

**Ein Untersuchungsmodell zur Einflussanalyse  
relevanter Planungsprobleme in hybriden  
Kommissioniersystemen**

Dirk Kauke

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design  
der Technischen Universität München zur Erlangung eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
2. Prof. Dr. techn. Georg Kartnig

Die Dissertation wurde am 22.03.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 30.08.2023 angenommen.

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, Technische Universität München, 2023.

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

Layout und Satz: Dirk Kauke

Copyright © Dirk Kauke, 2023



## Vorwort

---

Während meiner Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München haben mich Kommissioniersysteme stets begeistert. In unterschiedlichen Forschungs- wie auch Industrieprojekten konnte ich mich mit der Planung und Optimierung diverser Systeme beschäftigen. Die vorliegende Dissertation bildet den Abschluss meiner Forschungstätigkeit, zu deren Erfolg ich einer Vielzahl von Personen danken möchte.

Besonders möchte ich mich bei Professor Johannes Fottner bedanken, der als mein Doktorvater diese Arbeit kritisch begleitet und mit konstruktivem Feedback unterstützt hat. Des Weiteren danke ich Professor Georg Kartnig für sein Interesse an meiner Arbeit und seine Übernahme der Zweitprüferschaft. Ebenso gebührt Professor Markus Lienkamp mein Dank für die Leitung der Prüfungskommission.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls bedanken. Die kollegiale bis hin zu freundschaftliche Atmosphäre untereinander war zweifelsohne besonders. Besonders danken möchte ich Florian Ried, Andreas Rücker, Armin Lang, Slaheddine Mestiri und Angelika Rett, die durch ihre Unterstützung und den gemeinsamen Austausch wesentlich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben. Besonders möchte ich mich bei Tobias Staab bedanken, der sowohl den Beginn meiner Zeit am Lehrstuhl maßgeblich geprägt hat als auch in der finalen Phase meiner Dissertation unterstützend zur Seite stand. Des Weiteren haben eine Vielzahl von Studierenden mich bei meiner Forschungstätigkeit unterstützt, sei es in Form von Studienarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte. Namentlich erwähnen möchte ich: Emre Pancar, Florian Sailer und Artur Grau Miarons.

In meiner Dissertation spielte nicht nur fachliche Unterstützung eine Rolle, sondern auch die entscheidende Hilfe aus meinem persönlichen Umfeld. Mein aufrichtiger Dank gilt meinen Eltern, die mich in allen meinen Unternehmungen unterstützt haben und mir somit den Weg zur Promotion ermöglichten. Besonders möchte ich meiner Ehefrau Nicole danken, die mich nicht nur tagtäglich ermutigt hat, sondern auch in den schwierigsten Zeiten an meiner Seite stand. Ihre Unterstützung und ihr Verständnis waren für mich von unschätzbarem Wert und haben mir geholfen, die Herausforderungen meiner Dissertation zu bewältigen.

Dirk Kauke, im Oktober 2023



### **Ein Untersuchungsmodell zur Einflussanalyse relevanter Planungsprobleme in hybriden Kommissioniersystemen**

Die Kommissionierung hat sich für viele Unternehmen zu einem wesentlichen Erfolgsfaktor entwickelt. Vor allem im E-Commerce gehören zu den Kundenanforderungen niedrige Preise, hohe Verfügbarkeiten und kurze Lieferzeiten. Andererseits fällt es den Unternehmen immer schwerer, geeignetes Personal zu finden, um diesen Anforderungen zu entsprechen. Darum werden vermehrt Konzepte in Betracht gezogen, die einerseits eine Automatisierung der Kommissionierung ermöglichen, andererseits die Flexibilität einer klassischen manuellen Kommissionierung bewahren. Der Einsatz von mobiler Robotik zusammen mit dem Menschen erfüllt beide Voraussetzungen. Allerdings gibt es bisher nur wenige Erkenntnisse, die bei der Planung oder dem Betrieb solch hybrider Kommissioniersysteme unterstützen.

In dieser Arbeit wird daher ein Untersuchungsmodell entwickelt, welches in der Lage ist, die wesentlichen Planungsprobleme und deren Einfluss auf hybride Kommissioniersysteme zu analysieren. Bei der Modellentwicklung wurde besonders darauf geachtet, für den Menschen und den Roboter ein geeignetes Abstraktionslevel zu finden. Dies betrifft sowohl ihre generelle Bewegung im Kommissioniersystem als auch das Verhalten bei Interaktionen. Darüber hinaus ist das Untersuchungsmodell in der Lage, gängige Layoutkonfigurationen in unterschiedlichen Größen abzubilden und mit parametrierbaren Auftragsstrukturen zu untersuchen. Das Untersuchungsmodell wurde im Anschluss in eine Simulationsumgebung überführt. Dadurch konnte eine Parameterstudie durchgeführt werden, die anhand von zehn Layoutvarianten die relevanten Planungsprobleme mittels statistischer Methoden analysierte.

Die Ergebnisse ermöglichen die Formulierung von allgemeingültigen Betriebsstrategien, die hinsichtlich Layoutgröße und -konfiguration eine geeignete Wahl der Planungsprobleme für den Menschen und den Roboter berücksichtigen. Diese Betriebsstrategien wurden anschließend im Rahmen einer Evaluation auf zwei hybride Kommissioniersysteme angewandt, die sich bereits im Einsatz befinden. Dabei konnte die Wirksamkeit der jeweiligen Betriebsstrategie bestätigt werden. Damit können diese Betriebsstrategien Planer und Betreiber von hybriden Kommissioniersystemen unterstützen, die Wahl der zu untersuchenden Planungsprobleme im Vorfeld in passender Weise einzuschränken oder das bereits bestehende System durch eine geeignete Konfiguration leistungsfähiger zu gestalten.



### **A model to analyze the influence of relevant planning constraints in hybrid order picking systems**

Order picking has developed as an essential key factor for the success of many companies. Especially in e-commerce, low prices, high availability and short delivery times are the requirements of each and every customer. On the other hand, companies are finding it increasingly difficult to hire suitable employees to meet these requirements. As a result, concepts are increasingly being considered which, on the one hand, enable the automation of order picking but, on the other hand, