführen können und im Verkehrsgang Bediengeräte eines anderen Typs die Gassen ver- und entsorgen, muss die Spielzeitberechnung getrennt für beide Typen durchgeführt werden. Es gilt dann:

$$t_{KS,Bed,VG} = t_{KS,Ba} + t_{KS,VG} \quad (5-64)$$

$$t_{KS,Bed,Ga} = t_{KS,Ga} + t_{KS,LF} \quad (5-65)$$

Berechnung des Zeitanteils an der Basis $t_{KS,Ba}$

An der Basis ist zu Beginn des Kommissionierspiels die Aufnahme des Sammelbehälters ($t_{0,Lastw}$) durchzuführen. Analog wird zum Abschluss des Kommissionierspiels der Sammelbehälter abgegeben ($t_{0,Lastw}$) und das Bediengerät zum Start des nächsten

Spiels ausgerichtet ($t_{0,Ausr}$). Diese Zeitanteile werden auf die Anzahl kommissionierter Positionen verteilt:

$$t_{KS,Ba} = \frac{2 * t_{0,Lastw} + t_{0,Ausr}}{n_{Pos}} \quad (5-66)$$

Berechnung des Zeitanteils im Verkehrsgang $t_{KS,VG}$

Die Fahrt des Bediengeräts im Verkehrsgang ähnelt derjenigen eines Einzelspiels der Einheitenlagerung, wobei jedoch die konstanten Zeitanteile abweichen. Zusätzlich wird die benötigte Zeit auf die Anzahl kommissionierter Positionen verteilt. Es ergibt sich mit $t_{B \rightarrow G}$ nach Kapitel 5.3.1:

$$t_{KS,VG} = \frac{2 * t_{B \rightarrow G} + t_{0,Lastw}}{n_{Pos}} \quad (5-67)$$

Berechnung des Zeitanteils in der Lagergasse $t_{KS,Ga}$

Der Zeitanteil in der Lagergasse setzt sich aus der Wegzeit pro Position sowie einem Zeitbedarf $t_{0,Ga \rightarrow VG}$ zusammen, der abhängig von bestehender Gassenbindung entweder in der Übergabe des Sammelbehälters an die Bedientechnik im Verkehrsgang oder im Ausrichten des Bediengeräts für die Weiterfahrt im Verkehrsgang besteht:

$$t_{KS,Ga} = t_{Weg} + t_{0,Ga \rightarrow VG} \quad (5-68)$$

Die Berechnung der Wegzeit pro Position (t_{Weg}) sind abhängig von der Bewegungsstrategie. Die ausführliche Herleitung findet sich für die drei Strategien v-Streifenstrategie, einfache Strategie und Fahrt ohne Strategie bei *Gudehus* [Gud-1973, S. 72ff.]. Die dort entwickelten Formeln sind in Anhang B zusammengestellt. Hinzu kommt der Zeitanteil für den Übergang zum Verkehrsgang, der auf die kommissionierten Positionen verteilt wird:

$$t_{0,Ga \rightarrow VG} = \begin{cases} \frac{t_{0,Lastw}}{n_{Pos}} & \text{bei Gassenbindung} \\ \frac{t_{0,Ausr}}{n_{Pos}} & \text{ohne Gassenbindung} \end{cases} \quad (5-69)$$

Berechnung des Zeitanteils im Lagerfach $t_{KS,LF}$

Der Zeitanteil am Lagerfach fasst sämtliche dort durchzuführenden Tätigkeiten wie Greifen der Entnahmeeinheiten, Ablegen im Sammelbehälter sowie Quittieren der Entnahme zusammen und kann als Eingabedaten erhoben werden:

$$t_{KS,LF} = t_{0,LF} \quad (5-70)$$

5.4.4 Spielzeitberechnung des Nachschubs bei zwei-/dreidimensionaler Bewegung

Da lediglich Palettenregale als Regaltechnik bei zwei-/dreidimensionaler Bewegung betrachtet werden, lässt sich die Bereitstellung von Nachschub als Einzelspiel zur Einlagerung mit simultaner Bewegung betrachten. Die Spielzeit (t_{NS}) ermittelt sich daher mit den Formeln aus Kapitel 5.3.1, gegebenenfalls unter Berücksichtigung verschiedener Bedientechniktypen bei Gassenbindung ($t_{NS,Bed,VG}$ und $t_{NS,Bed,Ga}$).

5.4.5 Bedientechnikbedarfsberechnung

Auf Grund der unterschiedlichen Konfigurationen für ein-/zweidimensionale und zwei-/dreidimensionale Kommissionierung wird die Bedientechnikbedarfsberechnung getrennt durchgeführt. Beide folgen jedoch grundsätzlich dem für die Einheitenlagerung erläuterten Vorgehen: aus der Spielzeit folgt die Leistung eines Bediengeräts, welche sich wiederum mit der Sollleistung in Relation setzen lässt, um die benötigte Anzahl an Bediengeräten des Typs zu erhalten.

Bedientechnikbedarfsberechnung bei ein-/zweidimensionaler Bewegung

Für ein-/zweidimensionale Kommissionierung erfolgt die Entnahme jeweils in Kommissionierspielen. Für die Kommissionierleistung eines Bediengeräts ergibt sich unter Verwendung der Verfügbarkeit (η_{Verf}), Auslastbarkeit (η_{Ausl}) und Kommissionierspielzeit (t_{KS} aus (5-53)):

$$P_{Bed,Ent} = \frac{\eta_{Verf} * \eta_{Ausl}}{t_{KS}} \left[\frac{POS}{h} \right] \quad (5-71)$$

Die insgesamt zu erbringende Sollleistung der Entnahme ($P_{Soll,Ent}$) ist durch das eingeebene Sortiment sowie die zugehörigen Aufträge definiert und daher als Eingabegröße bekannt oder berechenbar. Somit kann die Anzahl an benötigten Bediengeräten zur Entnahme berechnet werden:

$$n_{Bed,Ent} = \frac{P_{Soll,Ent}}{P_{Bed,Ent}} \quad (5-72)$$

Der Nachschub wird entweder in Einzelspielen der Einheitenlagerung oder unter Verwendung von Kommissionierspielen bereitgestellt. Die Nachschubleistung eines Bediengeräts ergibt sich mit der Verfügbarkeit (η_{Verf}), Auslastbarkeit (η_{Ausl}) sowie der entsprechenden Spielzeit (t_{NS} aus (5-61) oder (5-62)) zu:

$$P_{Bed,Nach} = \frac{\eta_{Verf} * \eta_{Ausl}}{t_{NS}} \left[\frac{BE}{h} \right] \quad (5-73)$$

Die zu erbringende Sollleistung für den Nachschub muss aus der Sollleistung der Entnahme ermittelt und über den Füllgrad der Bereitstellereinheit ($\eta_{Füll}$) umgerechnet werden:

$$P_{Soll,Nach} = \frac{P_{Soll,Ent} \left[\frac{POS}{h} \right]}{\eta_{Füll} \left[\frac{POS}{BE} \right]} \quad (5-74)$$

Es folgt die Anzahl benötigter Bediengeräte mit der bekannten Formel:

$$n_{Bed,Nach} = \frac{P_{Soll,Nach}}{P_{Bed,Nach}} \quad (5-75)$$

Bedientechnikbedarfsberechnung bei zwei-/dreidimensionaler Bewegung

Bei zwei-/dreidimensionaler Bewegung ist die Berechnung des Bedientechnikbedarfs abhängig davon, ob die in der Gasse eingesetzten Bediengeräte gassengebunden operieren. Ohne Gassenbindung gilt:

$$P_{Bed,Ent} = \frac{\eta_{Verf} * \eta_{Ausl}}{t_{KS}} \left[\frac{POS}{h} \right] \quad (5-76)$$

$$n_{Bed,Ent} = \frac{P_{Soll,Ent}}{P_{Bed,Ent}} \quad (5-77)$$

$$P_{Bed,Nach} = \frac{\eta_{Verf} * \eta_{Ausl}}{t_{NS}} \left[\frac{BE}{h} \right] \quad (5-78)$$

$$P_{Soll,Nach} = \frac{P_{Soll,Ent} \left[\frac{POS}{h} \right]}{\eta_{Füll} \left[\frac{POS}{BE} \right]} \quad (5-79)$$

$$n_{Bed,Nach} = \frac{P_{Soll,Nach}}{P_{Bed,Nach}} \quad (5-80)$$

Operieren die Bediengeräte in den Lagergassen jedoch gassengebunden, kann ihre Anzahl nicht frei gewählt werden, sondern entspricht der mit dem Layoutfaktor nach (4-67) multiplizierten Gassenzahl:

$$n_{Bed,Ga} = f_{Layout} * n_{GM,x} \quad (5-81)$$

Zu prüfen ist nun, ob diese durch die Geometrie festgelegte Anzahl die geforderte Entnahme- und Nachschubleistung erbringen kann. Die Leistung eines Bediengerätes für beide Teilprozesse ($P_{Bed,Ent,Ga}$, $P_{Bed,Nach,Ga}$) werden wie bekannt berechnet und mit den von Sortiment, Aufträgen und Füllgrad der Bereitstellenheit abhängigen zugehörigen Sollleistungen ($P_{Soll,Ent,Ga}$, $P_{Soll,Nach,Ga}$) zur benötigten Bediengerätezahl $n^*_{Bed,Ga}$ verrechnet:

$$P_{Bed,Ent,Ga} = \frac{\eta_{Verf} * \eta_{Ausl}}{t_{KS,Bed,Ga}} \left[\frac{POS}{h} \right] \quad (5-82)$$

$$P_{Bed,Nach,Ga} = \frac{\eta_{Verf} * \eta_{Ausl}}{t_{NS,Bed,Ga}} \left[\frac{BE}{h} \right] \quad (5-83)$$

$$P_{Soll,Nach} = \frac{P_{Soll,Ent} \left[\frac{POS}{h} \right]}{\eta_{Füll} \left[\frac{POS}{BE} \right]} \quad (5-84)$$

$$n^*_{Bed,Ga} = \frac{P_{Bed,Ent,Ga}}{P_{Soll,Ent}} + \frac{P_{Bed,Nach,Ga}}{P_{Soll,Nach}} \quad (5-85)$$

Der Vergleich dieser Bediengerätezahl mit der benötigten nach (5-80) kann dazu führen, dass die zu bewertende Geometrie als ungültig eingestuft und verworfen wird:

$$n_{Bed,Ga} \geq n^*_{Bed,Ga} \rightarrow \text{Geometrie gültig} \quad (5-86)$$

Der Bedarf an Bediengeräten zur Versorgung der Lagergassen kann für die Teilprozesse Entnahme und Nachschub addiert werden, da es sich jeweils um dieselbe Bedientechnikvariante handelt (Formeln (5-87) bis (5-89)). Die Sollleistungen ($P_{Soll,Ent}$, $P_{Soll,Nach}$) ergeben sich dabei aus Formel (5-74).

$$P_{Bed,Ent,VG} = \frac{\eta_{Verf} * \eta_{Ausl}}{t_{KS,Bed,VG}} \left[\frac{POS}{h} \right] \quad (5-87)$$

$$P_{Bed,Nach,VG} = \frac{\eta_{Verf} * \eta_{Ausl}}{t_{NS,Bed,VG}} \left[\frac{BE}{h} \right] \quad (5-88)$$

$$n_{Bed,VG} = \frac{P_{Bed,Ent,VG}}{P_{Soll,Ent}} + \frac{P_{Bed,Nach,VG}}{P_{Soll,Nach}} \quad (5-89)$$

5.5 Bedientechnikbedarfs- und Spielzeitberechnung bei kombinierten Kommissionier-/Nachschubbereichen

Bei Kombination von Kommissionierung mit der Lagerung von Nachschub-Ladungsträgern in einem Lagerbereich existiert kein Modell in der Literatur, das die Berechnung der Spielzeiten und des Bedientechnikbedarfs ermöglicht. Die beschriebenen Modelle der Einheitenlagerung und Kommissionierung lassen sich jedoch mit einigen Anpassungen für die auftretenden Spiele nutzen. Da es sich um einen Sonderfall der Kommissionierung handelt, gelten die Annahmen aus Kapitel 5.4. Zusätzlich gilt:

- Entnommene LE aus dem Nachschubbereich werden komplett auf Lagerplätze in der Kommissionierung verteilt. Es gibt also keine Anbrucheinheiten im Nachschubbereich.
- Leergut wird jeweils bei der Bereitstellung von Nachschub entsorgt und zur Basis gebracht.
- Die Entnahme erfolgt durch Bedientechnikvarianten mit ein-/zweidimensionaler Bewegungsform (z. B. Person mit Sammelfahrzeug).
- Die Einlagerung von Nachschub sowie die Umlagerung in den Kommissionierbereich erfolgt durch Bedientechnikvarianten mit Eignung für Breitgang und additiver Bewegungsform (z. B. Gegengewichtsstapler).

Je nach Regaltechnik im Kommissionierbereich (Fachbodenregal, Einschubregal, Bodenzeilenlager, vgl. Kapitel 2.2.3) treten unterschiedliche Spiele auf. Bei Kommissionierung aus dem Fachboden- und Einschubregal erfolgt die Lagerung im Nachschubbereich in Ladehilfsmitteln, die als Außenbehälter dienen (z. B. Euro-Palette). Jeder Außenbehälter beinhaltet wiederum mehrere Innenbehälter (z. B. KLT), die als Bereitstellungseinheit im Kommissionierbereich dienen. Die Umlagerung von Nachschub in den Kommissionierbereich beinhaltet also die Zerlegung des Außenbehälters und die Einlagerung der enthaltenen Innenbehälter mit mehreren Stopps und erfolgt damit nach Vorlage der ein-/zweidimensionalen Kommissionierung. Es existieren in diesem Fall vier unterschiedliche Spiele:

- Entnahmespiel
- Einzelspiel zur Einlagerung einer Nachschub-LE (im Folgenden kurz: Einzelspiel zur Einlagerung)
- Einzelspiel zur Zerlegung einer Nachschub-LE und Einlagerung im Kommissionierbereich (im Folgenden kurz: Einzelspiel zur Umlagerung)

- Doppelspiel zur Einlagerung einer Nachschub-LE, zur Zerlegung einer weiteren Nachschub-LE und Einlagerung im Kommissionierbereich (im Folgenden kurz: Doppelspiel)

Wird dagegen aus einem Bodenzeilenlager kommissioniert, erfolgt keine Zerlegung des Außenbehälters bei der Umlagerung. Als Grundlage der Spielzeitberechnung dient für die Umlagerspiele daher die Einheitenlagerung. Auch hier existieren vier unterschiedliche Spiele:

- Entnahmespiel
- Einzelspiel zur Einlagerung einer Nachschub-LE (im Folgenden kurz: Einzelspiel zur Einlagerung)
- Einzelspiel zur Umlagerung einer Nachschub-LE in den Kommissionierbereich (im Folgenden kurz: Einzelspiel zur Umlagerung)
- Doppelspiel zur Einlagerung einer Nachschub-LE und Umlagerung einer weiteren Nachschub-LE in den Kommissionierbereich (im Folgenden kurz: Doppelspiel)

5.5.1 Spielzeitberechnung der Entnahme

Das Entnahmespiel entspricht demjenigen bei Kommissionierung mit ein-/zweidimensionaler Bewegung. Es gelten daher uneingeschränkt die Ausführungen aus Kapitel 5.4.1.

5.5.2 Grundlegende Formeln für wiederkehrende Spielanteile

In den Bereichen der Einheitenlagerung und Kommissionierung sowie bei der Entnahme aus kombinierten Lagerbereichen konnten aus der Literatur bekannte Modelle zur Berechnung der Spielzeit und des Bediengerätebedarfs angewendet werden. Für die Nachschubspiele der Kommissionierung mit Nachschub sind die bisher vorgestellten Formeln nicht ohne größere Anpassungen anwendbar. Aus diesem Grund wurden wiederkehrende Spielanteile identifiziert. Deren Spielzeit wurde mit Hilfe der Modelle für Einheitenlagerung und Kommissionierung ermittelt. Die jeweiligen Spiele lassen sich dann aus diesen Spielanteilen kombinieren. Um die Spielzeitanteile aneinanderfügen zu können, werden die Spielzeitanteile so gestaltet, dass das Bediengerät jeweils zum Abschluss des Spielzeitanteils ausgerichtet wird.

Wichtig sind auch hier die Koordinaten der repräsentativen Lagerplätze. In x-Richtung gilt unverändert Formel (5-10). Abbildung 5-8 zeigt die relevanten Höhenverhältnisse

in den betrachteten Lagerbereichen. Daraus lassen sich die y-Koordinaten der repräsentativen Lagerplätze in beiden Bereichen ableiten:

$$y_{LP,rep,Komm} = \frac{h_{FM,Komm}}{2} \quad (5-90)$$

$$y_{LP,rep,Nach} = \frac{h_{LM} - h_{AM,O,Nach} + h_{FM,Komm}}{2} \quad (5-91)$$

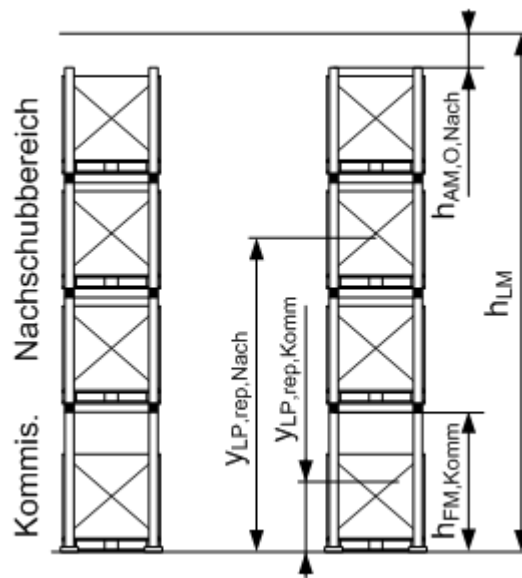


Abbildung 5-8: Spielzeitrelevante Höhenverhältnisse im Lagerbereich mit kombinierter Kommissionierung und Nachschub

In den folgenden Kapiteln wird jeweils die fertige Spielzeitanteilformel vorgestellt und auf das zugrunde liegende Kapitel verwiesen. Dort können eventuell benötigte weitere Größen entnommen werden.

Spielzeitanteil 1: Einlagern in den Nachschubbereich

Der Spielzeitanteil „Einlagern in den Nachschubbereich“ ($t_{Ein,Nach}$) umfasst die Aufnahme einer LE an der Basis, die Fahrt zu einem Lagerfach im Nachschubbereich, die dortige Abgabe der Lagereinheit sowie das abschließende Ausrichten des Bediengeräts für den nächsten Spielanteil. Er ergibt sich aus dem Einzelspiel zur Einlagerung mit additiver Fahrt (Kapitel 5.3.1):

$$t_{Ein,Nach} = t(s_{B \rightarrow G}) + t_x(x_{LP,rep}) + t_y(y_{LP,rep,Nach}) + 2 * t_{LP,ein} + 2 * t_{0,Lastw} + 4 * t_{0,Ausr} \quad (5-92)$$

Spielzeitanteil 2: Aufnahme einer Nachschublagerereinheit ab Basis

Der Spielzeitanteil „Aufnahme einer Nachschublagerereinheit ab Basis“ ($t_{Auf,Basis}$) umfasst die leere Fahrt von der Basis zu einem Lagerfach im Nachschubbereich und dortige Aufnahme einer Lagereinheit mit abschließendem Ausrichten. Er ergibt sich aus dem Einzelspiel zur Auslagerung mit additiver Fahrt (Kapitel 5.3.2):

$$t_{Auf,Basis} = t(s_{B \rightarrow G}) + t_x(x_{LP,rep}) + t_Y(y_{LP,rep,Nach}) + 2 * t_{LP,ein} + t_{0,Lastw} + 4 * t_{0,Ausr} \quad (5-93)$$

Spielzeitanteil 3: Aufnahme einer Nachschub-LE ab Nachschubbereich

Der Spielzeitanteil „Aufnahme einer Nachschublagerereinheit ab Nachschubbereich“ ($t_{Auf,Nach}$) umfasst die leere Fahrt von einem Lagerplatz im Nachschubbereich zu einem weiteren Lagerplatz im Nachschubbereich. Dort wird eine Lagereinheit aufgenommen und das Bediengerät ausgerichtet. Der Spielzeitanteil ergibt sich aus einem Doppelspiel mit additiver Fahrt (Kapitel 5.3.3):

$$t_{Auf,Nach} = (1 - P_{GW}) * t_{\Delta x \Delta y} + P_{GW} * (2 * t_x(x_{LP,rep}) + 2 * t_Y(y_{LP,rep,Nach}) + t(s_{G1 \rightarrow G2}) + 4 * t_{0,Ausr}) + 2 * t_{LP,ein} + t_{0,Lastw} + t_{0,Ausr} \quad (5-94)$$

Für $t_{\Delta x \Delta y}$ gilt dabei:

$$t_{\Delta x \Delta y} = t_x(2/3 * x_{LP,rep}) + 2 * t_Y(y_{LP,rep,Nach}) + 3 * t_{0,Ausr} \quad (5-95)$$

Spielzeitanteil 4: Bereitstellung einer Nachschub-LE

Der Spielzeitanteil „Bereitstellung einer Nachschub-LE“ ($t_{Ber,LE}$) umfasst die Fahrt von einem Lagerplatz im Nachschubbereich zu einem Lagerplatz im Kommissionierbereich und die dortige Abgabe der Lagereinheit mit abschließendem Ausrichten. Dieser Spielzeitanteil ist anwendbar, wenn die Lagereinheit als ganzes bereitgestellt wird (Lager Einrichtung Palettenregal mit Bodenzeilenlager). Der Spielzeitanteil ergibt sich aus einem Doppelspiel mit additiver Fahrt (Kapitel 5.3.3):

$$t_{Ber,LE} = (1 - P_{GW}) * t_{\Delta x \Delta y} + P_{GW} * (2 * t_x(x_{LP,rep}) + t_Y(y_{LP,rep,Nach}) + t_Y(y_{LP,rep,Komm}) + t(s_{G1 \rightarrow G2}) + 4 * t_{0,Ausr}) + 2 * t_{LP,ein} + t_{0,Lastw} + t_{0,Ausr} \quad (5-96)$$

Für $t_{\Delta x \Delta y}$ gilt dabei:

$$t_{\Delta x \Delta y} = t_x \left(\frac{2}{3} * x_{LP,rep} \right) + t_Y(y_{LP,rep,Nach}) + t_Y(y_{LP,rep,Komm}) + 3 * t_{0,Ausr} \quad (5-97)$$

Spielzeitanteil 5: Fahrt zum Start eines Einlagerspiels (Kommissionierung)

Der Spielzeitanteil „Fahrt zum Start eines Einlagerspiels (Kommissionierung)“ ($t_{Start,Komm}$) beinhaltet die Fahrt von einem Lagerplatz im Nachschubbereich zum Anfang der Lagergasse und das abschließende Ausrichten. Es ergibt sich aus dem Einzelspiel zur Auslagerung mit additiver Fahrt (Kapitel 5.3.2):

$$t_{Start,Komm} = t_x(x_{LP,rep}) + t_Y(y_{LP,rep,Nach}) + 2 * t_{0,Ausr} \quad (5-98)$$

Spielzeitanteil 6: Bereitstellung von Nachschub als Kommissionierspiel

Der Spielzeitanteil „Bereitstellung von Nachschub als Kommissionierspiel“ ($t_{Ber,Komm}$) umfasst ein Kommissionierspiel mit Stichgangstrategie ohne Wiederholung ab dem Beginn einer Gasse bis zur Basis. Es ergibt sich aus der Spielzeitberechnung der Entnahme bei ein-/zweidimensionaler Kommissionierung (Kapitel 5.4.1):

$$t_{Ber,Komm} = t_n(s_{GWW} + s_{GW} + s_{G \rightarrow B}) + t_{0,Ausr} \quad (5-99)$$

Spielzeitanteil 7: Rückfahrt zur Basis aus dem Nachschubbereich

Der Spielzeitanteil „Rückfahrt zur Basis aus dem Nachschubbereich“ ($t_{Rück,Nach}$) beinhaltet die Fahrt von einem Lagerplatz im Nachschubbereich zur Basis und das abschließende Ausrichten. Er ergibt sich aus dem Einzelspiel zur Auslagerung mit additiver Fahrt (Kapitel 5.3.2):

$$t_{Rück,Nach} = t(s_{B \rightarrow G}) + t_x(x_{LP,rep}) + t_Y(y_{LP,rep,Nach}) + 3 * t_{0,Ausr} \quad (5-100)$$

Spielzeitanteil 8: Rückfahrt zur Basis aus dem Kommissionierbereich

Der Spielzeitanteil „Rückfahrt zur Basis aus dem Kommissionierbereich“ ($t_{Rück,Komm}$) beinhaltet die Fahrt von einem Lagerplatz im Kommissionierbereich zur Basis und das abschließende Ausrichten. Er ergibt sich aus dem Einzelspiel zur Auslagerung mit additiver Fahrt (Kapitel 5.3.2):

$$t_{Rück,Komm} = t(s_{B \rightarrow G}) + t_x(x_{LP,rep}) + t_Y(y_{LP,rep,Komm}) + 3 * t_{0,Ausr} \quad (5-101)$$

5.5.3 Spielzeitberechnung des Einzelspiels zur Einlagerung

Das Einzelspiel zur Einlagerung setzt sich zusammen aus dem Einlagern in den Nachschubbereich sowie der Rückfahrt aus dem Nachschubbereich zur Basis:

$$t_{ES, Ein} = t_{Ein, Nach} + t_{Rück, Nach} \quad (5-102)$$

5.5.4 Spielzeitberechnung des Einzelspiels zur Umlagerung

Die Spielzeitberechnung des Einzelspiels zur Umlagerung ($t_{ES, Um}$) kann auf zwei Arten erfolgen: bei Bereitstellung ganzer Außenbehälter im Kommissionierbereich durch Analogie mit dem Doppelspiel der Einheitenlagerung, bei Bereitstellung von Innenbehältern zusammengesetzt aus Spielzeitanteilen der Einheitenlagerung und Kommissionierung.

Spielzeitberechnung des Einzelspiels zur Umlagerung bei Bereitstellung von Außenbehältern

Bei Bereitstellung ganzer Außenbehälter im Kommissionierbereich besteht das Spiel aus der leeren Fahrt von der Basis zur Aufnahme einer Lagereinheit, der anschließenden Fahrt zu einem Lagerplatz im Kommissionierbereich mit Bereitstellung sowie der Rückfahrt zur Basis aus dem Kommissionierbereich:

$$t_{ES, Um} = t_{Auf, Basis} + t_{Ber, LE} + t_{Rück, Komm} \quad (5-103)$$

Spielzeitberechnung des Einzelspiels zur Umlagerung bei Bereitstellung von Innenbehältern

Wird die aus dem Lagerbereich ausgelagerte Nachschub-LE für die Einlagerung im Kommissionierbereich zerlegt, ändert sich die Spielzeitberechnung. Das Spiel beginnt zwar wie bei der Bereitstellung von Außenbehältern mit der leeren Fahrt in den Nachschubbereich, das Bediengerät führt dann aber ein Kommissionierspiel gemäß Stichgangstrategie ohne Wiederholung ab dieser Gasse durch den Lagerbereich durch:

$$t_{ES, Um} = t_{Auf, Basis} + t_{Start, Komm} + t_{Ber, Komm} \quad (5-104)$$

5.5.5 Spielzeitberechnung des Doppelspiels

Bei kombinierter Kommissionierung und Nachschublagerung ist auch die Zusammenfassung eines Einlager- und eines Umlagerspiels zu einem Doppelspiel möglich. Auch

hier muss wieder zwischen Bereitstellung ganzer Außenbehälter oder Zerlegung in Innenbehälter unterschieden werden.

Spielzeitberechnung des Doppelspiels bei Bereitstellung von Außenbehältern

Das Doppelspiel bei der Bereitstellung von Außenbehältern beginnt mit dem Einlagern einer LE in den Nachschubbereich. Anschließend fährt das Bediengerät zu einem weiteren Lagerplatz im Nachschubbereich, wo es eine Lagereinheit aufnimmt und in den Kommissionierbereich umlagert. Von dort erfolgt die Rückfahrt:

$$t_{DS} = t_{Ein,Nach} + t_{Auf,Nach} + t_{Ber,LE} + t_{Rück,Komm} \quad (5-105)$$

Spielzeitberechnung des Doppelspiels bei Bereitstellung von Innenbehältern

Der Beginn des Doppelspiels bei Zerlegung der Nachschub-LE gleich demjenigen ohne Zerlegung. Eine LE wird in den Nachschubbereich eingelagert und von dort aus eine weitere Lagereinheit aufgenommen. Anschließend erfolgt die Rückfahrt zum Gasenanfang und die Bereitstellung mit Hilfe eines Kommissionierspiels:

$$t_{DS} = t_{Ein,Nach} + t_{Auf,Nach} + t_{Start,Komm} + t_{Ber,Komm} \quad (5-106)$$

5.5.6 Bedientechnikbedarfsberechnung

Der Entnahmeprozess bei kombinierter Kommissionierung und Nachschub-Lagerung gleicht dem bei ein-/zweidimensionaler Kommissionierung. Es lassen sich daher ohne Einschränkungen die Formeln aus Kapitel 5.4.5 verwenden.

Der Nachschubprozess bestehend aus Einzel- und Doppelspielen erfolgt analog zur Einheitenlagerung. Die Einzel- und Doppelspielleistung ergeben sich zu:

$$P_{ES,Ein} = \frac{1LE}{t_{ES,Ein}} \quad (5-107)$$

$$P_{ES,Um} = \frac{1LE}{t_{ES,Um}} \quad (5-108)$$

$$P_{DS,Um} = \frac{2LE}{t_{DS}} \quad (5-109)$$

Anschließend kann mit den Formeln (5-51) und (5-52) der Bedientechnikbedarf im Nachschubbereich berechnet werden.

6 Modell zur Bewertung der Kosten

Um operationale Ziele für die Lösung des Planungsproblems zu gewinnen und verschiedene Planungsalternativen an Hand einer metrischen Skala vergleichen zu können, ist eine Überführung in monetäre Zielgrößen nötig. Um zu einem hierfür geeigneten Modell zu gelangen, wird im Folgenden ein geeignetes Verfahren zur Bewertung der Kosten ausgewählt (Kapitel 6.1) und anschließend für manuell bediente Lagersysteme angepasst (Kapitel 6.2).

6.1 Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Ziel der Planung manuell bedienter Lagersysteme ist es einerseits, die Ausprägung der besten Lösung zu ermitteln. Darüber hinaus steht jedoch hinter der Planungsaufgabe aus betriebswirtschaftlicher Sicht das Ziel, Aussagen zum Erfolgspotenzial der Planung als Investition zu tätigen. Da diesem Erfolgspotenzial durch langfristige Kapitalbindung Risiken gegenüberstehen, muss die Entscheidung über die Investition abgesichert sein [Put-2011, S. 19]. Diese Aufgabe ist im Modell zur Bewertung des Faktors Kosten abgebildet, welches zwei Anforderungen erfüllen muss:

- Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen auf die Kosten manuell bedienter Lagersysteme
- Berechnung der Zielgrößen aus dem Bereich Kosten

Es stehen verschiedene Verfahren der Investitionsrechnung zur Verfügung, die etabliert und allgemein bekannt sind, dabei jedoch eine unterschiedliche Eignung für den Einsatzfall im Forschungsprojekt OptiMAL aufweisen. Diese Verfahren lassen sich in die zwei Gruppen der statischen und dynamischen Investitionsrechnung einteilen, basierend auf dem zeitlichen Anfall der monetären Größen [Put-2011, S. 21]. Beide Gruppen beinhalten vier Verfahren, deren wichtigste Charakteristika von *Beninger* [Ben-2015] übersichtlich zusammengefasst wurden (siehe Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2). Ausführliche Beschreibungen der Verfahren finden sich in der einschlägigen Fachliteratur, beispielsweise bei *Putnoki et al.* oder *Pape* [Put-2011, S. 21ff.; Pap-2015, S. 321ff.]

6 Modell zur Bewertung der Kosten

Verfahren Kriterien	Statische Verfahren				Dynamische Verfahren			
	Kosten- vergleich	Gewinn- vergleich	Rentabi- lität	Statische Amortisation	Kapital- wert	Annuität	Interner Zinsfuß	Dynamische Amortisation
Zeitbezug	keine Betrachtung des zeitlichen Anfalls				Betrachtung des Zeitwerts durch Auf-/ Abzinsung			
betrachtete Perioden	eine Durchschnittsperiode				jede Periode der Nutzungsdauer gesondert			
Bezugsgrößen	Kosten und Leistungen Aufwand und Erträge			Einzahlungen, Auszahlungen				
Bestimmung absoluter Vorteilhaftigkeit	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Vorteile	Einfachheit				Genauigkeit			
	schneller Vergleich	schneller Vergleich	Bezug Gewinn zu Kapital	Zeitfaktor	Vergleich bei ungleicher Dauer und unterschiedlichem Kapitaleinsatz			Vergleich unterschiedlicher Kapitaleinsätze
	wenige Daten nötig	Einbezug der Erlöse	Betrachtung von Differenzinvestitionen	Bindungsdauer (Risiko-schätzung)	Betrachtung des KW jeder Periode separat	einfache Interpretation durch Erfolg pro Jahr	einfache Interpretation	Dauer der Kapitalbindung wird bestimmt
	Vergleich auch bei ungleichen Kapazitäten (Stückkosten)		Einfache zu interpretieren	vereinfachte Zurechnung von Einzahlungen				

Abbildung 6-1: Merkmale und Vorteile der verschiedenen Verfahren zur Investitionsrechnung [Ben-2015, S. A1]

Verfahren Kriterien	Statische Verfahren				Dynamische Verfahren			
	Kosten- vergleich	Gewinn- vergleich	Rentabi- lität	Statische Amortisation	Kapitalwert	Annuität	Interner Zinsfuß	Dynamische Amortisation
Nachteile	Vereinfachung der Realität: Durchschnittsperiode				aufwändig, zeit- und kostenintensiv			
	keine Berücksichtigung des zeitlichen Anfalls				detaillierte Daten notwendig			
	Keine Betrachtung der Erlöse	Erträge nur schwer ermittelbar	Rendite nicht exakt ermittelbar	Festlegung der maximalen Amortisationsdauer schwierig	Schätzungen der Zukunftswerte nötig und Bestimmung der Zinshöhe schwierig, da diese von vielen unsicheren Faktoren abhängen			
	keine Aussage über absolute Vorteilhaftigkeit	Zurechnung der Erträge auf Investitionen schwierig	Zurechnung der Erträge auf Investitionen schwierig	keine Berücksichtigung der Rückflüsse nach Amortisationspunkt	hohe Komplexität, in Praxis nur in bestimmten Fällen anwendbar		komplexe Bestimmung der Mindestrendite	keine Berücksichtigung der Rückflüsse nach dem Amortisationszeitpunkt
	Vergleich nur bei gleich langer Nutzungsdauer und ähnlichem Kapitaleinsatz			keine Aussage über Rentabilität; nur ergänzend anwendbar	totaler Erfolg in Praxis nicht einziges Kriterium		keine Aussage über Rentabilität; nur ergänzend anwendbar	

Abbildung 6-2: Nachteile der verschiedenen Verfahren zur Investitionsrechnung [Ben-2015, S. A2]

Die Auswahl eines geeigneten Verfahrens für den Einsatzfall im Forschungsprojekt OptiMAL erfolgt durch eine Nutzwertanalyse, welche sich in fünf Schritte gliedert [Ada-1996, S. 412ff.], die in den folgenden Kapiteln durchgeführt werden.

6.1.1 Formulierung der Bewertungskriterien

Anhand einer Checkliste werden die relevanten Bewertungskriterien identifiziert (Abbildung 6-3). Dabei werden vier Kategorien mit bis zu sieben Kriterien berücksichtigt.

Checkliste		Nutzwertanalyse			
#	Kriterium	#	Kriterium		
		Relevanz für			
		OptiMAL	Gewichtung		
V	Bestimmung der Vorteilhaftigkeit	V10	Relative Vorteilhaftigkeit	Hoch	5
		V20	Absolute Vorteilhaftigkeit	Niedrig	0
D	Daten	D10	Verfügbarkeit der benötigten Daten	Hoch	4
G	Geltungsbereich	G10	Vergleich bei gleichem Nutzen	Hoch	5
		G20	Vergleich bei ungleichem Nutzen	Niedrig	0
			Vergleich bei ungleicher		
		G30	Nutzungsdauer	Niedrig	1
			Vergleich bei gleichem		
		G40	Kapitaleinsatz	Niedrig	0
			Vergleich bei ungleichem		
G50	Kapitaleinsatz	Hoch	5		
	Vergleich bei über die				
G60	Nutzungsdauer konstanten Daten	Hoch	5		
	Vergleich bei über die				
	Nutzungsdauer schwankenden				
G70	Daten	Niedrig	0		
U	Umsetzung	U10	Einfachheit der Durchführung	Mittel	3
			Genauigkeit der Abbildung		
		U20	betriebswiss. Entscheidungen	Niedrig	3

Abbildung 6-3: Bewertungskriterien und Gewichte für die Nutzwertanalyse

Die relative Vorteilhaftigkeit gibt an, welche von mehreren Planungsalternativen gegenüber anderen vorzuziehen ist. Darüber hinaus lässt sich für eine einzelne Planungsalternative feststellen, ob sie rentabel ist, d. h. der durch die Investition erzielte Erlös die Investitionshöhe überschreitet (absolute Vorteilhaftigkeit). [Pap-2015, S. 317]

Wichtig für den Einsatz in einer Planungsmethode für die Grobplanungsphase von Lagersystemen ist die Verfügbarkeit der benötigten Daten. Je detailliertere Daten über Ausgangssituation der Investition sowie die zukünftige Entwicklung benötigt werden, desto schwieriger ist der Einsatz des Verfahrens in frühen Planungsphasen.

Die Kriterien zur Beurteilung des Geltungsbereichs dienen dazu, die Anwendbarkeit der Verfahren auf den Einsatzfall zu bewerten. Nicht jedes Verfahren ist beispielsweise

gleich gut geeignet, um Planungsalternativen mit unterschiedlicher Nutzungsdauer oder ungleichem Nutzen gegenüberzustellen.

Im Rahmen einer Umsetzung innerhalb des Forschungsprojekts sind weiterhin die Einfachheit der Umsetzung des Verfahrens sowie die Abbildungsgenauigkeit zu berücksichtigen.

6.1.2 Gewichtung der Bewertungskriterien

Durch die anschließende Gewichtung der identifizierten Bewertungskriterien erfolgt eine Anpassung an den Einsatzfall im Forschungsprojekt. Das Ziel der zu entwickelnden Planungsmethode ist es, aus einer Menge an Planungsalternativen die vorzuziehende zu ermitteln. Im Vordergrund steht daher die relative Vorteilhaftigkeit. Wichtig ist außerdem, dass die benötigten Daten in dieser Phase der Lagerplanung verfügbar sind, was sich beispielsweise im Fall der Erlöse, die durch Investition in ein neues/umgeplantes Lagersystem erzielt werden, schwierig darstellt. Zur Gewichtung der Kriterien aus der Kategorie „Geltungsbereich“ werden folgende Annahmen getroffen:

- Der Nutzen der betrachteten Planungsalternativen wird als gleich angenommen, da alle Alternativen eine ausreichende Anzahl an Stellplätzen und Bediengeräten/Personal zur Verfügung stellen, um das Sortiment aufzunehmen und die geforderte Leistung zu erbringen
- Die Nutzungsdauer der betrachteten Planungsalternativen wird als gleich angenommen.
- Die Input-Daten, welche den Planungsfall und die zur Auswahl stehende Technik charakterisieren, werden als über der Nutzungsdauer unveränderlich angenommen. Zukünftige Entwicklungen im Sortiment beispielsweise können entweder von Beginn an berücksichtigt oder aber durch eine Überplanung abgedeckt werden.

Die Fokussierung des Projekts auf der Erstellung einer Planungsmethode für die Grobplanungsphase erfordert die Anwendung eines einfach durchzuführenden Verfahrens, wobei die erzielbare Abbildungsgenauigkeit in den Hintergrund tritt. Die detaillierte Prüfung der absoluten Vorteilhaftigkeit kann in der Grobplanungsphase nicht zufriedenstellend durchgeführt werden und ist demzufolge für den Einsatzfall nicht von höchster Bedeutung. Eine Überführung der vorangegangenen Ausführungen in Gewichtungen zwischen null („nicht relevant für den Einsatzfall“) und fünf („sehr relevant für den Einsatzfall“) zeigt ebenfalls Abbildung 6-3.

6.1.3 Auswahl von Kriteriumsausprägungen

Im Schritt der Auswahl von Kriteriumsausprägungen müssen für die Entscheidungsalternativen (hier: die Verfahren zur Investitionsrechnung) Informationen zusammengestellt werden, die eine Bewertung hinsichtlich der Kriterien ermöglichen [Ada-1996, S. 418]. Als Grundlage der folgenden Bewertung dienen Abbildung 6-1, Abbildung 6-2 sowie die zugehörigen Ausführungen bei *Beninger* [Ben-2015].

6.1.4 Alternativenbewertung

Basierend auf den Kriteriumsausprägungen lassen sich die verschiedenen Verfahren zur Investitionsrechnung bewerten. Die Bewertungen erfolgen an Hand einer Skala von eins („Verfahren erfüllt das Kriterium nicht“) bis fünf („Verfahren erfüllt das Kriterium voll und ganz“) (Abbildung 6-4).

#	Kriterium	Merkmalsprofile				Kapitalwert	Annuität	Interner Zinsfuß	Dyn. Amortisation
		Kostenvergleich	Gewinnvergleich	Rentabilität	Stat. Amortisation				
V10	Relative Vorteilhaftigkeit	5	5	5	3	5	5	5	3
V20	Absolute Vorteilhaftigkeit	1	5	5	3	5	5	5	3
D10	Verfügbarkeit der benötigten Daten	5	2	2	2	1	1	1	1
G10	Vergleich bei gleichem Nutzen	5	5	5	5	5	5	5	5
G20	Vergleich bei ungleichem Nutzen	1	4	4	4	5	5	5	5
	Vergleich bei ungleicher								
G30	Nutzungsdauer	2	1	1	1	5	5	3	5
	Vergleich bei gleichem								
G40	Kapitaleinsatz	1	5	5	5	5	5	3	5
	Vergleich bei ungleichem								
G50	Kapitaleinsatz	4	1	5	5	5	5	5	5
	Vergleich bei über die								
G60	Nutzungsdauer konstanten Daten	5	5	5	5	5	5	5	5
	Vergleich bei über die								
	Nutzungsdauer schwankenden								
G70	Daten	1	1	1	1	5	5	5	5
U10	Einfachheit der Durchführung	5	4	3	3	2	1	1	1
	Genauigkeit der Abbildung								
U20	betriebswiss. Entscheidungen	2	3	3	3	4	5	5	3

Abbildung 6-4: Merkmalsprofile der verschiedenen Verfahren zur Investitionsrechnung

6.1.5 Berechnung des Nutzwertes und Auswahl eines Verfahrens

Durch Multiplikation der Bewertungen mit der Gewichtung des jeweiligen Kriteriums und anschließende Addition ergibt sich der Nutzwert, nach dem sich die Verfahren ordnen lassen (Abbildung 6-5).

Dementsprechend ist das Verfahren der Kostenvergleichsrechnung für den Einsatzfall im Projekt OptiMAL am besten geeignet und wird daher als Grundlage für das Modell zur Bewertung der Kosten ausgewählt.

Methode	Nutzwert	Rang
Kostenvergleich	138	1
Rentabilität	127	2
Kapitalwert	127	2
Annuität	127	2
Interner Zinsfuß	125	5
Stat. Amortisation	117	6
Dyn. Amortisation	111	7
Gewinnvergleich	110	8

Abbildung 6-5: Merkmalsprofile der verschiedenen Verfahren zur Investitionsrechnung

6.2 Aufbau des Modells zur Bewertung der Kosten

Der Aufbau des Modells zur Bewertung der Kosten durch Anwendung der Kostenvergleichsrechnung besteht aus zwei Schritten. Zuerst werden die betrachteten laufenden Kosten allgemein hergeleitet, was als Grundgerüst für die Berechnung der einzelnen Kostenanteile dient (Kapitel 6.2.1). Anschließend werden basierend auf einer finanziellen Analyse manuell bedienter Lagersysteme die relevanten Einflussfaktoren auf die Kosten identifiziert. Für jeden der Einflussfaktoren erfolgt eine Verknüpfung der allgemeinen Berechnung der laufenden Kosten mit den entsprechenden Größen aus den Modellen zu Bewertung der Geometrie und Leistung (Kapitel 6.2.2).

6.2.1 Berechnung der laufenden Kosten

Die Kostenvergleichsrechnung berücksichtigt alle laufenden Kosten, welche durch die Planungsalternative verursacht werden. Diese setzen sich aus Fixkosten und variablen Kosten zusammen, welche wiederum aus verschiedenen Kostenanteilen bestehen (Abbildung 6-6).

Es gilt also für die laufenden Kosten K_L einer Planungsalternative:

$$K_L = K_{Fix,ges} + K_{Var,ges} \quad (6-1)$$

Bei einem Lagersystem, welches sich aus mehreren Lagerbereichen zusammensetzt, lassen sie sich über die einzelnen Lagerbereiche aufsummieren, sodass sich aus Formel (6-1) ergibt:

$$K_L = \sum_{i=1}^{n_{LB}} K_{Fix,i} + \sum_{i=1}^{n_{LB}} K_{Var,i} \quad (6-2)$$

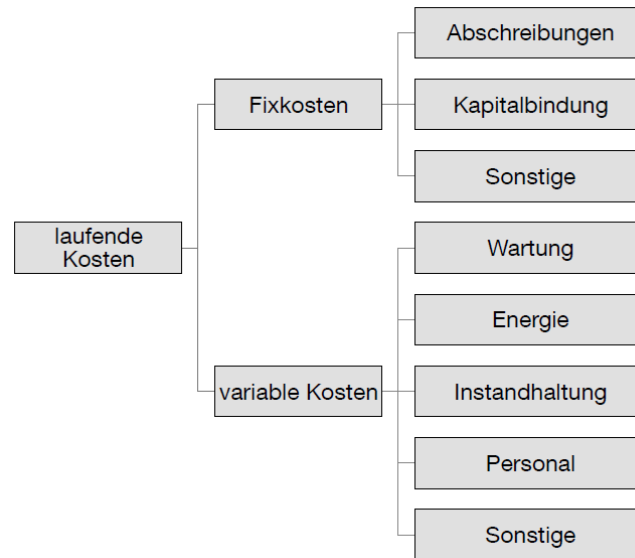


Abbildung 6-6: Zusammensetzung der laufenden Kosten

Die Fixkosten wiederum setzen sich additiv aus den Fixkosten für die noch nicht weiter aufgeschlüsselten Einzelkomponenten des Lagerbereichs zusammen. Für jede Komponente werden Kosten für Abschreibung und Kapitalbindung sowie sonstige Fixkosten veranschlagt:

$$\begin{aligned}
 K_{Fix,i} &= \sum_{j=1}^{n_{Komponenten}} K_{Fix,i,j} \\
 &= \sum_{j=1}^{n_{Komponenten}} (K_{Fix,Ab,i,j} + K_{Fix,Kap,i,j} + K_{Fix,Sonst,i,j})
 \end{aligned} \tag{6-3}$$

Für die Abschreibung gelten folgende Annahmen:

- Abschreibungen erfolgen linear.
- Nach Ablauf der Nutzungsdauer erfolgt die Wiederbeschaffung der identischen Komponente zum selben Preis und mit der selben Nutzungsdauer.

Für den Abschreibungsanteil der Fixkosten $K_{Fix,Ab}$ gilt also, dass die Investition K_I gleichmäßig auf die Nutzungsdauer n_{Nutz} umgelegt wird [Tho-2012, S. 443]. Da kein Restwert der Investition nach der Nutzungsdauer verbleibt, ergibt sich:

$$K_{Fix,Ab,i} = \frac{K_I}{n_{Nutz}} \tag{6-4}$$

Durch die aus der Investition resultierenden Kapitalbindung folgt der Fixkostenanteil $K_{Fix,Kap}$ zu:

$$K_{Fix,Kap,i} = K_I * \left(1 - \frac{n}{2 * n_{Nutz}}\right) * i \quad (6-5)$$

Die sonstigen Fixkosten $K_{Fix,sonst}$ umfassen Kosten, die sich nicht aus Abschreibung oder Kapitalbindung ergeben, beispielsweise Versicherungen und Steuern [Ben-2015, S. 42].

Die variablen Kosten K_{Var} entstehen im Betrieb eines Lagersystems und umfassen Personal-, Energie-, Wartungs- und Instandhaltungskosten. Sie lassen sich in der Grobplanungsphase durch Aufschlag eines prozentualen Zuschlags auf die Investitionskosten der verursachenden Komponente berücksichtigen:

$$K_{Var,i} = K_I * k_{Var,i} \quad (6-6)$$

In (6-1) eingesetzt ergeben sich die laufenden Kosten einer Alternative zu:

$$K_L = \sum_{i=1}^{n_{LB}} (K_{Fix,Ab,i} + K_{Fix,Kap,i} + K_{Fix,Sonst,i} + K_{Var,i}) \quad (6-7)$$

Im Folgenden müssen nun sämtliche auftretenden Komponenten weiter aufgeschlüsselt werden, wofür zunächst die Investitionshöhe bestimmt wird. Anschließend lassen sich - soweit nicht anders angegeben - die entstehenden Kosten durch die Formeln (6-3) bis (6-7) berechnen.

6.2.2 Berechnung der relevanten Kostenanteile manuell bedienter Lagersysteme

Eine Analyse der betrachteten manuell bedienten Lagersysteme zeigt, dass es fünf Komponenten gibt, die von Geometrie und Leistung abhängen und berücksichtigt werden müssen, um Planungsalternativen hinsichtlich der verursachten Kosten zu unterscheiden:

- Flächenbedarf in einem bestehenden Gebäude oder auf einem zu erwerbenden Grundstück
- Gebäude in Form der Bodenplatte und des umbauten Raums
- Lagereinrichtung

- Bediengeräte
- Personal für die Bediengeräte

Auf die Berechnung der Fixkosten und variablen Kosten dieser Komponenten wird in den folgenden Kapiteln eingegangen, aufbauend dem von *Beninger* entwickelten Modell [Ben-2015]. Weitere Komponenten, beispielsweise das IT-System, benötigte Büroräume oder Personal, welches nicht direkt durch Ein- und Auslagerungen an der Leistungserbringung beteiligt ist, können bei Bedarf mit Hilfe der allgemeinen Formeln in Kapitel 6.2.1 hinzugefügt werden.

Laufende Kosten für den Flächenbedarf

Prinzipiell kann sich der Flächenbedarf auf zwei Arten in Kosten niederschlagen: einerseits kann die in einer bestehenden Immobilie belegte Fläche mit einem Kostensatz belegt sein, andererseits ist gegebenenfalls die Anschaffung eines Grundstücks nötig.

Sofern unternehmensintern die Fläche mit einem bestimmten pauschalen Kostensatz $k_{I,A}$ kalkuliert wird, ist der Begriff der Investition streng genommen nicht zutreffend, da keine Investition erfolgt, sondern der Kostensatz zur Bemessung der Aufteilung einer Immobilie auf einzelne Funktionsbereiche dient. Um nicht speziell eine neue Kostenart definieren zu müssen, soll der Begriff der Investition hier dennoch verwendet werden:

$$K_{I,A} = k_{I,A} * \sum_{i=1}^{n_{LB}} A_{LM,i} \quad (6-8)$$

Da Fläche keiner Abnutzung unterliegt, erfolgen keine Abschreibungen ($K_{Fix,Ab,A}$) und es existiert kein Richtwert zur Absetzung der Abschreibung [Ben-2015, S. 49]. Die Kapitalbildung ($K_{Fix,Kap,A}$) steigt daher auf den vollen Wert der „Investition“ über die gesamte Dauer. Für die sonstigen Fixkosten wird angenommen, dass sämtliche mit der Fläche skalierenden Teile im Kostensatz $k_{I,A}$ enthalten sind, sodass die sonstigen Fixkosten konstant sind. Mit (6-8) ergeben sich die Teile der Fixkosten zu:

$$K_{Fix,Ab,A} = 0 \quad (6-9)$$

$$K_{Fix,Kap,A} = K_{I,A} * i = i * k_{I,A} * \sum_{i=1}^{n_{LB}} A_{LM,i} \quad (6-10)$$

und schließlich die Fixkosten für die Fläche bei Verwendung eines pauschalen Kostensatzes:

$$K_{Fix,A} = K_{Fix,Kap,A} + K_{Fix,Sonst,A} \quad (6-11)$$

Sofern das Lagersystem auf einem anzuschaffenden Grundstück errichtet wird, besteht die Investition nicht nur aus Quadratmeterpreis des Grundstücks, sondern beinhaltet darüber hinaus sonstige Kosten ($K_{I,G,Sonst}$) wie Grundstücksnebenkosten (z.B. Notariatsgebühren, Maklerprovisionen) [DIN-276-1]:

$$K_{I,G} = k_{I,G} * \sum_{i=1}^{n_{LB}} A_{LM,i} + K_{I,G,sonst} \quad (6-12)$$

Auch im Falle der Flächenberechnung über das Grundstück erfolgen keine Abschreibungen ($K_{Fix,Ab,G}$) und die laufenden Kosten für Kapitalbindung ($K_{Fix,Kap,G}$) ergeben sich aus der vollen Investitionshöhe [Ben-2015, S. 49]. Die sonstigen Fixkosten $K_{Fix,Sonst,G}$ können in einen flächenunabhängigen und einen flächenabhängigen Teil untergliedert werden. Es gilt mit dem sonstigen Fixkostensatz $k_{Fix,Sonst,G}$ und den konstanten sonstigen Fixkosten $K_{Fix,Sonst,G,konst}$ für die drei Anteile der laufenden Kosten:

$$K_{Fix,Ab,G} = 0 \quad (6-13)$$

$$K_{Fix,Kap,G} = K_{I,G} * i = i * (k_{I,G} * \sum_{i=1}^{n_{LB}} A_{LM,i} + K_{I,G,sonst}) \quad (6-14)$$

$$K_{Fix,Sonst,G} = k_{Fix,Sonst,G} * \sum_{i=1}^{n_{LB}} A_{LM,i} + K_{Fix,sonst,G,konst} \quad (6-15)$$

und schließlich die Fixkosten für die Fläche bei Verwendung eines Kostensatzes:

$$K_{Fix,G} = K_{Fix,Kap,G} + K_{Fix,Sonst,G} \quad (6-16)$$

Die laufenden Kosten für den Flächenbedarf setzen sich unter Vernachlässigung variabler Kosten wie folgt zusammen:

$$K_{L,A} = K_{Fix,A} + K_{Fix,G} \quad (6-17)$$

Sofern nur ein pauschaler Kostensatz oder aber nur die Grundstückskosten verwendet werden sollen, können die entsprechenden Größen ($K_{Fix,A}$ bzw. $K_{Fix,G}$) auf den Wert Null gesetzt werden.

Laufende Kosten für das Gebäude

Da im Projekt kein Gesamtlayout erstellt wird, sondern lediglich einzelne Lagerbereiche geplant werden, werden lediglich die Bestandteile der laufenden Kosten des Gebäudes betrachtet, auf die die Ausprägung der Planungsalternativen großen Einfluss hat: Einerseits sind dies die Kosten der Bodenplatte, deren Qualität von den verwendeten Bediengeräten abhängt, andererseits die Kosten für den umbauten Raum, welcher sich aus Flächenbedarf und Höhe der Lagerbereiche ergibt. Weitere Einflussgrößen auf die laufenden Kosten des Gebäudes wie Außen-/Innenwände, Decken/Dächer oder technische Einbauten [DIN-276-1] lassen sich über den Kostensatz des umbauten Raums berücksichtigen.

Die Beschaffenheit der Bodenplatte ist von vielen Faktoren abhängig, darunter die geforderte Traglast und die von Bedienern geforderte Oberflächenqualität [Gud-2010, S. 634; Gün-2011, S. 35]. Für die Berechnung der zugehörigen Investition $K_{I,BP}$ gelten folgende Annahmen:

- Das gesamte Lagergebäude besitzt eine einheitlich ausgeführte Bodenplatte, auch wenn für einzelne Bereiche eine günstigere Ausführung möglich wäre.
- Die Bodenplatte gibt es abhängig von den gewählten Bediengeräten in zwei Varianten: für Schmalgang- und Breitgangsysteme

Die Investition der Bodenplatte skaliert mit der Fläche und ergibt sich zu:

$$K_{I,BP} = k_{I,BP} * \sum_{i=1}^{n_{LB}} A_{LM,i} \quad (6-18)$$

Dabei gilt für $k_{I,BP}$:

$$k_{I,BP} = \begin{cases} k_{I,BP,Schmal} & \text{bei mind. ein Lagerbereich mit Schmalgangsystem} \\ k_{I,BP,Breit} & \text{sonst} \end{cases} \quad (6-19)$$

Die mit dem umbauten Raum verbundene Investition skaliert mit dem Volumen der Planungsalternative:

$$K_{I,UR} = k_{I,UR} * \sum_{i=1}^{n_{LB}} V_{LM,i} \quad (6-20)$$

Beide Anteile können zur Investition in das Gebäude $K_{I,Geb}$ zusammengefasst werden:

$$K_{I,Geb} = K_{I,UR} + K_{I,BP} \quad (6-21)$$

Mit den allgemeinen Formeln zur Berechnung der laufenden Kosten aus Kapitel 6.2.1 folgen die laufenden Kosten des Gebäudes zu:

$$K_{L,Geb} = \frac{K_{I,Geb}}{n_{nutz}} + i * \frac{K_{I,Geb}}{2} + K_{Fix,Sonst,Geb} + K_{I,Geb} * k_{Var,Geb} \quad (6-22)$$

Darin sind neben den bekannten Größen sonstige Fixkosten $K_{Fix,Sonst,Geb}$ sowie der Zuschlag $k_{Var,Geb}$ für variable Kosten enthalten.

Laufende Kosten für die Lagereinrichtung

Für die Berechnung der laufenden Kosten der Lagereinrichtung gelten folgende Annahmen:

- Die Kosten können über einen mit der Stellplatzzahl skalierenden Kostensatz $k_{I,LE}$ und einen konstanten Kostenanteil $K_{I,LE,Sonst}$ beschrieben werden
- Weitere ortsfeste Einrichtung wie für Brandschutz, Stetigförderer oder Ausgestaltung der Lagerbereichsvorzone werden nicht betrachtet.
- Für die eingesetzte Lagereinrichtung verbleibt nach der Nutzungsdauer kein Restwert.

Die Investitionshöhe $K_{I,LE}$ für die Lagereinrichtung ergibt sich summiert über alle Lagerbereiche zu:

$$K_{I,LE} = \sum_{i=1}^{n_{LB}} (k_{I,LE,i} * K_{LM,i} + K_{I,LE,Sonst,i}) \quad (6-23)$$

Mit den allgemeinen Formeln zur Berechnung der laufenden Kosten aus Kapitel 6.2.1 folgen die laufenden Kosten der Lagereinrichtung durch Summenbildung über alle Lagerbereiche zu:

$$K_{L,LE} = \frac{K_{I,LE}}{n_{nutz}} + i * \frac{K_{I,LE}}{2} + \sum_{j=1}^{n_{LB}} K_{Fix,Sonst,LE,j} + \sum_{j=1}^{n_{LB}} (k_{I,LE,j} * K_{LM,j} * k_{Var,LE,j}) \quad (6-24)$$

Darin sind neben den bekannten Größen sonstige Fixkosten $K_{Fix,Sonst,LE}$ sowie der Zuschlag $k_{Var,LE}$ für variable Kosten enthalten.

Laufende Kosten für die Bediengeräte

Für die Berechnung der laufenden Kosten für die Bediengeräte gelten folgende Annahmen:

- Die Kosten können über einen mit Bediengerätezahl und -typ skalierenden Kostensatz und einen konstanten Kostenanteil beschrieben werden.
- Benötigtes Personal wird separat kalkuliert.
- Für die Bediengeräte verbleibt nach der Nutzungsdauer kein Restwert. Sie werden sofort in gleicher Form zum gleichen Preis wiederbeschafft.

Die Investitionskosten für die Bediengeräte eines Typs in einem Lagerbereichs setzen sich aus den Anschaffungskosten sowie aus einem bediengerätespezifischen konstanten Anteil zusammen. Dabei bezeichnet j den Lagerbereich und k den Typ des Bediengeräts:

$$K_{I,Bed,j,k} = k_{I,Bed,k} * n_{Bed,j,k} + K_{I,BedSonst,,k} \quad (6-25)$$

Mit den allgemeinen Formeln zur Berechnung der laufenden Kosten aus Kapitel 6.2.1 folgen die laufenden Kosten der Bediengeräte durch Summenbildung über alle Lagerbereiche und dort eingesetzten Bediengerätetypen zu:

$$K_{L,Bed} = \sum_j \sum_k \left(\frac{K_{I,Bed,j,k}}{n_{nutz,k}} + i * \frac{K_{I,Bed,j,k}}{2} + K_{Fix,Sonst,Bed,k} + K_{I,Bed,j,k} * k_{Var,Bed,k} \right) \quad (6-26)$$

Darin sind neben den bekannten Größen auch sonstige Fixkosten jedes Bediengerätetyps $K_{Fix,Sonst,Bed}$ sowie der Zuschlag $k_{Var,Bed,k}$ für variable Kosten jedes Bediengerätetyps enthalten.

Laufende Kosten für das eingesetzte Personal

Für die Berechnung der laufenden Kosten, die durch das benötigte Personal verursacht werden, gilt:

- Die Anzahl benötigten Personals entspricht der Anzahl verwendeter Lagerbediener. Weiteres Personal (z. B. Führungskräfte, Wartungspersonal, Leitstand) wird nicht betrachtet.

- Es wird nicht zwischen unterschiedlichen Qualifikationsstufen unterschieden. Bei Bedarf kann eine Unterscheidung nach Qualifikationsstufen durch Verwendung unterschiedlicher Personalkostensätze berücksichtigt werden.
- Betrachtet wird ein Einschichtbetrieb. Bei Bedarf lassen sich Mehrschicht-Modelle abbilden, wobei dann der Personalbedarf nicht mehr dem Bediengerätebedarf entspricht.

Die laufenden Kosten für Personal ergeben sich als rein variable Kosten mit dem Kostensatz $k_{Var,Pers}$ durch Summenbildung über alle Lagerbereiche und dort eingesetzten Bediengerätebedarfe zu:

$$K_{L,Pers} = \sum_j \sum_k (n_{Bed,j,k} * k_{Var,Pers}) \quad (6-27)$$

7 Aufbau der Planungsmethode

Die beschriebenen Modelle in den Kapiteln 4 bis 6 lassen sich verwenden, um ein beliebiges manuell bedientes Lagersystem, bestehend aus verschiedenen Lagerbereichen, zu beschreiben. Weiterhin lassen sich Kennzahlen aus den Bereichen Geometrie, Leistung und Kosten gewinnen und als Bewertungskriterium für einen Vergleich verschiedener Lagersysteme heranziehen. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Modelle ist allerdings, dass jeder Lagerbereich durch die im Vorfeld erläuterten Systemgrenzen abgedeckt ist. Für die in Kapitel 3.2 erläuterte Aufgabe der Bewertung von Planungsalternativen können die Modelle also verwendet werden. Eine Planungsmethode, wie sie im Rahmen des Projekts OptiMAL erstellt werden soll, muss jedoch nicht nur Planungsalternativen bewerten, sondern auch selbstständig erzeugen können.

In den folgenden Kapiteln wird die Planungsaufgabe als Optimierungsproblem formuliert und auf Lösbarkeit untersucht (Kapitel 7.1). Anschließend werden verschiedene Lösungsansätze gegenübergestellt und diskutiert, sodass der am besten geeignete ausgewählt werden kann (Kapitel 7.2). Anschließend wird die Planungsmethode basierend auf diesem Lösungsansatz entwickelt (Kapitel 7.3).

7.1 Formulierung der Planungsaufgabe als Optimierungsproblem

Die Planung eines manuell bedienten Lagersystems für ein gegebenes Sortiment und gegebene Aufträge lässt sich als Optimierungsproblem formulieren. Ganz allgemein umfasst ein Optimierungsproblem eine Zielfunktion $f(x)$ sowie Nebenbedingungen. Aus der Menge aller Vektoren x , die die Nebenbedingungen erfüllen, soll als Lösung des Optimierungsproblems derjenige Vektor x_{opt} identifiziert werden, für den $f(x)$ den minimalen/maximalen Wert annimmt [Jar-2004, S. 2; Kal-2013, S. 1]. Als zu minimierende Zielfunktion werden im Projekt OptiMAL die verursachten Kosten herangezogen. Das Optimierungsproblem lautet also für ein Lager bestehend aus m Lagerbereichen, die insgesamt n Artikel beinhalten:

$$\text{Min } K_L \tag{7-1}$$

mit den Nebenbedingungen

$$\sum_i x_{ij} = 1 \quad \forall j = 1 \dots n \quad (7-2)$$

$$\sum_j x_{ij} \geq 1 \quad \forall i = 1 \dots m \quad (7-3)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \quad (7-4)$$

$$\sum_i x_{ij} * f_{ij} = 1 \quad \forall j = 1 \dots n \quad (7-5)$$

Die verwendeten Größen sind wie folgt definiert:

- x_{ij} Binäre Variable, die die Zuweisung von Artikel j zu Lagerbereich i angibt. $x_{ij} = 1$, wenn der Artikel dem Lagerbereich zugewiesen ist, sonst 0.
- d_i Vektor, der die Ausprägung des Lagerbereichs i angibt. Enthalten sind also sämtliche Freiheitsgrade aus den Bereichen Konfiguration, Strategien und Dimensionierung
- f_{ij} Binäre Variable, die angibt, ob Artikel j in Lagerbereich i gelagert werden kann. $f_{ij} = 1$, wenn eine Lagerung möglich ist, sonst 0.

Ziel des Optimierungsproblems ist es somit, die laufenden Kosten, welche aus dem Modell zur Bewertung der Kosten bekannt sind, zu minimieren. Mit Hilfe der Nebenbedingungen (7-2) bis (7-4) ist gewährleistet, dass jeder Artikel genau einem Lagerbereich zugeordnet ist, und dass umgekehrt jeder Lagerbereich mindestens einen Artikel enthält. Durch Nebenbedingung (7-5) werden lediglich solche Lösungen zugelassen, bei denen jeder Artikel zu einem Lagerbereich zugeordnet ist, in den er aus technischer Sicht eingelagert werden kann. Bei Zuweisung eines Artikels auf Paletten zu einem Lagerbereich mit Fachbodenregal für Kleinladungsträger wird durch eine noch nicht weiter spezifizierte Berechnung beispielsweise $f_{ij} = 0$; eine Zuweisung des selben Artikels zu einem Bodenblocklager zieht dagegen $f_{ij} = 1$ nach sich.

Um ein Optimierungsproblem zu lösen und die hinsichtlich der Zielfunktion beste Lösung zu finden, ist die Anwendung eines geeigneten Verfahrens nötig. Die Auswahl des geeigneten Verfahrens ist wiederum abhängig davon, wie das Optimierungsproblem beschaffen ist. Lässt sich ein Optimierungsproblem beispielsweise in der folgenden Standardform schreiben, spricht man von einem linearen Optimierungsproblem [Jar-2004, S. 14]:

$$\inf\{c^T x \mid Ax = b, x \geq 0\} \quad (7-6)$$

Auf Grund ihrer Bedeutung existieren für diese Problemklasse weit entwickelte Lösungsverfahren. So lassen sich beispielsweise mit Simplexverfahren lineare Optimierungsprobleme mit „mehr als einer Million Variablen und Hunderttausenden von Beschränkungen“ lösen [Kal-2013, S. 2]. Sofern jedoch Zielfunktion und/oder Nebenbedingungen nicht linear sind, sind entsprechend andere Verfahren nötig. Weiterhin stellen die Werte, die die Variablen annehmen können, ein wichtiges Unterscheidungskriterium dar: Während in vielen Fällen keine Einschränkung besteht und die Variablen beliebige Werte innerhalb eines kontinuierlichen Wertebereiches annehmen können, werden bei gemischt-ganzzahligen Problemen für mindestens eine Variable lediglich ganzzahlige Werte zugelassen. [Kal-2013, S. 71]

Bei diskreten Ausprägungen der Freiheitsgrade lässt sich theoretisch in jedem Fall eine vollfaktorielle Untersuchung durchführen. Dabei wird durch Kombination aller Ausprägungen der Freiheitsgrade miteinander ein Vollfaktorplan erzeugt und ausgewertet, der alle existierenden Planungsalternativen enthält. Dementsprechend ist auch die beste existierende Planungsalternative Teil des Vollfaktorplans und kann nach Durchführung der Bewertung identifiziert werden. In der Praxis bedeutet die vollständige Enumeration jedoch einen hohen Rechen- und Speicherbedarf, sodass „große Sorgfalt bei der Versuchsplanung und Versuchsdurchführung“ erforderlich ist [Sei-2010, S. 6f.]. Auch die analytische Lösung eines Optimierungsproblems ist möglich. Ist beispielsweise die zur Bewertung herangezogene Zielfunktion nach den enthaltenen Freiheitsgraden differenzierbar, so lässt sich durch Nullsetzen der Ableitung die optimale Lösung identifizieren.

Die genannten Verfahren liefern jeweils die beste existierende Lösung, das sog. globale Optimum. Daneben existieren Verfahren, welche nicht sicher die beste Lösung/Planungsalternative finden. Die Motivation hinter dieser als *Heuristiken* bezeichneten Gruppe an Verfahren ist die schnelle Generierung von Lösungen oder auch die Tatsache, dass komplexe, nicht exakt lösbare Optimierungsprobleme behandelt werden können. Bekannte Ansätze aus dieser Gruppe sind das *Simulated Annealing* oder *genetische Algorithmen*, bei denen Analogien zwischen dem Optimierungsproblem und der Abkühlung erhitzten Metalls respektive der Evolution einer Population gezogen werden. [Ada-1996, S. 493; Dré-2006]

Der Versuch, die Lagerplanung als Optimierungsproblem zu formulieren, zielt darauf ab, ein exakt lösbares Optimierungsproblem zu erhalten. Die Klassifizierung dieses Problems erlaubt Aussagen darüber, ob die Lösbarkeit tatsächlich gegeben ist und

welches Lösungsverfahren sich eignet. Diese Klassifizierung findet anhand der Linearität/Nichtlinearität der Zielfunktion und der Randbedingungen einerseits und der eventuell erforderlichen Ganzzahligkeit der Variablen andererseits statt.

Betrachtet man die Berechnung der Kostenanteile in der Zielfunktion, welche in Kapitel 6.2.2 ausgeführt ist, zeigt sich, dass die laufenden Kosten von folgenden Größen abhängig sind:

- Fläche
- Volumen
- Stellplatzzahl
- Bediengerätezahl
- Personalzahl

Am Beispiel der Bediengerätezahl bei Einheitenlagerung lässt sich zeigen, dass die Zielfunktion im Allgemeinen nichtlinear ist: Nach (5-52) gilt, dass die Bediengerätezahl umgekehrt proportional zur Leistung des Bediengerätes und damit proportional zur Spielzeit ist. Je größer also die Spielzeit, desto mehr Bediengeräte werden benötigt, um in der selben Zeit die Sollleistung zu erbringen. Die Spielzeit wiederum ist durch Verwendung der eindimensionalen Wegzeitformel in (5-2) für Strecken unterhalb eines Grenzwertes proportional zur Quadratwurzel der Strecke und damit nichtlinear. Darüber hinaus besteht in der Gassenwechselwahrscheinlichkeit eine nichtlineare Abhängigkeit von Gassenzahl, Gangmodul- und Lagerplatzkapazität (vgl. (5-33)).

Ein Blick auf die Berechnung der Spielzeit zeigt auch, dass ein Teil der Freiheitsgrade nicht als numerische Variable in den verwendeten Formeln vorkommt, sondern stattdessen darüber bestimmt, welche von mehreren alternativen Formeln verwendet werden muss. Als Beispiel lassen sich hier die Layoutgrundform und Orientierung der Gangmodule nennen, die die Verwendung einer bestimmten (nichtlinearen) Formel für den Weg zwischen Basis und Lagergasse (vgl. Tabelle A-1) nach sich ziehen. Dies gilt insbesondere für die Freiheitsgrade aus den Bereichen Konfiguration und Strategien.

Die Nebenbedingung (7-4) zeigt außerdem, dass es sich um ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem handelt, da die Zuordnung eines Artikels zu einem Lagerbereich nicht teilweise erfolgen kann, sondern nur komplett. Auch weitere Freiheitsgrade wie die Ebenenzahl ($n_{LP,y}$) oder die Gassenzahl ($n_{GM,z}$) können nur ganzzahlige Werte annehmen.

Zusammenfassend lässt sich das Optimierungsproblem wie folgt charakterisieren:

- Ein Teil der Freiheitsgrade der Planung ist Bestandteil der Zielfunktion. Hierbei handelt es sich um die Variablen aus dem Bereich Dimensionierung sowie um die Lagerplatztiefe und Stapelhöhe der LE im Lagerplatz.
- Ein Teil der Freiheitsgrade der Planung ist nicht als Variable in der Zielfunktion enthalten, sondern bestimmt stattdessen das Aussehen der Zielfunktion. Hierbei handelt es sich um die Variablen aus dem Bereich der Strategien und Konfiguration (mit Ausnahme der Lagerplatztiefe und Stapelhöhe der LE im Lagerplatz).
- Das Planungsproblem umfasst die nichtlineare, ganzzahlige Minimierung der Kosten eines Lagerbereiches (Teilproblem 1) bei gegebener Artikelzuweisung.
- Die Kostenminimierung jedes Lagerbereichs (d. h. Teilproblem 1) ist abhängig von den zugewiesenen Artikeln. Sie ist also für jede mögliche Zuweisung von Artikeln (Teilproblem 2) zu lösen. Die grundsätzlichen Überlegungen in Kapitel 3.1.1 zeigen, dass mit der Anzahl an betrachteten Artikeln die Anzahl möglicher Zuweisungen von Artikeln zu Lagerbereichen exponentiell ansteigt.

7.2 Auswahl eines Lösungsansatzes

Nachdem im vorherigen Kapitel das zu lösende Planungsproblem formuliert, klassifiziert und in seiner Komplexität betrachtet wurde, muss ein geeigneter Lösungsansatz gefunden und auf das formulierte Planungsproblem angepasst werden.

Im Rahmen des Projekts wurde die Lösbarkeit des nichtlinearen, ganzzahligen Optimierungsproblems mit Hilfe etablierter Methoden unter Anwendung von vereinfachenden Annahmen geprüft:

- Die Artikelzuweisung wird als gegeben vorausgesetzt.
- Betrachtet wird ein einzelner Lagerbereich. Dadurch ist der Betrachtungsumfang auf die einmalige Lösung der Kostenminimierung eines Lagerbereichs (Teilproblem 1) eingeschränkt.
- Die Lagerplatzkapazität wird als gegeben angenommen. Die Lagerplatztiefe ($n_{SP,z}$) und die Stapelhöhe im Lagerplatz ($n_{SP,y}$) stellen somit keine Variablen dar.
- Die durch Bediengerät/Gebäude gegebene maximal mögliche Ebenenzahl wird vollständig ausgenutzt.
- Aus der Artikelzuweisung lässt sich die Mindestkapazität des Lagerbereichs ermitteln. Die zugewiesenen Artikel lassen sich nur dann vollständig einlagern,

wenn die Kapazität des Lagerbereichs die Mindestkapazität überschreitet. Durch die Mindestkapazität lässt sich die Ebenenzahl als Variable/Freiheitsgrad eliminieren.

- Alle Variablen/Freiheitsgrade, welche die Form der Zielfunktion bestimmen, jedoch nicht als Variable in der Zielfunktion erscheinen, seien gegeben. Insbesondere betrifft das die Konfiguration und Strategien.

Unter den genannten Annahmen lässt sich die Zielfunktion der laufenden Kosten in Abhängigkeit von lediglich zwei verbleibenden Variablen angeben: der Gassenlänge ($n_{FM,x}$) sowie der Gassenzahl ($n_{GM,z}$):

$$K_L = f(n_{FM,x}, n_{GM,z}) \quad (7-7)$$

Wie jedoch die Funktion $f(n_{FM,x}, n_{GM,z})$ in (7-7) genau aussieht, ist abhängig von den per Annahme im Vorfeld festgelegten Variablen, die die Form der Zielfunktion bestimmen. Die Kostenfunktion in (7-7) lässt sich daher je nach gewählter Konfiguration und Strategien mit unterschiedlichen Lösungsverfahren behandeln. Insgesamt wurden drei Typen von Zielfunktionen identifiziert, für die jeweils eine andere Herangehensweise gewählt werden muss [Zei-2015, S. 60ff.]:

- Analytisch lösbare Zielfunktion

Voraussetzung für die analytische Lösbarkeit ist die Relaxierung des Optimierungsproblems. Relaxierung bedeutet, dass Randbedingungen fallen gelassen werden [Dom-2011, S. 134]. Im vorliegenden Fall wird die Forderung nach Ganzzahligkeit von Gassenlänge und Gassenzahl vorerst nicht berücksichtigt. Ist weiterhin $K_L = f(n_{FM,x}, n_{GM,z})$ zweimal stetig differenzierbar, können Gradient und Hessematrix der Zielfunktion untersucht werden. Für ein Minimum muss gelten:

$$\nabla f(n_{FM,x}, n_{GM,z}) = 0 \quad (7-8)$$

$$\det(H(n_{FM,x}, n_{GM,z})) > 0 \quad (7-9)$$

Sofern sich (7-8) analytisch lösen lässt und (7-9) erfüllt ist, können die gefundenen Lösungen mit Hilfe des Branch & Bound-Verfahrens in ganzzahlige Lösungen des unrelaxierten Optimierungsproblems überführt werden. Für Erläuterungen zu Gradient, Hessematrix und Branch & Bound-Verfahren kann die Fachliteratur herangezogen werden, z. B. [Dom-2011].

- Konvexe Zielfunktion

In dem Fall, dass sich auf analytischem Weg keine Lösungen für (7-8) identifizieren lassen, jedoch Gleichung (7-9) erfüllt ist und die Zielfunktion somit konvex ist, lassen sich das Newton- oder das Gradientenverfahren anwenden, um ein Optimum zu ermitteln. Anschließend können die so gefundenen Lösungen mit dem Branch & Bound-Verfahren in ganzzahlige Lösungen überführt werden. Zu Newton-, Gradienten- und Branch & Bound-Verfahren kann die Fachliteratur herangezogen werden, z.B. [Dom-2011; Rei-2013].

- Voll- oder teilfaktorielle Untersuchung

In allen Fällen, in denen keiner der beiden vorherigen Ansätze zu einer Lösung führt, verbleibt als Lösungsansatz die voll- oder teilfaktorielle Untersuchung der Menge an möglichen Lösungen. Während bei der vollfaktoriellen Untersuchung alle möglichen Kombinationen geprüft werden, bietet die statistische Versuchsplanung (auch: Design of Experiments) weitere Ansätze, mit deren Hilfe eine möglichst gute Auswahl an Kombinationen ermittelt und anschließend untersucht wird. Ansätze sind beispielsweise teilfaktorielle Versuchspläne (hier werden Kombinationen ausgeschlossen, für die schlechte Werte der Zielfunktion erwartet werden) oder Quasi-Monte-Carlo-Verfahren, bei dem Ausprägungen der Variablen gleichverteilt sind und zufällig ausgewählt werden [Sei-2010, S. 168ff.]. Auf Grund des zu erwartenden hohen Rechenaufwands stellt die voll- oder teilfaktorielle Untersuchung lediglich eine Notfalllösung dar.

Ein möglicher Optimierungsalgorithmus für dieses vereinfachte Optimierungsproblem kann wie folgt aufgebaut sein [Zei-2015, S. 49ff.]:

1. Festlegung der Größen, die per Annahme als bekannt vorausgesetzt wurden.
2. Aufstellung der Kostenfunktion durch Einsetzen der zu verwendenden Formeln aus den Kapiteln 4, 5 und 6 in (7-7).
3. Klassifizierung der Kostenfunktion an Hand der Gleichungen (7-8) und (7-9).
4. Ermittlung der Optimallösung durch Anwendung des für die Klasse geeigneten Verfahrens.

Dieses Verfahren liefert zwar - im Zweifelsfall durch eine vollfaktorielle Untersuchung mit entsprechendem Rechenaufwand - eine Optimallösung, die Schwierigkeit besteht jedoch in der Umsetzbarkeit als rechnergestütztes Werkzeug. So müsste dieses Werkzeug eigenständig in der Lage sein, durch Einsetzen und Vereinfachen die Kostenfunktion aufzustellen und anschließend an Hand der Gleichungen (7-8) und (7-9) zu klassifizieren. Auf Grund der Vielzahl an möglichen Kostenfunktionen ist das Aufstellen und Hinterlegen der fertigen Kostenfunktionen in einer Bibliothek keine Option:

allein für den Bereich der Kommissionierung existieren über 1000 verschiedene Kostenfunktionen. Diese Zahl erhält man durch Bilden aller möglichen Kombinationen der Variablenausprägungen der morphologischen Kästen in Tabelle 2-2 und Tabelle 2-6.

Um einen geeigneten, für ein rechnergestütztes Werkzeug umsetzbaren Lösungsansatz zu finden, wurden daher folgende zwei Alternativen gegenübergestellt:

- Voll- und teilfaktorielle Untersuchung
Analog zu den vorherigen Ausführungen wird eine Menge an gültigen Lösungen erzeugt.
- Heuristischer Ansatz
Heuristische Ansätze lassen sich verstehen als „Algorithmen“ zur Bewältigung von Planungsproblemen, für die keine effizienten, optimierenden Verfahren bekannt sind (lösungsdefekte Probleme). Sie sind in dieser Sicht stets zweitbeste Lösungsverfahren“ [Ada-1996, S. 493]. Auf Grund dieser allgemeinen Definition lassen sich heuristische Ansätze flexibel formulieren.

Die Auswahl eines geeigneten Lösungsansatzes erfolgt basierend auf einer Bewertung hinsichtlich der vier gleich gewichteten Kriterien Lösungsqualität, Transparenz, Effizienz und Flexibilität:

- Lösungsqualität
Das Kriterium gibt an, ob mit Hilfe des Ansatzes das globale Optimum gefunden werden kann und ob verlässliche Aussagen darüber gemacht werden können, wie gut die gefundenen Lösungen verglichen mit dem globalen Optimum sind.
- Transparenz
Für die Anwendbarkeit einer Planungsmethode sowie eines darauf aufbauenden Planungstools in der Praxis ist es wichtig, dass der Planer nachvollziehen kann, wie die gefundenen Lösungen zu Stande kommen. Auf diese Weise wird das Vertrauen des Planers in die erstellten Lösungen gefördert, während bei einem „Black Box“-Tool die Entstehung der Lösungen von außen nicht nachvollziehbar sind.
- Effizienz
Durch dieses Kriterium wird bewertet, wie effizient ein Algorithmus basierend auf dem jeweiligen Lösungsansatz arbeiten kann. Hier fließen sowohl die Rechenzeit als auch der Speicherbedarf ein.
- Flexibilität
Für die Praxisanwendung ist als weiteres Kriterium die Flexibilität des Planers wichtig. Durch die Formalisierung in Form der Modelle für Geometrie, Leistung

und Kosten sowie die erstellte Planungsmethode besteht prinzipiell die Gefahr, dem Planer die Flexibilität zu nehmen, Lösungen gegebenenfalls anzupassen.

Das Ergebnis der Bewertung zeigt Tabelle 7-1.

Tabelle 7-1: Bewertung der möglichen Lösungsansätze; Punktwerte: 1 (unzureichend erfüllt) bis 3 (voll und ganz erfüllt)

Kriterium	Voll- und teilfaktorische Untersuchung	Heuristischer Ansatz
Lösungsqualität	3	1
Transparenz	2	3
Effizienz	1	3
Flexibilität	2	3
Summe	8	10

Basierend auf der Bewertung wurde die Anwendung eines heuristischen Ansatzes ausgewählt. Zwar ist die Qualität der erzeugten Lösungen unbekannt, da nicht alle Lösungen untersucht werden und dadurch das Optimum in der Menge der nicht untersuchten Lösungen enthalten sein kann. Dieser Nachteil wird jedoch durch die einfache Erhaltung der Flexibilität des Planers, die Effizienz und Transparenz durch Orientierung am realen Planungsprozess aufgewogen.

7.3 Funktionsweise der Planungsmethode

Die Funktionsweise der Planungsmethode und der zugrunde liegenden Heuristik wird im folgenden Kapitel erläutert. Zuerst wird die Planungsmethode in den Planungsprozess eingeordnet und der grundlegende Ablauf erläutert (Kapitel 7.3.1.). Anschließend werden Konfigurationsmöglichkeiten identifiziert, mit deren Hilfe die Heuristik und damit die Planungsmethode angepasst werden können (Kapitel 7.3.2). Zuletzt wird die Einbindung des Planers erläutert, der in der Lage sein soll, die erzeugten Lösungen flexibel anzupassen (Kapitel 7.3.3).

7.3.1 Einordnung in den Planungsprozess und grundlegender Ablauf der Planungsmethode

Im Rahmen des Forschungsprojekts OptiMAL wurden neben der Analyse bestehender Modelle zur Planung von Materialfluss- und Logistiksystemen (vgl. Kapitel 2.5.2)

Experteninterviews mit Vertretern aus dem Projektbegleitenden Ausschuss durchgeführt, um den herkömmlichen Ablauf der Planung zu erfassen (Abbildung 2-11). In diesen Ablauf ordnet sich die entwickelte Planungsmethode ein (Abbildung 7-1).

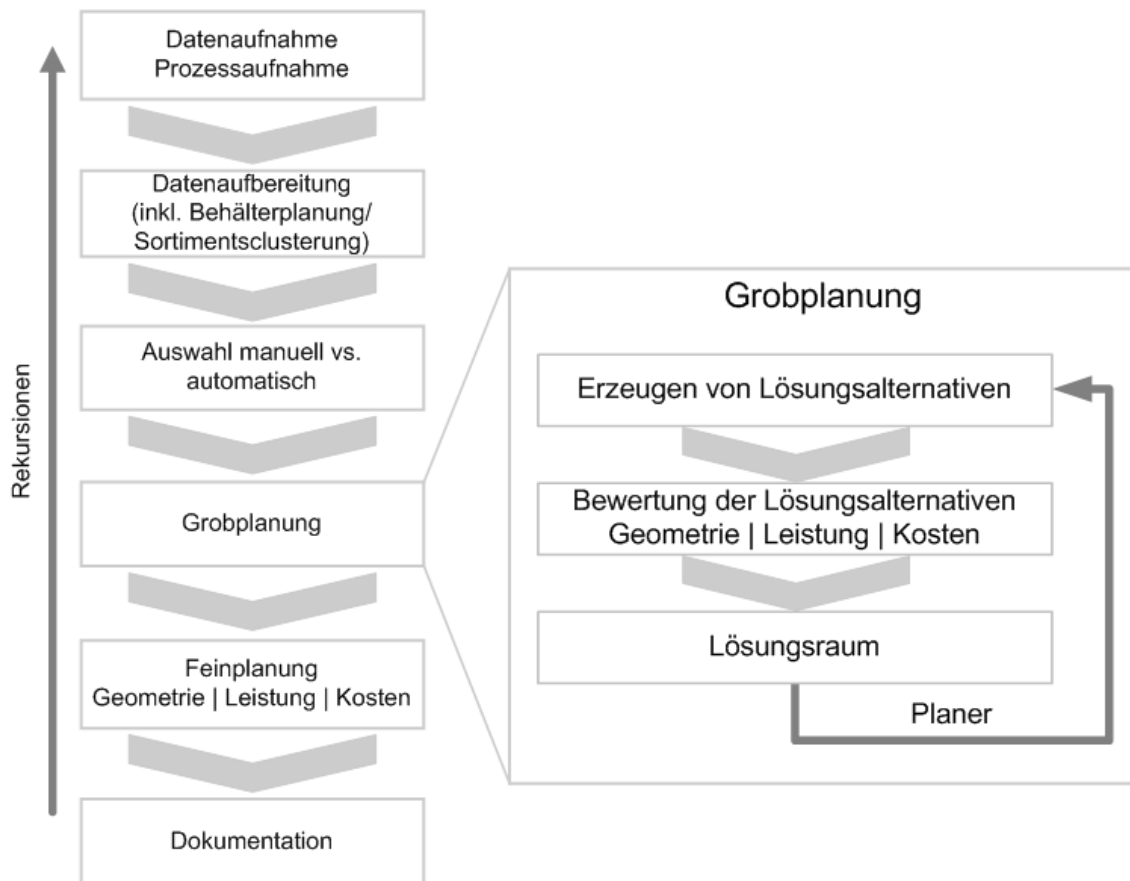


Abbildung 7-1: Einordnung der Planungsmethode in den Planungsprozess

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Entscheidung für ein manuell bedientes System gefallen ist, wobei automatisierte Alternativen mit Hilfe einer geeigneten Planungsmethode parallel untersucht werden können (z. B. mit Hilfe des Tools „Integrierte Lagersystemplanung“ [Gün-2011]). Für die Unterstützung in der hier betrachteten Grobplanungsphase wurden aus dem von *Adam* vorgestellten dreistufigen Prozess [Ada-1996, S. 35] die Erzeugung und anschließende Bewertung von Planungsalternativen übernommen. Die auf diese Weise entstehende Lösungsmenge kann anschließend vom Planer angepasst werden, sodass auch Einflüsse berücksichtigt werden können, die nicht im Rahmen der Modelle für Geometrie, Leistung und Kosten berücksichtigt werden.

Die Umsetzung der beiden Schritte Erzeugung und Bewertung von Planungsalternativen basiert auf einem heuristischen Ansatz, der sich an der Idee eines mitwachsenden, adaptiven Lagers orientiert. In das mitwachsende Lager werden sukzessive die einzelnen Artikel (oder im Vorfeld gebildete Artikelgruppen) hinzugefügt. Das Hinzufügen eines Artikels bildet einen Planungsschritt. Die Anzahl der durchzuführenden Planungsschritte gleicht damit der Artikelzahl. In jedem Planungsschritt werden aus einer Ausgangslösung x_{init} durch zwei Erzeugungsmechanismen neue Planungsalternativen abgeleitet:

1. Für den Artikel des Planungsschritts wird dem Lagersystem ein neuer, für ihn exakt passender Lagerbereich erstellt. Dabei werden verschiedene Konfigurationen, Strategien und Dimensionierungen parallel untersucht. Im ersten Planungsschritt, d. h. ausgehend von einem leeren Lagersystem, ist diese Art der Anpassung die einzig mögliche. Die Lagerbereiche, welche bereits in der Ausgangslösung enthalten waren, bleiben unverändert (Abbildung 7-2 links).
2. Der Artikel des Planungsschritts wird testweise verschiedenen bereits bestehenden Lagerbereichen zugewiesen, sofern das technisch möglich ist. Hier besteht die Möglichkeit, den Lagerbereich so anzupassen, dass neben den in vorangegangenen Schritten zugewiesenen Artikeln auch der gerade betrachtete eingelagert werden kann. Dafür können beispielsweise die Stellplatzhöhe oder die Gassenzahl erhöht werden. Die Ausgangslösung unterscheidet sich also von auf diese Weise abgeleiteten Lösungen in genau einem Lagerbereich. Dieser Lagerbereich beinhaltet zusätzlich die Artikel dieses Planungsschrittes und ist unter Umständen in Konfiguration, Strategien und Dimensionierung angepasst (Abbildung 7-2 rechts).

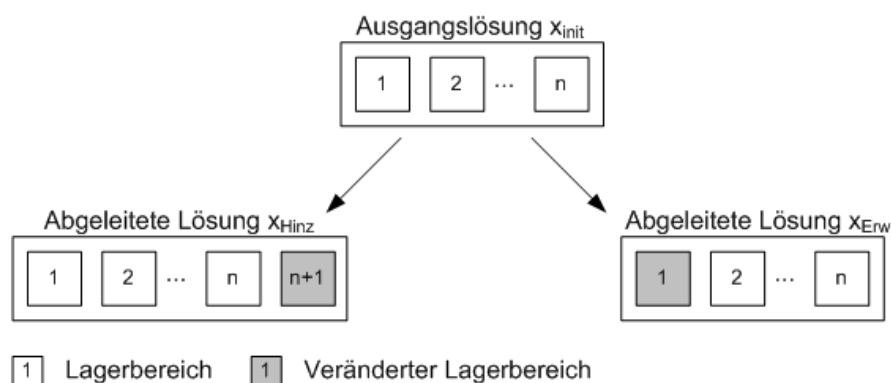


Abbildung 7-2: Zusammenhang zwischen Ausgangslösung und abgeleiteter Lösung bei beiden Erzeugungsmechanismen

Anschließend lassen sich die durch die Änderung zusätzlich hervorgerufenen laufenden Kosten unter Anwendung der Modelle für Geometrie, Leistung und Kosten be-

rechnen. Die Kostendifferenz dient als Kriterium dafür, welche der erzeugten Planungsalternativen als Ausgangslösung des nächsten Planungsschritts verwendet wird. Mit jedem Planungsschritt wird also die Frage beantwortet, auf welche Weise der betrachtete Artikel dem Lagersystem am kostengünstigsten hinzugefügt werden kann. Die Heuristik terminiert, sobald alle Artikel einem Lagerbereich zugewiesen sind. Als Pseudo-Code dargestellt lautet der Ablauf:

Function Planungsmethode()

{

lagersystem x_{init} = new lagersystem();

planungsschritte planschrittlist = ArtikelnPlanungsschritteUmwandeln();

foreach (var ps in planschrittlist) {

X_{Hinz} = PlanungsalternativenErzeugen_ModusHinzufügen(x_{init} , ps); //Menge an Planungsalternativen X_{Hinz} durch Hinzufügen eines neuen Lagerbereichs zu x_{init} erzeugen. Der neue Lagerbereich enthält den/die Artikel des Planungsschritts.

X_{Erw} = PlanungsalternativenErzeugen_ModusErweitern(x_{init} , ps); //Menge an Planungsalternativen X_{Erw} durch Erweitern bestehender Lagerbereiche von x_{init} erzeugen. Gegebenenfalls müssen diese Lagerbereiche angepasst werden.

foreach (var ls in X_{Hinz}) { ls.KostenBerechnen(); }

foreach (var ls in X_{Erw}) { ls.KostenBerechnen(); }

//Bewertung der Planungsalternativen in X_{Hinz} und X_{Erw} hinsichtlich Geometrie, Leistung und Kosten und Berechnung des Kostenabstiegs Δ gegenüber x_{init} .

X_{Hinz} .Sortieren(Δ , auf);

X_{Erw} .Sortieren(Δ , auf);

if ($X_{Hinz}[0].\Delta < X_{Erw}[0].\Delta$) { $x_{init} = X_{Hinz}[0]$; }

else { $x_{init} = X_{Erw}[0]$; }

}

}

Als Ergebnis liegt als Planungsalternative ein Lagersystem vor, welches aus mehreren Lagerbereichen besteht. Anzahl und Ausprägung der Lagerbereiche sowie die Zuweisung der Artikel zu Lagerbereichen entstehen durch die Anpassung der Lagerbereiche und Auswahl der Planungsalternative mit der geringsten Kostendifferenz zum vorherigen Schritt und lassen sich aus der Planungsalternative ablesen. Werte für die Variablen/Freiheitsgrade des Planungsproblems müssen also nicht im Vorfeld vorgegeben werden, wie es bei der voll- und teilfaktoriellen Untersuchung der Fall wäre, sondern sind Teil des Ergebnisses.

7.3.2 Möglichkeiten zur Konfiguration der Planungsmethode

Der im vorherigen Kapitel erläuterte Ablauf der Planungsmethode kann auf verschiedene Arten erweitert werden. So bieten sich Konfigurationsmöglichkeiten an, durch die eine größere Anzahl an Lösungen untersucht werden können, wobei jeweils Rechenaufwand und Speicherbedarf berücksichtigt werden müssen. Zwei Konfigurationsmöglichkeiten wurden in die Planungsmethode integriert:

- Anzahl an Ausgangslösungen für den nächsten Planungsschritt
Im bisherigen Ablauf (vgl. Kapitel 7.3.1) wurde aus den erzeugten Planungsalternativen in jedem Planungsschritt jeweils die Lösung gewählt, die die geringsten Zusatzkosten verursacht. Dadurch werden Lösungen verworfen, die in frühen Planungsschritten höhere Zusatzkosten aufweisen als die günstigste Lösung, dafür aber in späteren Planungsschritten mit geringeren Zusatzkosten verbunden sind. Erhöht man die Anzahl an Lösungen, die für den nächsten Planungsschritt zugrunde gelegt werden, schafft man - bei erhöhtem Rechenaufwand und Speicherbedarf - die Möglichkeit, dass die Heuristik lokale Optima verlassen kann.
- Reihenfolge der Zuweisung von Artikeln
Es ist davon auszugehen, dass die Reihenfolge der Planungsschritte einen Einfluss auf die entstehenden Lösungen hat, wobei Wechselwirkungen nur innerhalb der Planungsschritte der Einheitenlagerung, Kommissionierung und Kommissionierung mit Nachschub bestehen. Möglichkeiten, die Reihenfolge der Planungsschritte zu variieren, sind beispielsweise die Ordnung nach auf- oder absteigendem Lagerplatzbedarf der Artikel oder die mehrmalige Durchführung mit zufälliger Reihenfolge.

Darüber hinaus sind weitere, nicht im Rahmen des Projekts umgesetzte Konfigurationsmöglichkeiten denkbar. So könnten als Auswahlkriterium anstatt der Differenz der laufenden Kosten auch ausgewählte Kostenanteile wie Flächenkosten oder Kosten für die Bedientechnik verwendet werden. Damit entstünde dann eine hinsichtlich der

Fläche oder erzielbaren Leistung möglichst gute Lösung. Auch für die Reihenfolgebildung der Planungsschritte können neben den genannten Möglichkeiten weitere Kriterien verwendet werden, beispielsweise die Sortierung nach Ladungsträgerabmessungen oder Stapelbarkeit der Lagereinheiten.

7.3.3 Erhaltung der Flexibilität des Planers

Bei den Planungsalternativen, welche durch die Planungsmethode gefunden werden, ist der Begriff der optimalen Lösung nicht zutreffend. Einerseits sind die Planungsalternativen durch die Anwendung eines heuristischen Ansatzes von unbekannter Qualität. Es kann sich zwar um die kostengünstigste mögliche Lösung handeln, was sich aber ohne Kenntnis aller möglichen Lösungen nicht belegen lässt. Darüber hinaus handelt es sich lediglich um die kostengünstigste Lösung im Rahmen der verwendeten Modelle für Geometrie, Leistung und Kosten. Bewertungsgrundlage sind allein die monetären Aspekte, welche durch die genannten Modelle erfasst werden. Darüber hinausgehende, monetär oftmals nur schwierig zu bewertende Aspekte werden von der Planungsmethode nicht berücksichtigt, sind jedoch ebenfalls wichtig dafür, dass der Planer von der optimalen Lösung spricht.

Die Flexibilität des Planers bei der Lagersystemplanung muss also erhalten werden, sodass gewährleistet ist, dass monetär nicht bewertbare Aspekte ebenfalls in die Lösungsfindung einfließen können. Die Ergebnisse der hier vorgestellten Planungsmethode sind daher als Unterstützung des Planers zu verstehen und sollen einen schnellen Überblick über mögliche Systemausprägungen geben. Darüber hinaus beinhaltet die Planungsmethode die Möglichkeit, dass der Planer gefundene Planungsalternativen nachträglich anpasst.

8 Implementierung eines Demonstrators zur optimalen Planung manuell bedienter Lagersysteme

In diesem Kapitel werden die Umsetzung der Planungsmethode in einem Software-Demonstrator (Kapitel 8.1) sowie die darauf aufbauende Validierung der Bewertungsmodelle (Kapitel 8.2) und die abschließende Evaluation (Kapitel 8.3) beschrieben. Als Ergebnis liegt damit eine beispielhafte, valide Umsetzung als Rechnerwerkzeug vor, deren Nutzen für die Unterstützung des Planers in der Grobplanungsphase belegt ist.

8.1 Aufbau und Bedienung des Demonstrators

Die entwickelte Planungsmethode wurde in einem Software-Demonstrator umgesetzt. Die Implementierung erfolgte mit der Programmiersprache C# in der Entwicklungsumgebung MS Visual Studio. Der Demonstrator wurde als Windows-Anwendung mit einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) erstellt. Für die Erstellung der GUI wurde WPF (Windows Presentation Foundation) verwendet. Durch Anwendung des Model View ViewModel-Entwurfsmusters wurde der eigentliche Programmcode von der Darstellung in der GUI getrennt.

Das Funktionsprinzip des Demonstrators ist in Abbildung 8-1 dargestellt. Die einzugebenden Daten umfassen Szenario-Daten, welche abhängig vom jeweils betrachteten Planungsfall sind, sowie Technik-Daten, die Varianten der Lagerbedienung, Lagereinrichtung und Lagerungsträger beinhalten. Durch einen Lösungsgenerator und die gemäß Kapitel 4, 5 und 6 implementierten Modelle zur Bewertung wird die Suche nach Planungsalternativen umgesetzt. Die gefundene Menge an Lösungen wird anschließend ausgegeben und kann vom Nutzer editiert werden.

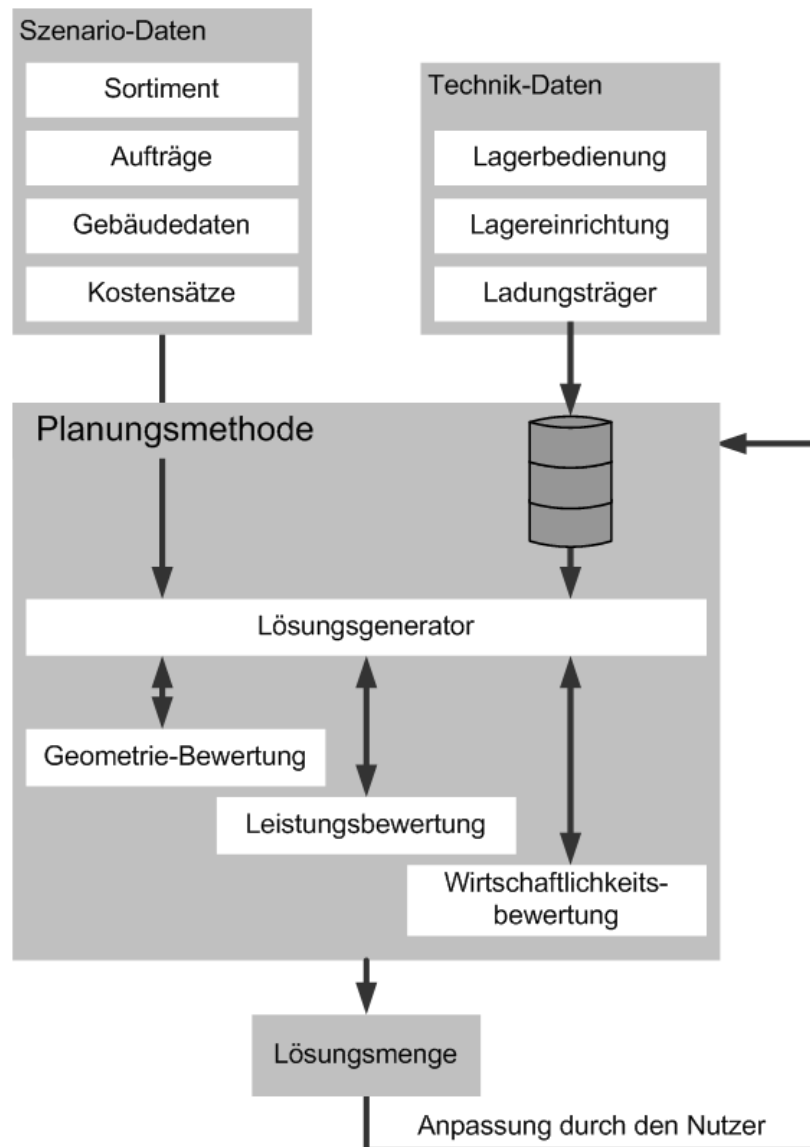


Abbildung 8-1: Funktionsprinzip des Demonstrators

8.1.1 Programmstruktur

Durch die Nutzung der objektorientierten Programmiersprache C# besteht das Programm aus Klassen, welche hierarchisch geordnet sind. Abbildung 8-2 zeigt ein vereinfachtes Klassendiagramm. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden insbesondere die Bewertungsmodelle nicht weiter aufgeschlüsselt.

Mit Anbindung an die GUI stellt *C_Optimierung* die Hauptklasse dar. Sie enthält auf erster Unterenebene das sogenannte *Repository*, welches alle Eingabedaten enthält und sie anderen Klassen zur Verfügung stellt. *C_Planungsablauf* enthält die Planungsschritte, welche nacheinander durch *C_Lösungsgenerator* bearbeitet werden. Die er-

zeugten Planungsalternativen werden in *C_Lösungsmenge* abgelegt. Jede Planungsalternative besteht aus mehreren Lagerbereichen, deren Ausprägung durch *C_Konfiguration*, *C_Strategien* und *C_Dimensionierung* festgelegt ist. Basierend auf diesen drei Klassen werden *C_Geometrie*, *C_Leistung* und *C_Kosten* des Lagerbereichs aufgestellt. Die Klasse *C_Wirtschaftlichkeit* einer Planungsalternative summiert die Investition der Lagerbereiche und nimmt die Umrechnung in laufende Kosten vor.

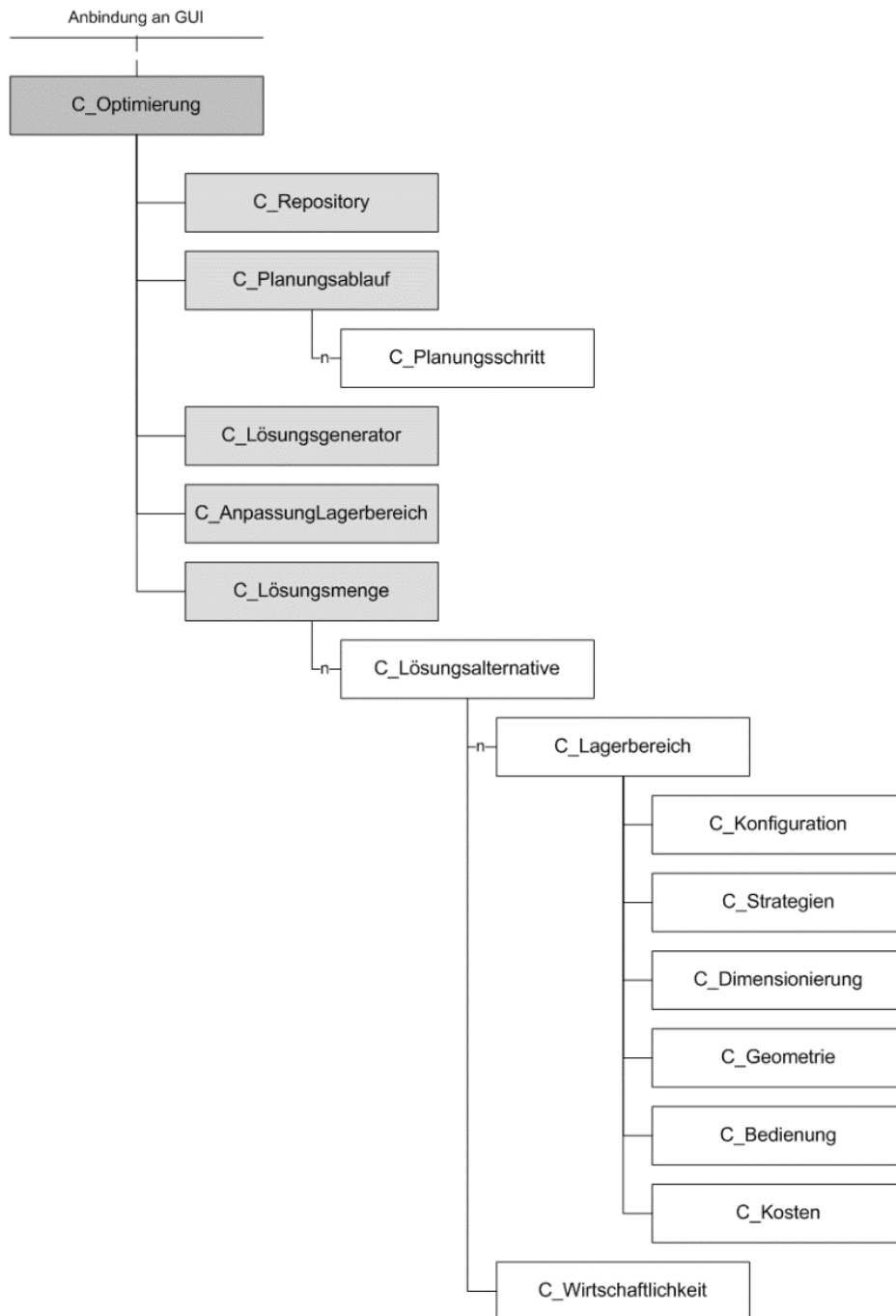


Abbildung 8-2: Vereinfachtes Klassendiagramm des Demonstrators

8.1.2 Benutzeroberfläche zur Datenein-/ausgabe

Die Startseite der Benutzeroberfläche führt zu den Eingabemasken der Szenario- und Technikdaten sowie zu einer weiteren Seite zur Durchführung der Optimierung (Abbildung 8-3).

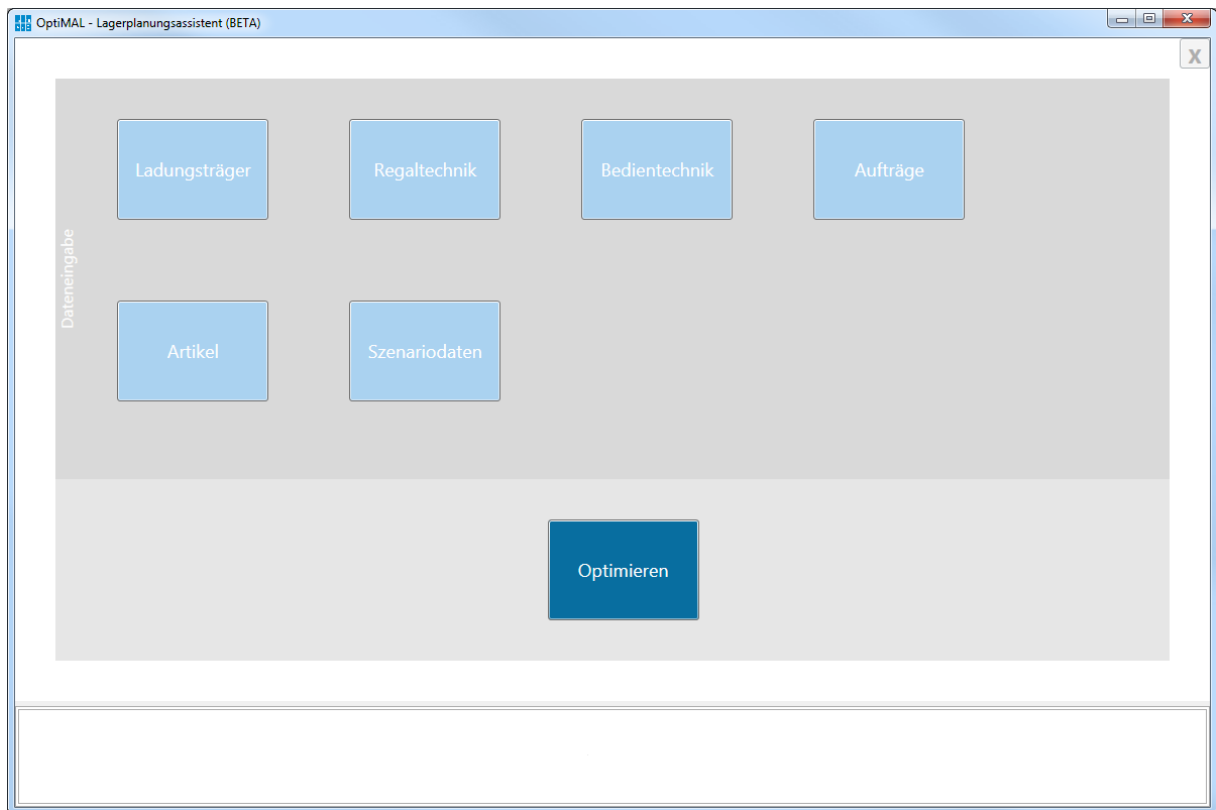


Abbildung 8-3: Startseite des Demonstrators

Die Eingabemasken für Szenario- und Technik-Daten bieten dem Nutzer jeweils die Möglichkeit, neue Datensätze anzulegen oder bestehende zu editieren. Abbildung 8-4 zeigt exemplarisch die Eingabemaske für die Eingabe von Bediengeräten. Im linken Bereich der Seite werden bereits bestehende Datensätze angezeigt. Im rechten Bereich werden die Eigenschaften des gewählten Datensatzes dargestellt und bearbeitet. Die jeweils benötigten Daten folgen aus den Bewertungsmodellen für Geometrie, Leistung und Wirtschaftlichkeit.

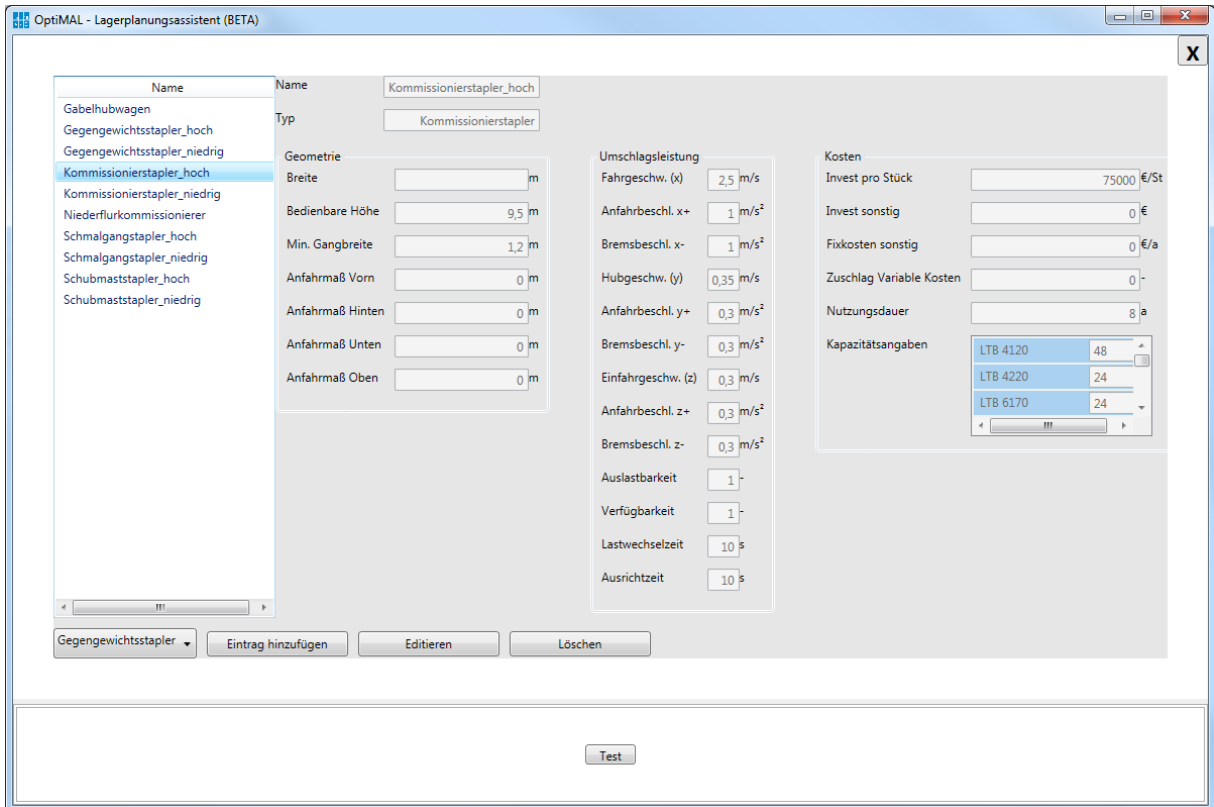


Abbildung 8-4: Dateneingabe von Bediengeräten

8.1.3 Ablauf der Optimierung

Der Ablauf der Optimierung richtet sich prinzipiell nach den Ausführungen in Kapitel 7.3, wurde jedoch an einigen Stellen angepasst. Auf diese Anpassungen sowie ihre Ursachen wird im folgenden Kapitel eingegangen.

In der Theorie lässt sich für jeden Artikel ein Planungsschritt durchführen. Das Sortiment kann in Planungsfällen aus der industriellen Praxis jedoch schnell einige tausend Artikel umfassen. Gleichzeitig existieren bei der Erweiterung bestehender Lagerbereiche zahlreiche zu untersuchende Möglichkeiten, wie eine neue Planungsalternative aussehen kann, da prinzipiell die Freiheitsgrade der Konfiguration, Strategien und Dimensionierung angepasst werden können. Um den Rechenaufwand zu begrenzen, wurde daher der Ansatz gewählt, in jedem Planungsschritt eine durch den Anwender vordefinierte Artikelgruppe anstatt eines einzelnen Artikels zu planen. Als Kriterium zur Bildung einer Artikelgruppe wird der Auftrag herangezogen: alle Artikel, welche der Nutzer dem selben Auftrag zugeordnet hat, bilden eine Artikelgruppe. Es besteht daher eine 1:n-Verbindung zwischen Artikeln und Aufträgen. Daraus folgt, dass es sich bei den vom Nutzer eingegebenen Aufträgen um repräsentative (d. h. „mittlere“) Aufträge handeln muss. Artikelgruppen werden nicht zerlegt. Artikel der selben Artikelgruppe werden also in jedem Fall dem selben Lagerbereich zugeordnet.

Prinzipiell können alle Artikelgruppen in den selben Lagerbereich eingelagert werden - sofern sich eine solche Planungsalternative als günstig erweist und gültig ist. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die gemeinsame Lagerung von Artikelgruppen (Gültigkeit einer solchen Lösung vorausgesetzt) oder die isolierte Lagerung einer Artikelgruppe zu erzwingen. Dadurch lassen sich beispielsweise Gefahrstoffe und Kühl-/Tiefkühlanforderungen von Teilen des Sortiments berücksichtigen.

Zur Erzeugung neuer Planungsalternativen stehen zwei Erzeugungsmechanismen zur Verfügung. Als Grundlage für das Hinzufügen neuer Lagerbereiche wird in jedem Planungsschritt eine Vielzahl an Lagerbereichen generiert, welche die Artikelgruppe des Planungsschrittes beinhalten. Diese zur Auswahl stehenden Lagerbereiche unterscheiden sich in ihrer Konfiguration, ihren Strategien und der Dimensionierung. Die Kosten, die mit diesem Lagerbereich verbunden sind, entsprechen in diesem Fall dem von der Heuristik als Auswahlkriterium verwendeten Kostendelta. Werden nun durch diesen Erzeugungsmechanismus neue Planungsalternativen erzeugt, so geschieht das durch Kombination der günstigsten neuen Lagerbereiche mit den bisherigen Lösungen.

In Testläufen mit dem Demonstrator wurde festgestellt, dass sich eine unterschiedliche Konfiguration oder unterschiedliche Strategien stärker auf die Kosten auswirken als eine leicht abweichende Dimensionierung. Um zu verhindern, dass eine Vielzahl an unterschiedlich dimensionierten Lagerbereichen mit identischer Konfiguration und identischen Strategien sowie dadurch sehr ähnlichen Kosten zu einer in sich sehr variationsarmen Lösungsmenge führt, wurde folgende Erweiterung des Verfahrens umgesetzt: für jedes Set an Konfiguration/Strategien wird jeweils nur die kostengünstigste Dimensionierung betrachtet. Dadurch gibt es in der Menge der erzeugten Planungsalternativen X_{Hinz} keine zwei Lösungen, die sich nur in der Dimensionierung ihrer Lagerbereiche unterscheiden. Analog wurde diese Erweiterung auch auf den zweiten Erzeugungsmechanismus übertragen: bei Erweiterung eines bestehenden Lagerbereichs werden Konfiguration und Strategien beibehalten. Da durch die zusätzlichen Artikel zusätzliche Lagerplätze gebraucht werden, wird die Dimensionierung variiert. Die Dimensionierung, welche den geringsten Kostenunterschied verursacht, wird auch hier als einzige berücksichtigt. Daraus folgt, dass sich auch in der Menge von Planungsalternativen X_{Erw} keine zwei Planungsalternativen lediglich in der Dimensionierung ihrer Lagerbereiche unterscheiden. Der Vorteil dieser Anpassung für den Nutzer besteht darin, dass vor allem unterschiedliche Konfigurationen und Strategien verglichen werden können.

Für die Optimierung kann der Nutzer zwischen drei möglichen Konfigurationen der Heuristik hinsichtlich der Reihenfolge der Planungsschritte wählen: einerseits können

sie in zufälliger Reihenfolge und mehrmals wiederholt durchgeführt werden, andererseits lassen sich die Planungsschritte auf- oder absteigend nach der Anzahl benötigter Lagerplätze der Artikelgruppe ordnen. Darüber hinaus muss der Nutzer angeben, wie viele Planungsalternativen jeweils dem nächsten Planungsschritt als Ausgangslösung dienen sollen.

8.1.4 Benutzeroberfläche zur Datenausgabe und Anpassung von Planungsalternativen

Nach Durchführung des Optimierungslaufs gelangt der Nutzer automatisch auf die Seite zur Datenausgabe. Hier werden die verschiedenen Planungsalternativen dargestellt (Abbildung 8-5) und können über ein weiteres Fenster detaillierter eingesehen werden (Abbildung 8-6). Bei der Datenausgabe ist zu beachten, dass zwar zwei Planungsalternativen vergleichbar sind - das selbe Sortiment wird in einem Lagersystem mit ausreichender Leistungsfähigkeit gelagert -, zwei Lagerbereiche verschiedener Planungsalternativen jedoch in der Regel nicht - nur wenn die selben Artikelgruppen zugewiesen sind, sind die jeweiligen Lagerbereiche vergleichbar, da das selbe Sortiment mit ausreichender Leistungsfähigkeit gelagert wird.

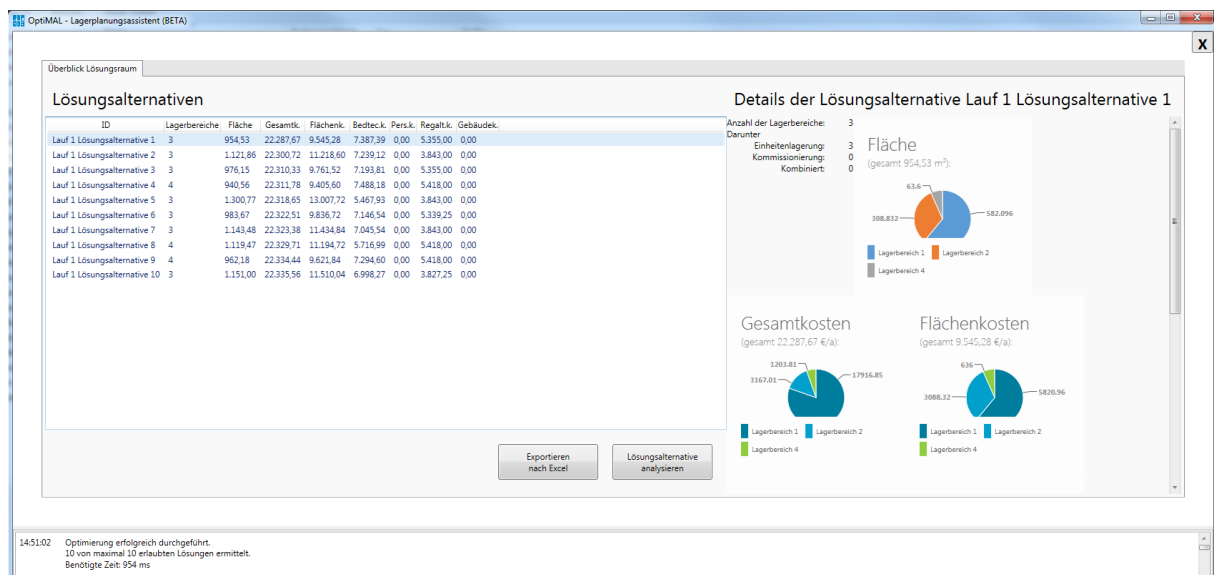


Abbildung 8-5: Datenausgabe der Lösungsmenge

Um mit Hilfe des Demonstrators aufzuzeigen, dass die Flexibilität des Planers erhalten werden kann, wurde eine weitere Seite zur Anpassung von Lagerbereichen hinzugefügt. So lassen sich aus bestehenden Planungsalternativen neue ableiten, beispielsweise durch die Anpassung der Dimensionierung (Abbildung 8-7). Die Auswirkungen der durch den Nutzer vorgenommenen Anpassungen werden dabei direkt durch die erneute Bewertung von Geometrie, Leistung und Kosten ermittelt und angezeigt. Der Nutzer ist dadurch gewissermaßen „in the loop“ geschaltet.

8 Implementierung eines Demonstrators zur optimalen Planung manuell bedienter Lagersysteme

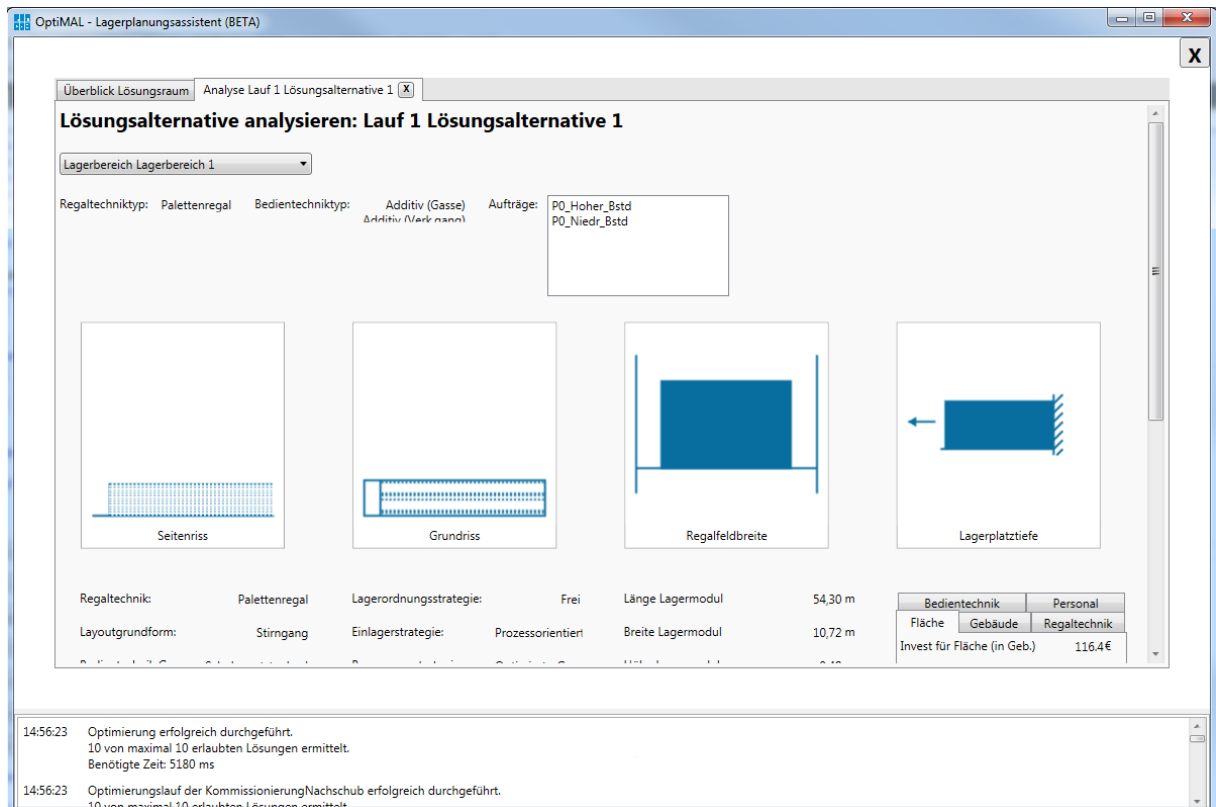


Abbildung 8-6: Detailsicht einer Planungsalternative (Ausschnitt)

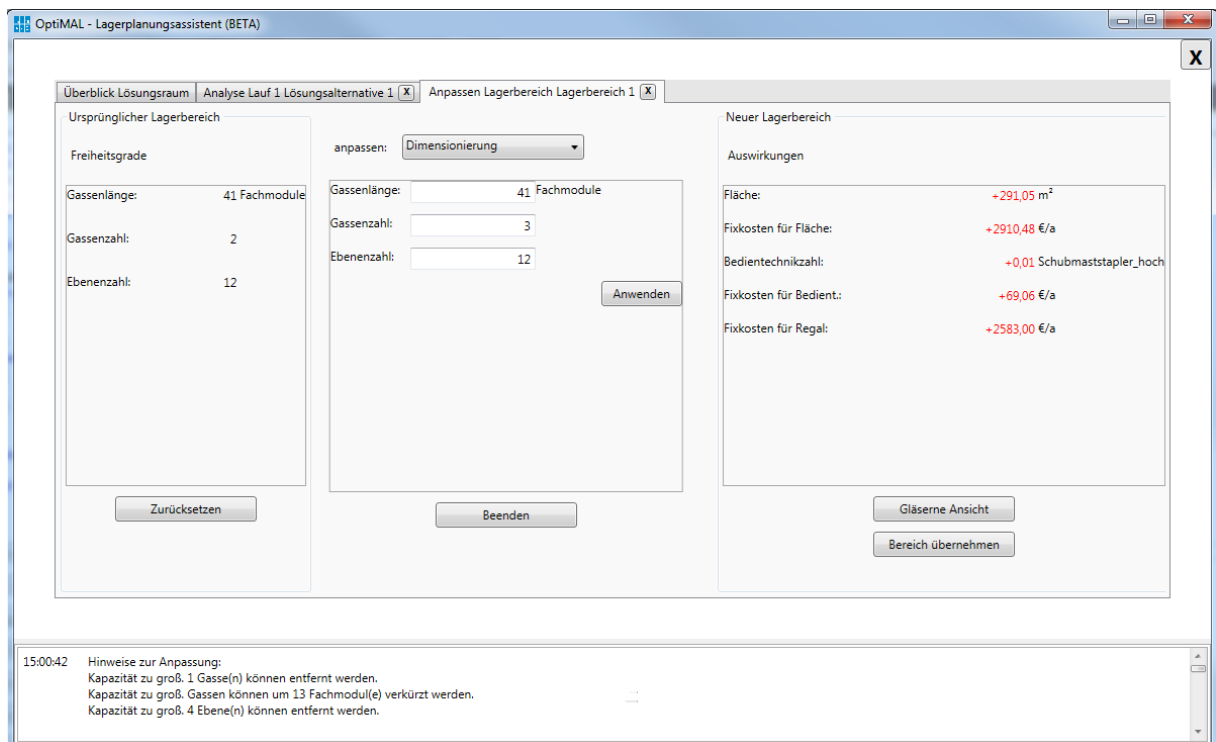


Abbildung 8-7: Ansicht zur Anpassung eines Lagerbereichs (am Beispiel Dimensionierung)

8.2 Validierung

Validierung bedeutet nach *VDI-Richtlinie 3633-1* „die Prüfung [der] hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Original. Es ist sicherzustellen, dass das Modell das Verhalten des realen Systems genau genug und fehlerfrei widerspiegelt (Ist es das richtige Modell für die Aufgabenstellung?)“ [VDI-3633-1]. Diese Richtlinie bezieht sich zwar auf die Simulation von Materialflusssystemen, die Definition der Validierung lässt sich jedoch auf den Demonstrator übertragen: die Modelle zur Bewertung von Geometrie, Leistung und Kosten müssen validiert werden, um zu gewährleisten, dass die Planungsmethode auf eine valide Bewertung der Planungsalternativen aufbaut. In den folgenden Kapiteln wird die Validierung der Modelle erläutert, welche im Rahmen des Projekts OptiMAL durchgeführt wurde.

8.2.1 Validierung des Modells zur Geometriebewertung

Zur Validierung des Modells zur Geometriebewertung wurde die Methode des Abgleichs der Berechnungsergebnisse mit real existierenden oder ausgeplanten Lagerbereichen ausgewählt. Es wurden daher gemeinsam mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses drei Lagerbereiche mit Palettenregalen sowie ein Lagerbereich mit Fachbodenregal identifiziert, welche die Grundlage zur Validierung bilden (Abbildung 8-8).

	Bereich	1	2	3
Abgelesen/Gemessen aus techn. Zeichnung	Fachmodul	Einfachtief, Dreiplatzsystem		
		8 Ebenen		6 Ebenen
	Gassenlänge	21 FM	13 FM	23 FM
	Gassenzahl	5	3	1
	Lagergut	Euro-Pal. h = 130 cm		Euro-Pal. h = 95 cm
	Stellplatzzahl	5040	3276	828
	Lagerbereich (L/B/H)	62,7 m 32,0 m 9,4 m	76,0 m 21,8 m 9,5 m	64,7 m 7,3 m 9,2 m
Berechnung	Berechnung (L/B/H)	62,5 m 31,5 m 9,6 m	75,7 m 21,5 m 9,6 m	64,5 m 7,2 m 9,3 m
	Mittl. Abweichung	1,1%	1,1%	1,1%

Abbildung 8-8: Validierungsergebnisse dreier Lagerbereiche mit Palettenregal [Sta-2015]

Dabei wurden aus den zur Verfügung gestellten technischen Zeichnungen die relevanten Freiheitsgrade sowie Abmessungen von Regal und Lagergut ermittelt. Mit Hilfe dieser Daten wurde die Geometrie bewertet und die berechneten Gesamtabmessungen (l_{LM} , b_{LM} , h_{LM}) mit den Abmessungen aus der technischen Zeichnung verglichen. Wie Abbildung 8-8 zeigt, liegen die Abweichungen mit im Mittel 1 % deutlich unter der als akzeptabel angenommenen Schranke von 20 %.

Das Modell zur Bewertung der Geometrie kann daher als valide angenommen werden.

8.2.2 Validierung des Modells zur Bewertung der Leistung

Dem Modell zur Bewertung der Leistung liegen verschiedene analytische Modelle für bestimmte Spielarten zugrunde. Diese Modelle wurden in wissenschaftlichen Arbeiten vorgestellt und validiert, sodass auf deren Validierung an dieser Stelle verzichtet wird. Eine Validierung ist daher lediglich für Anpassungen nötig, die an den verwendeten Modellen vorgenommen wurden, um den ursprünglichen Geltungsbereich zu erweitern. Dies betrifft insbesondere die Erweiterung der Spielzeitmodelle um die Berücksichtigung beidseitig bedienter Lagereinrichtung und des Zentralganglayouts.

Als Methode zur Validierung wurde die Monte-Carlo-Methode gewählt. Die Grundidee dieser Methode ist die Erzeugung von verschiedenen Spielen durch „Würfeln“ mit einem Zufallsgenerator [Sei-2010, S. 42f.]. Es wird also nacheinander eine große Anzahl an Lagerplätzen angefahren und jeweils die dafür benötigte Spielzeit ermittelt. Mit hinreichend großer Anzahl an Spielen kann der Mittelwert der Spielzeiten als Referenz für die entsprechende analytische Formel aus dem Modell zur Bewertung der Leistung herangezogen werden. Variiert wurden die Spielart, die Layoutgrundform sowie die Gassenlänge und Gassenzahl. Als Kriterium zur Beurteilung der Validität wurde eine maximale Abweichung zwischen den Spielzeiten aus dem Modell und den gewürfelten Spielen von +/- 15 % festgelegt.

Abbildung 8-9 zeigt beispielhaft für Einzelspiele im Zentralganglayout, dass die Abweichungen zwischen Modell und Monte-Carlo-Methode unter 15 % liegen und mit zunehmender Gassenlänge und Gassenzahl abnehmen.

Das Modell zur Bewertung der Geometrie kann daher als valide angenommen werden.

Anzahl Lagerplätze pro Gasse	50	8.75	7.94	7.09	6.31	5.67	5.18	4.75
	47	8.94	8.09	7.20	6.40	5.74	5.24	4.80
	44	9.13	8.23	7.31	6.49	5.81	5.30	4.85
	41	9.31	8.37	7.42	6.57	5.88	5.36	4.90
	38	9.50	8.51	7.53	6.66	5.95	5.41	4.95
	35	9.71	8.67	7.65	6.75	6.02	5.47	5.00
	32	9.91	8.82	7.76	6.84	6.09	5.53	5.04
	29	10.12	8.97	7.88	6.93	6.16	5.58	5.09
	26	10.32	9.11	7.98	7.00	6.22	5.63	5.12
	23	10.51	9.25	8.07	7.07	6.26	5.66	5.15
	20	10.70	9.38	8.17	7.14	6.31	5.70	5.17
Anzahl Gassen	17	10.86	9.48	8.23	7.17	6.33	5.71	5.17
	14	10.96	9.53	8.25	7.17	6.32	5.68	5.15
	11	10.96	9.50	8.19	7.10	6.24	5.61	5.07
		2	5	8	11	14	17	20

Abbildung 8-9: Validierungsergebnisse für Einzelspiele im Zentralganglayout. Dargestellt ist die prozentuale Abweichung zwischen Monte-Carlo-Methode und Modell zur Bewertung der Leistung [Hun-2016]

8.2.3 Validierung der Kostenbewertung

Das Modell zur Bewertung der Kosten baut auf die Kostenvergleichsrechnung als etablierte Methode der Wirtschaftlichkeitsrechnung auf. Es wurde daher auf eine Validierung der Methode verzichtet.

8.3 Evaluation der Planungsmethode

Während die Validierung darauf abzielt, die Anwendbarkeit von Modellen für eine bestimmte Problemstellung nachzuweisen, ist das Ziel der Evaluation die Bewertung von Maßnahmen [Bor-2006, S. 95]. Diese aus dem Bereich der Sozialwissenschaften stammende Definition lässt sich auf die in diesem Projekt entwickelte Planungsmethode übertragen: durch Evaluation kann beurteilt werden, ob die Projektziele der verbesserten Planung manuell bedienter Lagersysteme und der Unterstützung von Planern in der Grobplanungsphase erfüllt wurden.

Zur Evaluation der Planungsmethode wurde ein Anwendertest mit Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt, bei dem die Teilnehmer die Aufgabe hatten, selbstständig drei fiktive Planungsfälle zu bearbeiten. Basierend darauf wurde mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens der Demonstrator bewertet (Anhang C). Der Fragebogen bestand sowohl aus geschlossenen Fragen als auch aus offenen Fragen für zusätzliche Erläuterungen und Feedback zum Demonstrator.

Der Fragebogen beinhaltete 35 Fragen in 4 Abschnitten:

- Abschnitt 1: Fragen zur Person
- Abschnitt 2: Fragen zur Bedienung des Demonstrators
- Abschnitt 3: Fragen zum Konzept der Datenausgabe und Anpassung von Lagerbereichen
- Abschnitt 4: Fragen zum Konzept des Demonstrators

Die folgenden Kapitel geben eine kurze Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse aus der Evaluation.

8.3.1 Fragebogen: Fragen zur Person (Fragen 1-4)

Von 20 Teilnehmern der Anwendertests beantworteten 12 den abschließenden Fragebogen vollständig (Rücklaufquote: 60 %). Die folgenden Antworten basieren auf dieser Grundgesamtheit. Der Branchenhintergrund der Teilnehmer (Abbildung 8-10) zeigt, dass ein Großteil aus den Branchen Beratung/Planung und Logistik stammt.

Branchenhintergrund der Teilnehmer

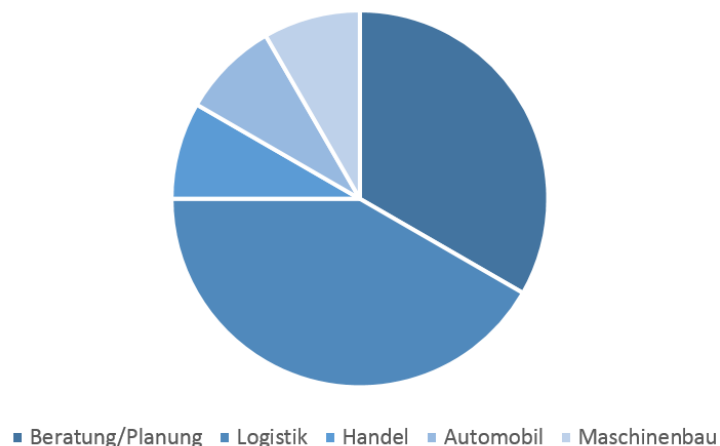


Abbildung 8-10: Branchenhintergrund der Teilnehmer des Anwendertests

Die eigene Erfahrung mit der Planung manuell bedienter Lagersysteme wird auf einer Skala von „keine Erfahrung“ (1) über „Grundkenntnisse“ (2) und „routiniert“ (3) bis hin zu „langjährige Erfahrung“ (4) bewertet. Der Mittelwert liegt bei 2,8 (Standardabweichung 0,9). Ähnlich wird die Erfahrung mit Rechnerunterstützung bei der Planung manuell bedienter Lagersysteme eingeschätzt (MW 2,5; SA 0,9), wobei als angewendete Tools MS Excel (5 Nennungen, Mehrfachnennungen möglich) und eigenständige Software (4) dominieren. Zusammenfassend verfügen die Teilnehmer über Expertise auf

dem Gebiet der Lagersystemplanung und werden als geeignet für die Evaluation des Software-Demonstrators angesehen.

8.3.2 Fragebogen: Fragen zur Bedienung des Demonstrators (Fragen 5-22)

Zur Bedienung des Demonstrators werden einerseits allgemeine Fragen gestellt, andererseits wird die Struktur und Bedienbarkeit der einzelnen Seiten des Demonstrators gesondert erfragt. Die Ergebnisse dieses Fragenkomplexes wurden bereits als Grundlage für die Überarbeitung des Demonstrators genutzt und sind in der finalen Version enthalten. Zur Beurteilung des Gesamtkonzepts hinsichtlich der Anwendbarkeit in der Grobplanungsphase ist es bedeutend, dass der Aufwand zur Dateneingabe insgesamt als gering eingeschätzt wurde (MW 2,1; SA 0,8 auf einer Skala von „gering“ (1) bis hoch (5)).

8.3.3 Fragebogen: Fragen zur Datenausgabe und Anpassung von Lagerbereichen (Fragen 23-33)

Um die Planungsmethode für die Unterstützung in der Grobplanungsphase anwenden zu können, müssen die generierten Planungsalternativen für diese Planungsphase ausreichend detailliert und verwendbar sein. Beides wird von den Teilnehmern als zutreffend bewertet (Detaillierungsgrad ausreichend: MW 3,5; SA 1,3; Planungsalternativen verwendbar: MW 4,4; SA 0,7; beides auf einer Skala von „trifft nicht zu“ (1) bis „trifft zu“ (5)).

Gleichzeitig zeigt sich die Bedeutung der Anpassung von Planungsalternativen für die Flexibilität des Planers (Bewertung auf einer Skala von „trifft nicht zu“ (1) bis „trifft zu“ (5)):

- Die Einbindung des Planers durch manuelle Überarbeitung der Lösungsmenge ist sinnvoll: MW: 3,7; SA: 1,6
- Die manuelle Überarbeitung der Lösungsmenge gewährt dem Planer Flexibilität: MW: 4,5; SA: 0,7
- Die Anpassung einer Lösung in der Grobplanungsphase ist sinnvoll: MW: 4,6; SA: 0,5
- Die Durchführung der Anpassung ist einfach: MW: 3,6; SA: 1,4

Es zeigt sich jedoch auch, dass neben der in den Anwendertests gezeigten Anpassung der Dimensionierung weitere Anpassungsmöglichkeiten gewünscht werden. Alle vorgeschlagenen weiteren Möglichkeiten wie die Anpassung der Konfiguration und

Strategien, das Umverteilen von Artikeln sowie das Auflösen von Lagerbereichen würden genutzt.

8.3.4 Fragebogen: Fragen zum Konzept des Demonstrators (Fragen 34-35)

Mit diesem letzten Fragenblock soll beurteilt werden, ob der Demonstrator und die enthaltene Planungsmethode die gesteckten Ziele erfüllen. Die Ergebnisse (Abbildung 8-11) zeigen deutlich, dass durch Anwendung der Planungsmethode eine Unterstützung des Nutzers erreicht werden kann: durch die schnelle Übersicht über verschiedene Planungsalternativen wird nach Einschätzung der Teilnehmer die Planung beschleunigt und die Ergebnisqualität verbessert.

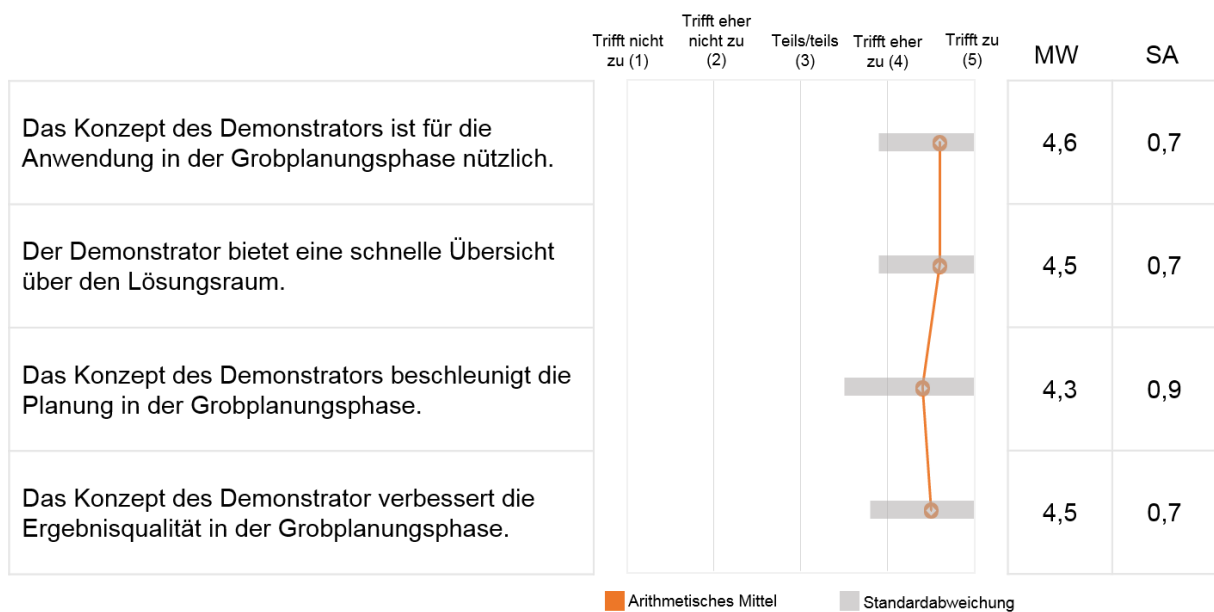


Abbildung 8-11: Evaluation des Konzepts des Demonstrators

9 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse des Forschungsprojekts zusammengefasst (Kapitel 9.1) und in einen Ausblick überführt (Kapitel 9.2).

9.1 Zusammenfassung

Zielsetzung des Forschungsprojekts OptiMAL ist die Entwicklung einer Planungsmethode für manuell bediente Lagersysteme. Solche Systeme, bei denen Personal manuell oder mit mechanisierter Unterstützung Ein- und Auslagervorgänge durchführt, sind trotz zunehmender Tendenz zur Automatisierung ein wichtiger Bestandteil von Wertschöpfungsketten. Gleichzeitig existiert eine Vielzahl solcher Systeme mit unterschiedlichen zugrunde liegenden Prozessen, sodass der Planung eine bedeutende Rolle zukommt. Der Planungsbegriff umfasst hier die Frage danach, wie ein Lagersystem - bestehend aus mehreren Lagerbereichen - gestaltet werden muss, sodass ein vorgegebenes Sortiment möglichst kostengünstig gelagert werden kann und die mit diesem Sortiment verbundenen Aufträge durch eine ausreichende Anzahl an Personal und Bediengeräten gedeckt sind. Die Planungsaufgabe umfasst daher die Festlegung der Ausprägung jedes Lagerbereichs sowie die gleichzeitige Zuweisung von Artikeln aus dem Sortiment zu genau einem der Lagerbereiche.

Zu Beginn werden Kennwerte der verschiedenen Lagertypen identifiziert und klassifiziert. Auf diese Weise können drei Gruppen von Freiheitsgraden ermittelt werden: Die Konfiguration beschreibt die technische Ausprägung eines Lagers, die Strategien geben Abläufe vor und die Dimensionierung beschreibt die räumlichen Abmessungen. Daneben werden mit der Einheitenlagerung, der Kommissionierung und der Kommissionierung mit Nachschublagerung drei zu betrachtende Prozesse festgelegt. Anschließend werden die verschiedenen Systemausprägungen beschrieben und in morphologische Kästen überführt, die für die weiteren Untersuchungen als Grundlage dienen.

Durch grundsätzliche Überlegungen zur Planungsmethode werden die Erzeugung von Planungsalternativen und die anschließende Bewertung als wichtige Schritte identifiziert. Weiterhin werden Zielgrößen ermittelt und in ein Zielsystem überführt, auf welches die Bewertung der verschiedenen Planungsalternativen fußt.

Die im Zielsystem enthaltenen Zielgrößen bauen auf einer Bewertung der Planungsalternativen hinsichtlich der Geometrie, der Leistung sowie der Kosten auf. Hierfür werden geeignete Modelle aufgestellt. Basierend auf dem Modell von *Gudehus* [Gud-2010] wird ein modulares Modell zur Bewertung der Geometrie entwickelt, mit welchem sowohl homogene Lagerbereiche als auch Lagerbereiche mit Kommissionierung und Nachschublagerung abgebildet und bewertet werden können. Für die Bewertung der Leistung und die Berechnung des Bedarfs an Bediengeräten und Personal wird ein analytischer Ansatz gewählt. Für die verschiedenen Prozesse werden Modelle von *Gudehus* und *Sadowsky* herangezogen und wo nötig erweitert [Gud-1973; Sad-2007; Gud-2010]. Basierend auf der Kostenvergleichsrechnung wird anschließend das Modell zur Bewertung der Kosten aufgestellt.

Die erstellten Modelle werden in eine Planungsmethode überführt, um auf diese Weise die kostengünstigste Planungsalternative ermitteln zu können. Hier kann gezeigt werden, dass es nicht möglich ist, exakte Lösungsverfahren effizient anzuwenden, um das globale Optimum zu finden. Aus diesem Grund wird ein heuristisches Lösungsverfahren entwickelt, welches sukzessive ein Lagersystem aufbaut. Schrittweise werden Artikel hinzugefügt und jeweils die Planungsalternative gewählt, welche die zusätzlichen Artikel zu den geringsten zusätzlichen Kosten aufnehmen kann. Zur Bewertung dieses Konzepts wird die Planungsmethode inklusive der Bewertungsmodelle in einen Software-Demonstrator überführt. Durch die Möglichkeit, mit dem Demonstrator entwickelte Planungsalternativen nachträglich anzupassen und die Auswirkungen durch Anwendung der Bewertungsmodelle zu ermitteln, wird die Flexibilität erhalten, die der Planer in der Grobplanungsphase bei manuell bedienten Lagersystemen genießt. Gleichzeitig wird ein systematischer Überblick über die Lösungsmenge und eine möglichst einheitliche Bewertung der verschiedenen Planungsalternativen erreicht.

Nach der Validierung der Bewertungsmodelle werden Anwendertests mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. In den Anwendertests werden Beispielplanungen mit Hilfe des Demonstrators durchgeführt. Eine dazu durchgeführte Umfrage lässt die Schlussfolgerung zu, dass die vorgestellte Planungsmethode in Form des Demonstrators eine Erhöhung der Planungsqualität und Verkürzung der Planungszeit in der Grobplanungsphase bewirkt.

Die Zielsetzung des Projekts, eine Planungsmethode zu entwickeln, welche bei der Planung manuell bedienter Lagersysteme in der Grobplanungsphase unterstützt, kann daher als erreicht angesehen werden.

9.2 Ausblick

Durch das Erreichen der Zielsetzung im Projekt OptiMAL kann gezeigt werden, dass es möglich ist, die vielfältigen Ausprägungsformen manuell bedienter Lagersysteme in einige wenige Bewertungsmodelle zu überführen. Diese lassen sich als Grundlage einer Planungsmethode nutzen, sind jedoch auf Grund des erforderlichen Detaillierungsgrades mathematisch zu komplex, um Bestandteil eines effizient exakt lösbaren Optimierungsproblems zu sein. Aus diesem Grund wird ein heuristisches Verfahren verwendet, welches jedoch eine nicht sichere Lösungsqualität besitzt. Gegenstand weiterer Forschung sollte daher die Weiterentwicklung der Bewertungsmodelle sein, um ein einfacheres mathematisches Grundgerüst zu schaffen, welches mit Hilfe exakter Lösungsverfahren bearbeitet werden kann. Darüber hinaus lässt sich die vorgestellte Heuristik durch weitere Konfigurationsmöglichkeiten und Anpassungsmöglichkeiten für den Planer weiterentwickeln.

Die Qualität der Planungsalternativen ließe sich weiterhin durch die Betrachtung zusätzlicher für die Lagersystemplanung relevanter Aspekte erhöhen: beispielsweise besteht oft ein Säulenraster auf der zu beplanenden Fläche, sodass die Geometrie entsprechend angepasst werden muss. Ein weiterer Punkt ist die Berücksichtigung verschiedener Schichtmodelle. Die Einführung einer zweiten Schicht erhöht zwar den Personalbedarf, jedoch nicht den Bedarf an Bediengeräten.

Literaturverzeichnis

- [Ada-1996] Adam, D.: Planung und Entscheidung – Modelle - Ziele - Methoden. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, Wiesbaden, 1996.
- [All-1999] Allgayer, F.: Computerunterstützte Planung von Materialflusssystemen auf Basis statischer Materialflüsse. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, Technische Universität München, München, 1999.
- [App-1985] Appelt, G.; Krampe, H.: Stückgutlagerung. VEB Verlag Technik, Berlin, 1985.
- [Arn-2009] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer, Heidelberg Dordrecht London New York, 2009.
- [Ash-1985] Ashayeri, J.; Gelders, L. F.: Warehouse design optimization. In: European Journal of Operational Research, Jg. 21 (1985) Nr. 3, S. 285–294.
- [Bas-1980] Bassan, Y.; Roll, Y.; Rosenblatt, M. J.: Internal Layout Design of a Warehouse. In: A I I E Transactions, Jg. 12 (1980) Nr. 4, S. 317–322.
- [Ben-2015] Beninger, H.: Entwicklung eines Modells zur finanziellen Analyse manueller Lager. Master Thesis. Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, Technische Universität München, Garching, 2015.
- [Bor-1994] Borchardt, U.: Spielzeitermittlung für Flurförderzeuge zur Regalbedienung mit von der Hubhöhe abhängiger Fahrgeschwindigkeit. Dissertation. Institut für Fördertechnik, Getriebetechnik und Baumaschinen, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1994.
- [Bor-2006] Bortz, J.; Döring, N.: Forschungsmethoden und Evaluation – für Human- und Sozialwissenschaftler. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 2006.
- [Bru-1990] Bruns, R.: Diagonalfahrteinschränkungen von Schmalgangstaplern. In: fördern und heben, Jg. 40 (1990) Nr. 2, S. 82–92.

- [Car-1998] Caron, F.; Marchet, G.; Perego, A.: Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems. In: International Journal of Production Research, Jg. 36 (1998) Nr. 3, S. 713–732.
- [Car-2000] Caron, F.; Marchet, G.; Perego, A.: Optimal layout in low-level picker-to-part systems. In: International Journal of Production Research, Jg. 38 (2000) Nr. 1, S. 101–117.
- [Che-1999] Chew, E. P.; Tang, L. C.: Travel time analysis for general item location assignment in a rectangular warehouse. In: European Journal of Operational Research, Jg. 112 (1999) Nr. 3, S. 592–597.
- [Cor-1996] Cormier, G.; Gunn, E. A.: On coordinating warehouse sizing, leasing and inventory policy. In: IIE Transactions, Jg. 28 (1996) Nr. 2, S. 149–154.
- [DIN-276-1] Deutsches Institut für Normung: Kosten im Bauwesen - Teil 1: Hochbau. DIN Nr. 276-1, 2008.
- [Dom-2011] Domschke, W.; Drexl, A.: Einführung in Operations Research. Springer, Heidelberg Dordrecht London New York, 2011.
- [Dré-2006] Dréo, J.; Siarry, P.; Pétrowski, A.; Taillard, E.; Dréo, J.: Metaheuristics for Hard Optimization – Simulated Annealing, Tabu Search, Evolutionary and Genetic Algorithms, Ant Colonies, ... Springer, Berlin Heidelberg, 2006.
- [Ell-2012] Ellinger, M.; Hompel, M. ten: Agentenbasiertes Planungsmodell für die Grobplanung von Kommissioniersystemen. In: Zadek, H. (Hrsg.): Tagungsband zum 8. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. (WGTL). Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2012, S. 177–187.
- [Fah-1978] Fahnert, V.: Beitrag zur Bestimmung kostengünstiger und anforderungsgerechter Lagersysteme für die Fertigwarenverteilung. Dissertation. Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen, 1978.
- [Fra-1967] Francis, R. L.: On Some Problems of Rectangular Warehouse Design and Layout. In: The Journal of Industrial Engineering, Jg. 18 (1967) Nr. 10, S. 595–604.

- [Gib-1992] Gibson, D. R.; Sharp, G. P.: Order batching procedures. In: European Journal of Operational Research, Jg. 58 (1992) Nr. 1, S. 57–67.
- [Goh-2001] Goh, M.; Jihong, O.; Chung-Piaw, T.: Warehouse Sizing to Minimize Inventory and Storage Costs. In: Naval Research Logistics, Jg. 48 (2001) Nr. 4, S. 299–312.
- [Gro-2014] Grosse, E.; Glock, C. H.; Lonzer, A.: Planung von effizienten Kommissionierprozessen mit Excel-Spreadsheets. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 109 (2014) Nr. 7-8, S. 499–503.
- [Gu-2010] Gu, J.; Goetschalckx, M.; McGinnis, L. F.: Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. In: European Journal of Operational Research, Jg. 203 (2010) Nr. 3, S. 539–549.
- [Gud-1973] Gudehus, T.: Grundlagen der Kommissioniertechnik – Dynamik der Warenverteil- und Lagersysteme. W. Girardet, Essen, 1973.
- [Gud-2010] Gudehus, T.: Logistik – Grundlagen Strategien Anwendungen. Springer, Berlin, 2010.
- [Gün-2011] Günthner, W. A.; Atz, T.; Ulbrich, A.: Integrierte Lagersystemplanung. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2011.
- [Gün-2015a] Günthner, W. A.: Förder- und Materialflusstechnik. Vorlesungsskriptum. Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, Technische Universität München, Garching, 2015.
- [Gün-2015b] Günthner, W. A.: Materialfluss und Logistik. Vorlesungsskriptum. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2015.
- [Hal-1993] Hall, R.: Distance approximations for routing manual pickers in a warehouse. In: IIE Transactions, Jg. 25 (1993) Nr. 4, S. 76–87.
- [Hom-2010] Hompel, M. ten; Schmidt, T.: Warehouse Management – Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen. Springer, Berlin Heidelberg, 2010.

- [Hun-2016] Hund, M.: Simulative Validierung eines Spielzeitmodells für manuell bediente Lagersysteme. Semesterarbeit, Technische Universität München, Garching, 2016.
- [Hwa-2004] Hwang, H.; Oh, Y. H.; Lee, Y. K.: An evaluation of routing policies for order-picking operations in low-level picker-to-part system. In: International Journal of Production Research, Jg. 42 (2004) Nr. 18, S. 3873–3889.
- [Jar-2004] Jarre, F.; Stoer, J.: Optimierung. Springer, Berlin, 2004.
- [Jün-1999] Jünemann, R.; Schmidt, T.: Materialflusssysteme – Systemtechnische Grundlagen. Springer, Berlin Heidelberg New York, 1999.
- [Kal-2013] Kallrath, J.: Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis. Springer Spektrum, Wiesbaden, 2013.
- [Kle-2011] Klein, R.; Scholl, A.: Planung und Entscheidung – Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse. Verlag Franz Vahlen, München, 2011.
- [Kos-2007] Koster, R. de; Le-Duc, T.; Roodbergen, K. J.: Design and control of warehouse order picking – A literature survey. In: European Journal of Operational Research, Jg. 182 (2007) Nr. 2, S. 481–501.
- [Kun-1975] Kunder, R.; Gudehus, T.: Mittlere Wegzeiten beim eindimensionalen Kommissionieren. In: Zeitschrift für Operations Research, Jg. 19 (1975) Nr. 2, S. B53-B72.
- [Mat-2005] Matousek, J.; Nešetřil, J.: Diskrete Mathematik. Springer, Berlin Heidelberg, 2005.
- [Mie-1972] Miebach, J.: Die Grundlagen einer systembezogenen Planung von Stückgutlagern dargestellt am Beispiel des Kommissionierlagers. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 1972.
- [Pap-2015] Pape, U.: Grundlagen der Finanzierung und Investition. De Gruyter, Berlin, 2015.
- [Put-2011] Putnoki, H.; Schwadorf, H.; Then Berg, F.: Investition und Finanzierung. Franz Vahlen, München, 2011.

- [Rei-2013] Reinhardt, R.; Hoffmann, A.; Gerlach, T.: Nichtlineare Optimierung – Theorie, Numerik und Experimente. Springer Spektrum, Berlin Heidelberg, 2013.
- [Rob-1972] Roberts, S. D.; Reed Jr., R.: Optimal Warehouse Bay Configurations. In: A I I E Transactions, Jg. 4 (1972) Nr. 3, S. 178–185.
- [Ros-1984] Rosenblatt, M. J.; Roll, Y.: Warehouse design with storage policy considerations. In: International Journal of Production Research, Jg. 22 (1984) Nr. 5, S. 809–821.
- [Sad-2007] Sadowsky, V.: Beitrag zur analytischen Leistungsberechnung von Kommissioniersystemen. Dissertation. Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Universität Dortmund, Dortmund, 2007.
- [Sch-1996] Schulte, J.: Berechnungsgrundlagen konventioneller Kommissioniersysteme. Dissertation, Universität Dortmund, Dortmund, 1996.
- [Sei-2010] Seibertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE). Springer, Berlin Heidelberg, 2010.
- [Sta-2015] Staab, T.; Günthner, W. A.: Layoutgenerierung und Geometrieberechnung für die systematische Planung manuell bedienter Lager-systeme. In: Noche, B. (Hrsg.): Tagungsband zum 11. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. (WGTL). Universität Duisburg, Duisburg, 2015, S. 227–235.
- [Tho-2012] Thommen, J.-P.; Achleitner, A.-K.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Springer Gabler, Wiesbaden, 2012.
- [Ulbr-2010] Ulbrich, A.: Simulationsgestützte Grobplanung von Kommissioniersystemen. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, Technische Universität München, Garching, 2010.
- [VDI-2516] Verein deutscher Ingenieure: Flurförderzeuge für die Regalbedien-
nung - Spielzeitermittlung in Schmalgängen. VDI-Richtlinie Nr. 2516,
2003.
- [VDI-3590-1] Verein deutscher Ingenieure: Kommissioniersysteme - Grundlagen.
VDI Nr. 3590-1, 1994.

- [VDI-3590-2] Verein deutscher Ingenieure: Kommissioniersysteme - Systemfindung. VDI Nr. 3590-2, 2002.
- [VDI-3633-1] Verein deutscher Ingenieure: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen. VDI-Richtlinie Nr. 3633-1, 2014.
- [Wei-1995] Weidlich, A.: Berechnungsmethode für die mittleren Spielzeiten von Schmalgangstaplern. Dissertation. Fachgebiet Planung und Steuerung von Lager- und Transportsystemen, Universität Hannover, Hannover, 1995.
- [Wis-2009] Wisser, J.: Der Prozess Lagern und Kommissionieren im Rahmen des Distribution Center Reference Model (DCRM). Dissertation. Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2009.
- [Wun-2014] Wunderle, A.; Sommer, T.: Erfahrung und Augenmaß zählen. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 54 (2014) Nr. 7-8, S. 428–430.
- [You-2014] Yousefifar, R.; Beyer, T.; Jazdi, N.; Wehking, K.-H.; Göhner, P.: Dezentrale selbstorganisierte Grobplanung von Intralogistiksystemen mit Hilfe eines Software-Agentensystems. In: Günthner, W. A. (Hrsg.): Tagungsband zum 11. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. (WGTL). Technische Universität München, Garching, 2014, S. 139–150.
- [Zei-1996] Zeidler, E. (Hrsg.): Teubner-Taschenbuch der Mathematik. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1996.
- [Zei-2015] Zeiler, J.: Untersuchungen zur Planung manueller Lagersysteme mithilfe eines Optimierungsalgorithmus. Master Thesis. Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, Technische Universität München, Garching, 2015.
- [Zsc-1964] Zschau, U.: Technisch-wirtschaftliche Studie über die Anwendbarkeit von Stapelkränen im Lagerbetrieb. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 1964.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Beispielhaftes Distributionszentrum mit Wareneingang und Warenausgang sowie einem Lagersystem (gestrichelt) bestehend aus drei Lagerbereichen	24
Abbildung 2-2: Einteilung der Lagereinrichtungen nach [Gün-2015a, S. 4.2]	25
Abbildung 2-3: Konfigurationsmöglichkeiten bei beidseitig bedienbaren Regalen	28
Abbildung 2-4: Orientierung der Lagereinheiten bei Längs- und Quereinlagerung	29
Abbildung 2-5: Bewegungsstrategien bei Einheitenlagerung	34
Abbildung 2-6: Bewegungsstrategien der eindimensionalen Kommissionierung: Schleifenstrategie	36
Abbildung 2-7: Bewegungsstrategien der eindimensionalen Kommissionierung: Stichgangstrategie	36
Abbildung 2-8: Bewegungsstrategien der eindimensionalen Kommissionierung: Mittelpunkt-Heuristik	37
Abbildung 2-9: Bewegungsstrategien der zweidimensionalen Kommissionierung	38
Abbildung 2-10: Allgemeiner Planungsablauf für Materialflusssysteme [All-1999, S. 25]	46
Abbildung 2-11: Herkömmlicher Planungsablauf basierend auf Expertengesprächen mit Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses	48
Abbildung 3-1: Grundlegender Ablauf der Planung	52
Abbildung 4-1: Einordnung des Modells zur Bewertung der Geometrie (als Blackbox dargestellt)	60
Abbildung 4-2: Morphologischer Kasten der Module zur Modellierung der Geometrie	61
Abbildung 4-3: Verwendetes Koordinatensystem (Seitenansicht der Lagergasse oben, Draufsicht unten)	62
Abbildung 4-4: Schemazeichnung und Skizze des kanalförmigen Lagerplatzes	63
Abbildung 4-5: Schemazeichnung des stapelförmigen Lagerplatzes	65
Abbildung 4-6: Skizze des Lagerplatzes bei Einfahr- und Durchfahrregalen	66
Abbildung 4-7: Sägezahnförmiger Bestandsverlauf	67
Abbildung 4-8: Schemazeichnung und Skizze des Fachmoduls; Lagerplatz als Grundelement dunkelgrau dargestellt	68

Abbildung 4-9: Schemazeichnung und Skizze des einseitig bedienten Gangmoduls; Fachmodul als Grundelement dunkelgrau dargestellt	70
Abbildung 4-10: Schemazeichnung und Skizze des beidseitig bedienten Gangmoduls; Fachmodul als Grundelement dunkelgrau dargestellt	71
Abbildung 4-11: Schemazeichnung und Skizze des Lagermoduls mit Stirnganglayout; Gangmodul als Grundelement dunkelgrau dargestellt	73
Abbildung 4-12: Schemazeichnung und Skizze des Lagermoduls mit Zentralganglayout; Gangmodul als Grundelement dunkelgrau dargestellt	74
Abbildung 4-13: Schemazeichnung von Lagerbereichen mit Kommissionierung auf einer Bühne (links), mit unterschiedlich hohen Lagerplätzen (Mitte) und mit Kombination von Nachschub und Kommissionierung (rechts); jeweils Schnitt durch eine Lagergasse	75
Abbildung 4-14: Schemazeichnung der drei betrachteten kombinierten Lagerbereiche: Palettenregal + Fachbodenregal (links), Palettenregal + Bodenzeilenlager (Mitte), Palettenregal + Einschubregal (rechts); nicht nutzbarer Raum schraffiert	77
Abbildung 5-1: Einordnung des Modells zur Bewertung der Leistung (als Blackbox dargestellt)	84
Abbildung 5-2: Klassifizierung der Ansätze zur Bestimmung des Bediengeräte- und Personalbedarfs	86
Abbildung 5-3: Eindimensionales Geschwindigkeitsprofil mit linearer Beschleunigung	88
Abbildung 5-4: Flussdiagramm des Einzelspiels zur Einlagerung	89
Abbildung 5-5: Flussdiagramm des Doppelspiels	95
Abbildung 5-6: Flussdiagramm des Kommissionierspiels	102
Abbildung 5-7: Abschnittsweise konstante Zugriffswahrscheinlichkeit zur Berechnung von λ	105
Abbildung 5-8: Spielzeitrelevante Höhenverhältnisse im Lagerbereich mit kombinierter Kommissionierung und Nachschub	113
Abbildung 6-1: Merkmale und Vorteile der verschiedenen Verfahren zur Investitionsrechnung [Ben-2015, S. A1]	120
Abbildung 6-2: Nachteile der verschiedenen Verfahren zur Investitionsrechnung [Ben-2015, S. A2]	120
Abbildung 6-3: Bewertungskriterien und Gewichte für die Nutzwertanalyse	121

Abbildung 6-4: Merkmalsprofile der verschiedenen Verfahren zur Investitionsrechnung	123
Abbildung 6-5: Merkmalsprofile der verschiedenen Verfahren zur Investitionsrechnung	124
Abbildung 6-6: Zusammensetzung der laufenden Kosten	125
Abbildung 7-1: Einordnung der Planungsmethode in den Planungsprozess	142
Abbildung 7-2: Zusammenhang zwischen Ausgangslösung und abgeleiteter Lösung bei beiden Erzeugungsmechanismen	143
Abbildung 8-1: Funktionsprinzip des Demonstrators	148
Abbildung 8-2: Vereinfachtes Klassendiagramm des Demonstrators	149
Abbildung 8-3: Startseite des Demonstrators	150
Abbildung 8-4: Dateneingabe von Bediengeräten	151
Abbildung 8-5: Datenausgabe der Lösungsmenge	153
Abbildung 8-6: Detailansicht einer Planungsalternative (Ausschnitt)	154
Abbildung 8-7: Ansicht zur Anpassung eines Lagerbereichs (am Beispiel Dimensionierung)	154
Abbildung 8-8: Validierungsergebnisse dreier Lagerbereiche mit Palettenregal [Sta-2015]	155
Abbildung 8-9: Validierungsergebnisse für Einzelspiele im Zentralganglayout. Dargestellt ist die prozentuale Abweichung zwischen Monte-Carlo-Methode und Modell zur Bewertung der Leistung [Hun-2016]	157
Abbildung 8-10: Branchenhintergrund der Teilnehmer des Anwendertests	158
Abbildung 8-11: Evaluation des Konzepts des Demonstrators	160
Abbildung C-1:Fragebogen, Seite 1-2	C-1
Abbildung C-2:Fragebogen, Seite 3-4	C-2
Abbildung C-3:Fragebogen, Seite 5-6	C-3
Abbildung C-4:Fragebogen, Seite 7-8	C-4
Abbildung C-5:Fragebogen, Seite 9-10	C-5
Abbildung C-6:Fragebogen, Seite 11-12	C-6
Abbildung C-7:Fragebogen, Seite 13-14	C-7
Abbildung C-8:Fragebogen, Seite 15-16	C-8
Abbildung C-9:Fragebogen, Seite 17	C-9

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Morphologischer Kasten der Konfiguration bei Einheitenlagerung	28
Tabelle 2-2:	Morphologischer Kasten der Konfiguration bei Kommissionierung	30
Tabelle 2-3:	Mögliche Kombinationen der Gassenbindung und Lagerbedienung	31
Tabelle 2-4:	Morphologischer Kasten der Konfiguration bei Kommissionierung mit Nachschub	31
Tabelle 2-5:	Morphologischer Kasten der Strategien bei Einheitenlagerung	33
Tabelle 2-6:	Morphologischer Kasten der Strategien bei Kommissionierung	34
Tabelle 2-7:	Morphologischer Kasten der Strategien bei Kommissionierung mit Nachschub	38
Tabelle 2-8:	Morphologischer Kasten der Dimensionierung	39
Tabelle 3-1:	Berechnung der Anzahl möglicher Zuweisungen bei $n_{\text{Art,Einh}} = 5$	55
Tabelle 3-2:	Strukturierung der Zielgrößen für das Projekt OptiMAL	57
Tabelle 4-1:	Restriktionen zur Anpassung des kanalförmigen Lagerplatzes an die Lagereinrichtung	64
Tabelle 4-2:	Restriktionen zur Anpassung des stapelförmigen Lagerplatzes an die Lagereinrichtung	66
Tabelle 4-3:	Berechnung des Lagerplatzbedarfs je Artikel nach [Sta-2015]	67
Tabelle 4-4:	Restriktionen zur Anpassung des Fachmoduls an die Lagereinrichtung	69
Tabelle 4-5:	Restriktionen zur Anpassung des einseitig bedienten Gangmoduls an die Lagereinrichtung	71
Tabelle 5-1:	Betrachtete Bedientechnikvarianten und deren Anwendung in den Prozessen	85
Tabelle 5-2:	Layoutabhängige Berechnung des Wegs zwischen Basis und Lagergasse für einseitig bediente Lagereinrichtung	90
Tabelle 5-3:	Konstanter Wegzeitanteil $t_{0,B \rightarrow G}$ bei Einzelspielen zur Einlagerung	91
Tabelle 5-4:	Konstanter Wegzeitanteil $t_{0,B \rightarrow G}$ bei Einzelspielen zur Auslagerung	94
Tabelle 5-5:	Layoutabhängige Berechnung des Weges zwischen zwei Lagergassen für einseitig bediente Lagereinrichtung	96

Tabelle 5-6:	Gassenwechselwahrscheinlichkeit bei beidseitig bedienter Lagereinrichtung	97
Tabelle 7-1:	Bewertung der möglichen Lösungsansätze; Punktwerte: 1 (unzureichend erfüllt) bis 3 (voll und ganz erfüllt)	141
Tabelle A-1:	Layoutabhängige Berechnung des Wegs zwischen Basis und Lagergasse für beidseitig bediente Lagereinrichtung und Einlagerung	A-1
Tabelle A-2:	Layoutabhängige Berechnung des Wegs zwischen Basis und Lagergasse für beidseitig bediente Lagereinrichtung und Auslagerung	A-2
Tabelle A-3:	Layoutabhängige Berechnung des Weges zwischen zwei Lagergassen für beidseitig bediente Lagereinrichtung	A-3
Tabelle A-4:	Berechnung des Gassenwechselwegs s_{GW} bei ein-/zweidimensionaler Kommissionierung	A-4
Tabelle A-5:	Berechnung des Gassenwegs s_{GW} bei ein-/zweidimensionaler Kommissionierung	A-6

Anhang A Tabellen

Tabelle A-1: Layoutabhängige Berechnung des Wegs zwischen Basis und Lagergasse für beidseitig bediente Lagereinrichtung und Einlagerung

Layout	analytische Formel
Stirnganglayout, kombinierte Gassen, $n_{GM,z}$ ungerade	$s_{B \leftrightarrow G,E} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + 1}{4 n_{GM,z}} * b_{GM}$
Stirnganglayout, kombinierte Gassen, $n_{GM,z}$ gerade	$s_{B \leftrightarrow G,E} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}}{4} * b_{GM}$
Stirnganglayout, getrennte Gassen, $n_{GM,z}$ ungerade	$s_{B \leftrightarrow G,E} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + 1}{4 n_{GM,z}} * b_{GM}$
Stirnganglayout, getrennte Gassen, Einlager- gassenzahl ungerade, $n_{GM,z}/2$ ungerade	$s_{B \leftrightarrow G,E} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 - 4}{4 n_{GM,z}} * b_{GM}$
Stirnganglayout, getrennte Gassen, Einlager- gassenzahl ungerade, $n_{GM,z}/2$ gerade	$s_{B \leftrightarrow G,E} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}}{4} * b_{GM}$
Stirnganglayout, getrennte Gassen, Einlager- gassenzahl gerade, $n_{GM,z}/2$ ungerade	$s_{B \leftrightarrow G,E} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + 4}{4 n_{GM,z}} * b_{GM}$
Stirnganglayout, getrennte Gassen, Einlager- gassenzahl gerade, $n_{GM,z}/2$ gerade	$s_{B \leftrightarrow G,E} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}}{4} * b_{GM}$
Zentralganglayout, kombinierte Gassen	$s_{B \leftrightarrow G,E} = \frac{3}{2} * b_{VG} + \left(\frac{n_{GM,z}}{2} + 1 \right) * b_{GM}$
Zentralganglayout, getrennte Gassen, Gassenzahl gerade	$s_{B \leftrightarrow G,E} = \frac{3}{2} * b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + n_{GM,z} + 1}{2 n_{GM,z}} * b_{GM}$
Zentralganglayout, getrennte Gassen, Gassenzahl ungerade	$s_{B \leftrightarrow G,E} = \frac{3}{2} * b_{VG} + \frac{n_{GM,z} + 1}{2} * b_{GM}$

Tabelle A-2: Layoutabhängige Berechnung des Wegs zwischen Basis und Lagergasse für beidseitig bediente Lagereinrichtung und Auslagerung

Layout	analytische Formel
Stirnganglayout, kombinierte Gassen, $n_{GM,z}$ ungerade	$S_{B \leftrightarrow G,A} = S_{B \leftrightarrow G,E} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + 1}{4 n_{GM,z}} * b_{GM}$
Stirnganglayout, kombinierte Gassen, $n_{GM,z}$ gerade	$S_{B \leftrightarrow G,A} = S_{B \leftrightarrow G,E} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}}{4} * b_{GM}$
Stirnganglayout, getrennte Gassen, $n_{GM,z}$ ungerade	$S_{B \leftrightarrow G,A} = S_{B \leftrightarrow G,E} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + 1}{4 n_{GM,z}} * b_{GM}$
Stirnganglayout, getrennte Gassen, Einlager- gassenzahl ungerade, $n_{GM,z}/2$ ungerade	$S_{B \leftrightarrow G,A} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + 4}{4 n_{GM,z}} * b_{GM}$
Stirnganglayout, getrennte Gassen, Einlager- gassenzahl ungerade, $n_{GM,z}/2$ gerade	$S_{B \leftrightarrow G,A} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}}{4} * b_{GM}$
Stirnganglayout, getrennte Gassen, Einlager- gassenzahl gerade, $n_{GM,z}/2$ ungerade	$S_{B \leftrightarrow G,A} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 - 4}{4 n_{GM,z}} * b_{GM}$
Stirnganglayout, getrennte Gassen, Einlager- gassenzahl gerade, $n_{GM,z}/2$ gerade	$S_{B \leftrightarrow G,A} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}}{4} * b_{GM}$
Zentralganglayout, kombinierte Gassen	$S_{B \leftrightarrow G,A} = \frac{3}{2} * b_{VG} + \frac{n_{GM,z}}{2} * b_{GM}$
Zentralganglayout, getrennte Gassen, Gassenzahl gerade	$S_{B \leftrightarrow G,A} = \frac{3}{2} * b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + 5n_{GM,z} + 3}{2 n_{GM,z}} * b_{GM}$
Zentralganglayout, getrennte Gassen, Gassenzahl ungerade	$S_{B \leftrightarrow G,A} = S_{B \leftrightarrow G,E} = \frac{3}{2} * b_{VG} + \frac{n_{GM,z} - 1}{2} * b_{GM}$

Tabelle A-3: Layoutabhängige Berechnung des Weges zwischen zwei Lagergassen für beidseitig bediente Lagereinrichtung

Layout	analytische Formel
Stirnganglayout, kombinierte Gassen	$S_{G,E \leftrightarrow G,A} = \frac{n_{GM,z}^2 - n_{GM,z} + 1}{n_{GM,z}^2} * b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + 2}{3n_{GM,z}} * b_{GM}$
Stirnganglayout, getrennte Gassen, $n_{GM,z}$ ungerade	$S_{G,E \leftrightarrow G,A} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + 1}{3 n_{GM,z}^2} * b_{GM}$
Stirnganglayout, getrennte Gassen, $n_{GM,z}$ gerade	$S_{G,E \leftrightarrow G,A} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + 2}{3n_{GM,z}} * b_{GM}$
Zentralganglayout, kombinierte Gassen	$S_{G,E \leftrightarrow G,A} = \frac{2n_{GM,z}^2 - n_{GM,z} + 1}{2n_{GM,z}^2} * b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + 2}{3n_{GM,z}} * b_{GM}$
Zentralganglayout, getrennte Gassen, $n_{GM,z}$ ungerade	$S_{G,E \leftrightarrow G,A} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + 1}{3 n_{GM,z}^2} * b_{GM}$
Zentralganglayout, getrennte Gassen, $n_{GM,z}$ gerade	$S_{G,E \leftrightarrow G,A} = b_{VG} + \frac{n_{GM,z}^2 + 2}{3n_{GM,z}} * b_{GM}$

Tabelle A-4: Berechnung des Gassenwechselwegs s_{GW} bei ein-/zweidimensionaler Kommissionierung

Layout	analytische Formel
Stirnganglayout, einseitig bediente Regale, Überspringen nicht möglich	$B = (n_{GM,z} - 1) * b_{GM}$ $s_{GW} = 2 * B$
Stirnganglayout, einseitig bediente Regale, Überspringen möglich	$B = (n_{GM,z} - 1) * b_{GM}$ $s_{GW} = \frac{2 * n_{POS}}{n_{POS} + 1} * B$
Zentralganglayout, einseitig bediente Regale, Überspringen nicht möglich	$B = (n_{GM,z} - 0,5) * b_{GM}$ $s_{GW} = 2 * (b_{ZG} + B)$
Zentralganglayout, einseitig bediente Regale, Überspringen möglich	$B = (n_{GM,z} - 0,5) * b_{GM}$ $s_{GW} = 2 * (b_{ZG} + \frac{n_{POS}}{n_{POS} + 1} * B)$ $B = (n_{GM,z} - 1) * b_{GM}$
Stirnganglayout, beidseitig bediente Regale, kombinierte Gassen	$s_{GW,o\ddot{u}} = 2 * B$ $s_{GW,m\ddot{u}} = 2 * \frac{n_{POS}}{n_{POS} + 1} * B$ $B = (n_{GM,z} - 1) * b_{GM}$
Stirnganglayout, beidseitig bediente Regale, getrennte Gassen, $n_{GM,z}$ ungerade	$s_{GW,o\ddot{u}} = 2 * B$ $s_{GW,m\ddot{u}} = \frac{2 * n_{POS}}{n_{POS} + 1} * B$ $B = n_{GM,z} * b_{GM}$
Stirnganglayout, beidseitig bediente Regale, getrennte Gassen, $n_{GM,z}$ gerade, $n_{GA,E} > n_{GA,A}$	$s_{GW,o\ddot{u}} = 2 * B$ $s_{GW,m\ddot{u}} = \frac{2 * n_{POS}}{n_{POS} + 1} * B$ $B = (n_{GM,z} - 2) * b_{GM}$
Stirnganglayout, beidseitig bediente Regale, getrennte Gassen, $n_{GM,z}$ gerade, $n_{GA,E} < n_{GA,A}$	$s_{GW,o\ddot{u}} = 2B$ $s_{GW,m\ddot{u}} = \frac{2 * n_{POS}}{n_{POS} + 1} * B$ $B = (n_{GM,x} - 0,5) * b_{GM}$
Zentralganglayout, beidseitig bediente Regale, kombinierte Gassen	$s_{GW,o\ddot{u}} = 2 * (b_{ZG} + B)$ $s_{GW,m\ddot{u}} = b_{ZG} + \frac{2 * n_{POS}}{n_{POS} + 1} * B$

Zentralganglayout, beidseitig bediente Regale, getrennte Gassen, $n_{GM,z}$ ungerade	$B = (n_{GM,x} - 0,5) * b_{GM}$ $s_{GW,o\ddot{U}} = 2 * (b_{ZG} + B)$ $s_{GW,m\ddot{U}} = b_{ZG} + \frac{2 * n_{Pos}}{n_{Pos} + 1} * B$ $B = (n_{GM,x} - 1,5) * b_{GM}$
Zentralganglayout, beidseitig bediente Regale, getrennte Gassen, $n_{GA,E} > n_{GA,A}$	$s_{GW,o\ddot{U}} = 2 * (b_{ZG} + B)$ $s_{GW,m\ddot{U}} = b_{ZG} + \frac{2 * n_{Pos}}{n_{Pos} + 1} * B$
Zentralganglayout, beidseitig bediente Regale, getrennte Gassen, $n_{GA,E} < n_{GA,A}$	$B = (n_{GM,x} + 0,5) * b_{GM}$ $s_{GW,o\ddot{U}} = 2 * (b_{ZG} + B)$ $s_{GW,m\ddot{U}} = b_{ZG} + \frac{2 * n_{Pos}}{n_{Pos} + 1} * B$

Tabelle A-5: Berechnung des Gassenwegs s_{GW} bei ein-/zweidimensionaler Kommissionierung

Bewegungsstrategie	Belegungsstrategie	Gassenweg
Stichgang m. Wiederh.	Gleichv.	$s_{GW} = 2 * n_{Pos} * (l_{AM,V} + \frac{1}{2} L)$
	Exp.v.	$s_{GW} = 2 * n_{Pos} * (l_{AM,V} + \frac{1}{\lambda} L)$
Stichgangstrategie o. Wiederh.	Gleichv.	$s_{GW} = 2 * n_{GM,x} n_{GM,z} * \sum_{r=1}^{n_{Pos}} \frac{\binom{n_{Art,GA}}{r} \binom{n_{Art} - n_{Art,GA}}{n_{Pos} - r}}{\binom{n_{Art}}{n_{Pos}}} * (l_{AM,V} + \frac{r}{r+1} L)$
	Exp.v.	$s_{GW} = 2 * n_{GM,x} n_{GM,z} * \sum_{r=1}^{n_{Pos}} \frac{\binom{n_{Art,GA}}{r} \binom{n_{Art} - n_{Art,GA}}{n_{Pos} - r}}{\binom{n_{Art}}{n_{Pos}}} * (l_{AM,V} + \frac{L}{\lambda} \sum_{k=1}^r \frac{1}{k})$
	Gleichv.	$s_{GW} = 2 * (2l_{AM,V} + L) + 2 * (n_{GM,z} - 2) * \sum_{r=1}^{n_{Pos}} \frac{\binom{n_{Art,GA}/2}{r} \binom{n_{Art} - n_{Art,GA}/2}{n_{Pos} - r}}{\binom{n_{Art}}{n_{Pos}}} * (l_{AM,V} + \frac{L}{2} \frac{r}{r+1})$
Mittelpunktheuristik, Stiringang	Exp.v.	$s_{GW} = 2 * (2l_{AM,V} + L) + 2 * (n_{GM,z} - 2) * \sum_{r=1}^{n_{Pos}} \frac{\binom{n_{Art,GA}/2}{r} \binom{n_{Art} - n_{Art,GA}/2}{n_{Pos} - r}}{\binom{n_{Art}}{n_{Pos}}} * (l_{AM,V} + \frac{L}{2\lambda} \sum_{k=1}^r \frac{1}{k})$
	Gleichv.	$s_{GW} = 4 * (2l_{AM,V} + L) + 4 * (n_{GM,x} n_{GM,z} - 4) * \sum_{r=1}^{n_{Pos}} \frac{\binom{n_{Art,GA}/2}{r} \binom{n_{Art} - n_{Art,GA}/2}{n_{Pos} - r}}{\binom{n_{Art}}{n_{Pos}}} * (l_{AM,V} + \frac{L}{2} \frac{r}{r+1})$
Mittelpunktheuristik, Zentralgang	Exp.v.	$s_{GW} = 4 * (2l_{AM,V} + L) + 4 * (n_{GM,x} n_{GM,z} - 4) * \sum_{r=1}^{n_{Pos}} \frac{\binom{n_{Art,GA}/2}{r} \binom{n_{Art} - n_{Art,GA}/2}{n_{Pos} - r}}{\binom{n_{Art}}{n_{Pos}}} * (l_{AM,V} + \frac{L}{2\lambda} \sum_{k=1}^r \frac{1}{k})$
	Gleichv. und Exp.v.	$s_{GW} = n_{GM,x} n_{GM,z} * (2 * l_{AM,V} + L) \left[1 - \frac{\binom{n_{Art} - n_{Art,GA}}{n_{Pos}}}{\binom{n_{Art}}{n_{Pos}}} \right]$
Schleifenstrategie ohne Überspringen	Gleichv. und Exp.v.	$n_{GM,z}$ gerade: $s_{GW} = n_{GM,x} n_{GM,z} * (2 * l_{AM,V} + L)$ $n_{GM,z}$ ungerade b: $s_{GW} = n_{GM,x} (n_{GM,z} + 1) * (2 * l_{AM,V} + L)$

Anhang B Berechnung der mittleren Wegzeit pro Position bei zwei-/dreidimensionaler Kommissionierung

Die folgenden Formeln wurden von *Gudehus* entwickelt und werden unverändert im Projekt OptiMAL für zwei-dreidimensionale Kommissionierung angewandt.

Kommt keine Bewegungsstrategie zum Einsatz, gilt:

$$t_{Weg} = \frac{n_{Pos} + 1}{n_{Pos}} * B_1 + \frac{2}{n_{Pos}} * I_1 + \frac{n_{Pos} - 1}{n_{Pos}} * I_2 \quad (B-1)$$

$$I_1 = \begin{cases} \frac{L}{v_x} * \left(0,5 + \frac{1}{6} * \alpha^2\right) & \text{für } \alpha \leq 1 \\ \frac{H}{v_y} * \left(0,5 + \frac{1}{6} * \alpha^{-2}\right) & \text{für } \alpha > 1 \end{cases} \quad (B-2)$$

$$I_2 = \begin{cases} \frac{L}{v_x} * \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6} * \alpha - \frac{1}{30} * \alpha^3\right) & \text{für } \alpha \leq 1 \\ \frac{H}{v_y} * \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6} * \alpha^{-1} - \frac{1}{30} * \alpha^{-3}\right) & \text{für } \alpha > 1 \end{cases} \quad (B-3)$$

$$B_1 = \begin{cases} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) * \frac{v_x}{b_x} + \frac{\alpha}{2} * \frac{v_y}{b_y} & \text{für } \alpha \leq 1 \\ \frac{1}{2 * \alpha} * \frac{v_x}{b_x} + \left(1 - \frac{1}{2 * \alpha}\right) * \frac{v_y}{b_y} & \text{für } \alpha > 1 \end{cases} \quad (B-4)$$

$$\alpha = \frac{H}{L} * \frac{v_x}{v_y} \quad (B-5)$$

Bei einfacher Strategie gilt:

$$t_{Weg} = \frac{1}{n_{Pos}} * (B_{n_{Pos}}^1 + I_{n_{Pos}}^1) + \frac{n_{Pos} - 1}{n_{Pos}} * (B_{n_{Pos}}^{n_{Pos}} + I_{n_{Pos}}^{n_{Pos}}) + \frac{1}{n_{Pos}} * (B_{n_{Pos}}^{n_{Pos}+1} + I_{n_{Pos}}^{n_{Pos}+1}) \quad (B-6)$$

$$I_{n_{Pos}}^1 = \frac{1}{2} * \frac{H}{v_y} * \left[1 + \frac{2}{(n_{Pos} + 1)(n_{Pos} + 2)} * \frac{1}{\alpha^2} * (1 - \Theta(1-\alpha) * (1-\alpha)^{n_{Pos}+2}) \right] \quad (B-7)$$

$$I_{n_{Pos}}^{n_{Pos}} = \frac{1}{3} * \frac{H}{v_y} * \left[1 + \frac{6}{(n_{Pos} + 1)(n_{Pos} + 2)} * \frac{1}{\alpha^3} * \left(\alpha - \frac{1}{n_{Pos} + 3} (1 - \Theta(1-\alpha) * (1-\alpha)^{n_{Pos}+3}) \right) \right] \quad (B-8)$$

$$I_{n_{Pos}}^{n_{Pos}+1} = \begin{cases} \frac{1}{n_{Pos} + 1} * \frac{L}{v_x} * \left(n_{Pos} + \frac{1}{n_{Pos} + 2} * \alpha^{n_{Pos}+1} \right) & \text{für } L_A = L \\ \frac{1}{2} * \frac{H}{v_y} * \left(1 + \frac{n_{Pos}}{n_{Pos} + 2} * \alpha^{-2} \right) & \text{für } L_A = 0 \text{ und } \alpha \leq 1 \\ \frac{1}{2} * \frac{H}{v_y} * \left(1 + \frac{n_{Pos}}{n_{Pos} + 2} * \alpha^{-2} \right) & \text{für } L_A = 0 \text{ und } \alpha > 1 \end{cases} \quad (B-9)$$

$$B_{n_{Pos}}^1 = \frac{v_y}{b_y} * \left[1 + \frac{\beta}{n_{Pos} + 1} * \frac{1}{\alpha} * (1 - \Theta(1-\alpha) * (1-\alpha)^{n_{Pos}+1}) \right] \quad (B-10)$$

$$B_{n_{Pos}}^{n_{Pos}} = \frac{v_y}{b_y} * \left[1 + \frac{2 * \beta}{n_{Pos} + 1} * \frac{1}{\alpha^2} * \left(\alpha - \frac{1}{n_{Pos} + 2} * (1 - \Theta(1-\alpha) * (1-\alpha)^{n_{Pos}+2}) \right) \right] \quad (B-11)$$

$$B_{n_{Pos}}^{n_{Pos}+1} = B_{n_{Pos}}^1 \quad (B-12)$$

$$\alpha = \frac{H}{L} * \frac{v_x}{v_y} \quad (B-13)$$

$$\Theta(1-\alpha) = \begin{cases} 1 & \text{für } \alpha < 1 \\ 0 & \text{für } \alpha \geq 1 \end{cases} \quad (B-14)$$

$$\beta = \frac{\frac{v_x}{b_x} - \frac{v_y}{b_y}}{\frac{v_y}{b_y}} \quad (B-15)$$

Bei v-Streifenstrategie gilt unter Verwendung von Formel (B-7) bis (B-15):

$$\begin{aligned}
 t_{Weg} = \frac{1}{n_{Pos}} * & \left[\frac{v_y}{b_y} + \left(1 - \frac{1}{2 * v} \right) * \frac{H}{v_y} + \frac{n_{Pos} - 1}{n_{Pos}} \right. \\
 & * \left(B_{n_{Pos}}^{n_{Pos}} \left(vL, \frac{H}{v} \right) + I_{n_{Pos}}^{n_{Pos}} \left(vL, \frac{H}{v} \right) \right) + \frac{1}{n_{Pos}} \\
 & \left. * \left(B_{n_{Pos}}^{n_{Pos}+1} \left(L, \frac{H}{v} \right) + I_{n_{Pos}}^{n_{Pos}+1} \left(L, \frac{H}{v} \right) \right) \right] \quad (B-16)
 \end{aligned}$$

Anhang C Fragebogen zur Evaluation des Demonstrators

Teil 2: Ablauf der Schulung/Evaluation
 Bitte beurteilen Sie folgende Aussagen anhand einer Skala von "trifft nicht zu" bis "trifft zu".

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	teilw. z.B.	trifft eher zu	trifft zu	keine Angaben
Ablauf des Termins (Einführungspäsentation, Aufgabenbearbeitung, freies Testen) war sinnvoll.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vorgehen bei der geführten Aufgabe orientierte sich am Vorgehen im realen Planungsprozess.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Benötigte Informationen waren für mich leicht zugänglich (z.B. Handout oder durch Nachfragen).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Aufgabenstellung war klar formuliert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Wenn ich Fragen hatte, konnten diese durch den Leiter beantwortet werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Teil 3: Arbeiten mit dem Demonstrator - Dateneingabe allgemein
 Bitte beurteilen Sie folgende Aussagen anhand einer Skala von "trifft nicht zu" bis "trifft zu".

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	teilw. z.B.	trifft eher zu	trifft zu	keine Angaben
Die Benutzeroberfläche zur Dateneingabe ist klar strukturiert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Benutzeroberfläche zur Dateneingabe ist intuitiv aufgebaut.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Was würden Sie an der Benutzeroberfläche zur Dateneingabe ändern:

Bitte beurteilen Sie folgende Aussagen anhand einer Skala von "trifft nicht zu" bis "trifft zu".

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	teilw. z.B.	trifft eher zu	trifft zu	keine Angaben
Der Aufwand zur Dateneingabe ist gering.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Aufwand zur Dateneingabe ist für die Grobplanung zu groß.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

OptiMAL 2016 Evaluation

Teil 1 - Fragen zur Person

Branche:

Tätigkeit/Position im Unternehmen:

Fragen zur persönlichen Erfahrung

	keine Erfahrung	Grundkenntnisse	reichlich	langjährige Erfahrung	keine Angaben
Haben Sie Erfahrung mit der Planung von manuellen und/oder automatisierten Logistiksystemen?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Haben Sie Erfahrung mit der Planung manuell bedienter Lager?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Wenn ja: Haben Sie Rechenunterstützung bei der Planung manuell bedienter Lager?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Wenn ja: Welche Tools haben Sie bereits angewendet (z.B. Excel, Access, eigenständige Software...)?

Abbildung C-1: Fragebogen, Seite 1-2

Regaltechnik - Bitte beurteilen Sie folgende Aussagen anhand einer Skala von "trifft nicht zu" bis "trifft zu".

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	teils/teils	trifft eher zu	trifft zu	keine Angaben
Es werden sämtliche relevanten Daten erfasst.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Art und Format der einzuhenden Daten sind klar erkennbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die benötigten Daten sind in der Grobplanungsphase verfügbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Anlegen neuer Datensätze ist aufwendig.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Ändern bestehender Datensätze ist leicht durchführbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Löschen bestehender Datensätze ist leicht durchführbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Was würden Sie an der Benutzeroberfläche/Dateneingabe von "Regaltechnik" ändern:

Der Aufwand zur Dateneingabe ist für die Grobplanung zu groß.

Was würden Sie an der Dateneingabe ändern:

Welches Eingabeverfahren würden Sie im Planungsaltag verwenden?

	Nein	Vielleicht	Ja	keine Angaben
Eingabediaglog (vgl. aktuelle Form)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Einlesen einer Excel-Datei	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

↓ +1

Teil 3: Arbeiten mit dem Demonstrator - Dateneingabe

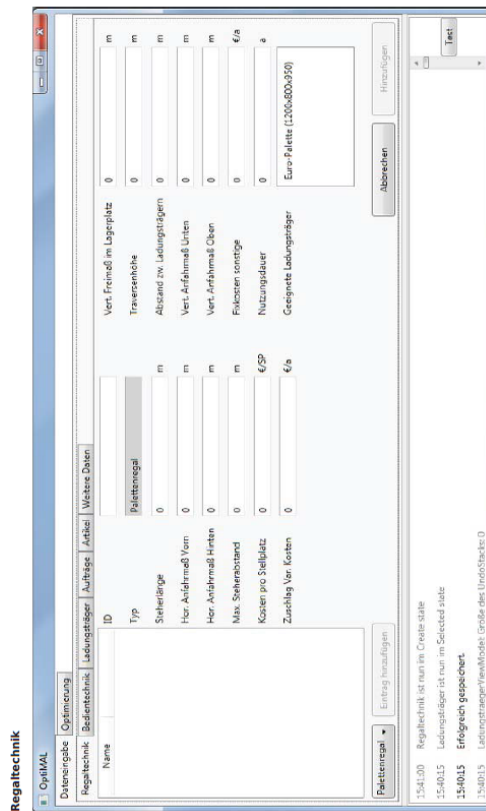


Abbildung C-2: Fragebogen, Seite 3-4

Was würden Sie an der Benutzeroberfläche/Dateneingabe von "Bedientechnik" ändern:

Teil 3: Arbeiten mit dem Demonstrator - Dateneingabe Ladungsträger

Ladungsträger - Bitte beurteilen Sie folgende Aussagen anhand einer Skala von "trifft nicht zu" bis "trifft zu".

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	teilweils	trifft eher zu	trifft zu	keine Angaben
Es werden sämtliche relevanten Daten erfasst.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Art und Format der einzugebenden Daten sind klar erkennbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die benötigten Daten sind in der Grobplanungsphase verfügbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Anlegen neuer Datensätze ist aufwendig.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Ändern bestehender Datensätze ist leicht durchführbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Löschen bestehender Datensätze ist leicht durchführbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

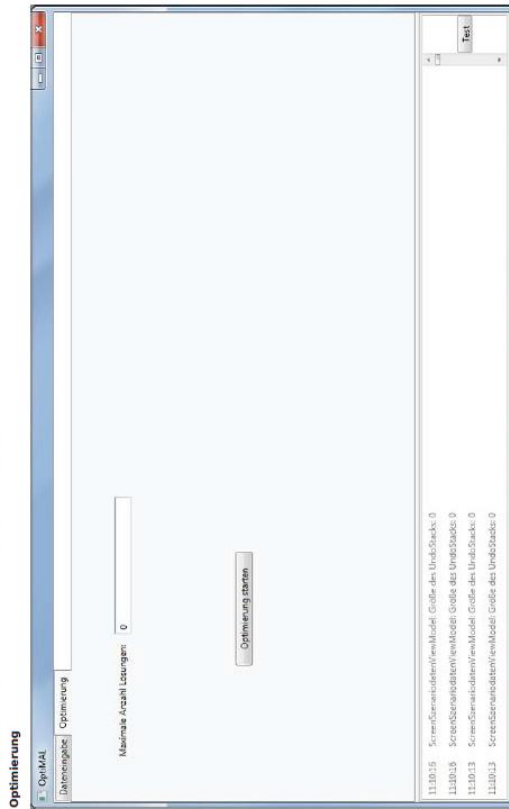
Teil 3: Arbeiten mit dem Demonstrator - Dateneingabe Bedientechnik

Bedientechnik - Bitte beurteilen Sie folgende Aussagen anhand einer Skala von "trifft nicht zu" bis "trifft zu".

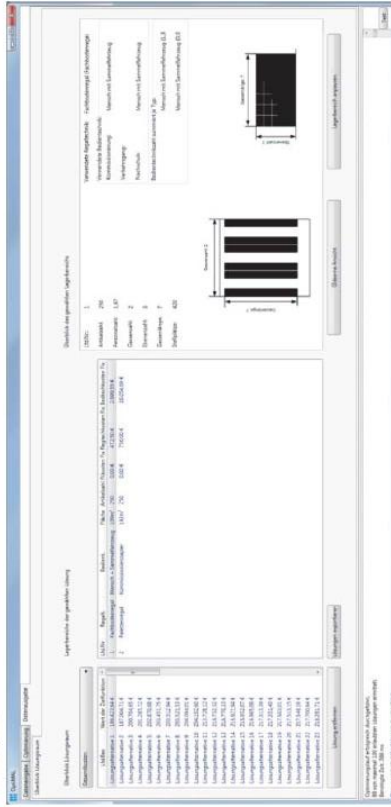
	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	teilweils	trifft eher zu	trifft zu	keine Angaben
Es werden sämtliche relevanten Daten erfasst.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Art und Format der einzugebenden Daten sind klar erkennbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die benötigten Daten sind in der Grobplanungsphase verfügbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Anlegen neuer Datensätze ist aufwendig.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Ändern bestehender Datensätze ist leicht durchführbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Löschen bestehender Datensätze ist leicht durchführbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung C-3: Fragebogen, Seite 5-6

Teil 4: Arbeiten mit dem Demonstrator - Optimierung



Teil 5: Arbeiten mit dem Demonstrator - Ergebnisse und Datenausgabe



Ausgabe der generierten Lösungen (Reiter Datenausgabe) - Bitte beurteilen Sie folgende Aussagen anhand einer Skala von "trifft nicht zu" bis "trifft zu".

	trifft nicht zu	zu	teilszwei	trifft eher zu	keine Angaben
Die Benutzeroberfläche zur Datenausgabe (Reiter Datenausgabe) ist klar strukturiert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Benutzeroberfläche zur Datenausgabe (Reiter Datenausgabe) ist intuitiv aufgebaut.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Eckdaten (auf dem Reiter Datenausgabe) bieten einen guten Überblick über die generierten Lösungen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Eckdaten sind sinnvoll gewählt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die erzeugten Lösungen sind für die Grobplanung verwendbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die erzeugten Lösungen sind für die Grobplanung noch ausreichend detailliert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die berechnete Fläche ist plausibel.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die berechneten Spielzeiten zur Einheitenlagerung sind plausibel.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die berechneten Spielzeiten zur Kommissionierung sind plausibel.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Optimierung - Bitte beurteilen Sie folgende Aussagen anhand einer Skala von "trifft nicht zu" bis "trifft zu".

	trifft nicht zu	zu	teilszwei	trifft eher zu	keine Angaben
Die Benutzeroberfläche zur Optimierung ist klar strukturiert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Benutzeroberfläche zur Optimierung ist intuitiv aufgebaut.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Ablauf der Optimierung wurde im Termin gut vermittelt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Ablauf der Optimierung ist für den Benutzer nicht nachvollziehbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Ablauf der Optimierung ist sinnvoll.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Was würden sie an der Benutzeroberfläche zur Optimierung und am Ablauf der Optimierung ändern:					

Abbildung C-6: Fragebogen, Seite 11-12

Was würden Sie an der Datenausgabe ändern:

Welche Aspekte fehlen, die in die Optimierung mit dem Demonstrator einbezogen werden müssen:

Teil 5: Arbeiten mit dem Demonstrator - Ergebnisse und Datenausgabe
Gläserne Ansicht

The screenshot shows a software interface with a top navigation bar containing 'Dienstreue', 'Datenanalyse', 'Szenario', 'Überblick', 'Diagramm', and 'Gläserne Ansicht'. The main content area is titled 'Heute: 20.08.2015 10:00' and displays several data sections:

- Ergebnis:** A large empty box for results.
- Convergenz:**
 - Layerzahl: 0,35; Höhe: 0,11
 - Reihe: 0,30; Volumen: 0,04
 - Höhe: 0,00; Kapazität: 1
- Leistung:**
 - Kommunikation: 200 pro Sec; Nachschub: 40,00
 - Kapazität: 100; Nachschub: 20,00
- Kosten:**
 - Investition: 1000; Personal: 1000
 - Invest für Fläche pro GeB: 0,00; Energie: 1000
 - Funktionen für Fläche (in GeB): 0,00; Invest für Fläche (Grundst): 0,00
 - Funktionen für Fläche (Grundst): 0,00

At the bottom, there are tabs for 'Eigenschaften', 'Diagramm', and 'Journal'. A status bar at the very bottom shows '100%' zoom and '1' page.

Ausgabe der detaillierten Daten einer Lösung (Reiter Gläserne Ansicht) - Bitte beurteilen Sie folgende Aussagen anhand einer Skala von "trifft nicht zu" bis "trifft zu".

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	teilweise	trifft eher zu	trifft zu	keine Angaben
Die Benutzeroberfläche zur Detailansicht (Gläserne Ansicht) ist klar strukturiert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der zweistufige Aufbau der Datenausgabe (Eckdaten + Gläserne Ansicht) ist sinnvoll.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Benutzeroberfläche zur Detailansicht (Gläserne Ansicht) ist intuitiv aufgebaut.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Alle relevanten Daten werden über die Benutzeroberfläche ausgegeben (über Eckdaten oder Gläserne Ansicht).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Benötigte Daten können nur schwer gefunden werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

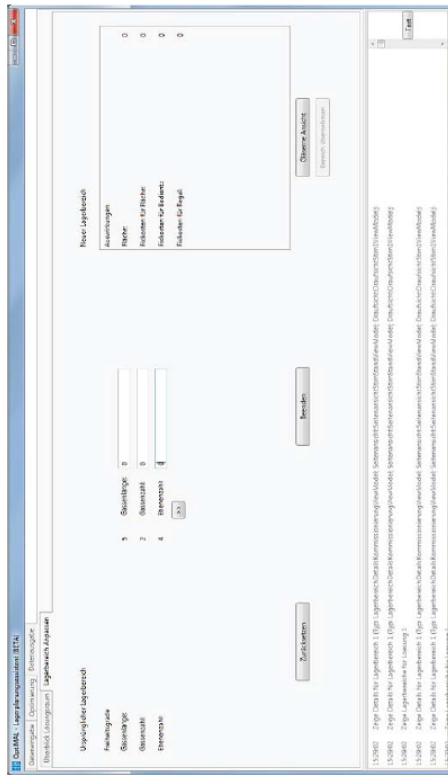
Was würden Sie an der Gläsernen Ansicht ändern:

Welche Aspekte fehlen, die in die Optimierung mit dem Demonstrator einbezogen werden müssen:

Abbildung C-7: Fragebogen, Seite 13-14

Teil 5: Arbeiten mit dem Demonstrator - Ergebnisse und Datenausgabe

Anpassung von Lagerbereichen



Was würden Sie an der Anpassung von Lagerbereichen ändern:

Fehlen Anpassungsmöglichkeiten von Lösungsalternativen, die Sie nutzen würden?

Anpassung der Strategien.	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	teils/teils	trifft eher zu	trifft zu	keine Angaben
Anpassung der Konfiguration.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Änderung der Artikelzuweisung.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Auflösen von Lagerbereichen und Umverteilen der dort eingelagerten Artikel auf andere Bereiche.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Teil 6: Zum Gesamtbild

Bitte beurteilen Sie folgende Aussagen anhand einer Skala von "trifft nicht zu" bis "trifft zu".

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	teils/teils	trifft eher zu	trifft zu	keine Angaben
Das Konzept des Demonstrators ist für die Anpassung von Lagerbereichen geeignet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Konzept des Demonstrators ist für die Anwendung in der Grobplanungsphase nützlich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Demonstrator bietet eine schnelle Übersicht über den Lösungsraum.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Konzept des Demonstrators beschleunigt die Planung in der Grobplanungsphase.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Konzept des Demonstrators verbessert die Ergebnisqualität in der Grobplanungsphase.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Konzept des Demonstrators lässt sich aufwandsarm verwenden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Demonstrator ist aufwändig in der Bedienung.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Zur Anpassung der Lagerbereiche (Reiter Anpassung) - Bitte beurteilen Sie folgende Aussagen anhand einer Skala von "trifft nicht zu" bis "trifft zu".

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	teils/teils	trifft eher zu	trifft zu	keine Angaben
Die Benutzeroberfläche zur Anpassung eines Lagerbereichs ist klar strukturiert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Benutzeroberfläche zur Anpassung eines Lagerbereichs ist intuitiv aufgebaut.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Einbindung des Planers durch manuelle Überarbeitung des Lösungsraums ist nicht sinnvoll.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die manuelle Überarbeitung des Lösungsraums gewährt dem Planer Flexibilität.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Durchführung der Anpassung ist umständlich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Anpassung einer Lagerfläche in der Grobplanungsphase ist sinnvoll.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Resultat der Anpassung wird übersichtlich dargestellt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Hinweise zur durchgeführten Anpassung in der Konsole sind nicht hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung C-8: Fragebogen, Seite 15-16

Wozu würden Sie ein Tool basierend auf dem Konzept des Demonstrators einsetzen:

- Überblick über prinzipielle Lagerkonzepte
- Schulungszwecke
- Kommunikation mit dem Kunden
- Angebotserstellung
-

» Umleitung auf Schlussseite von Umfrage Online

Abbildung C-9: Fragebogen, Seite 17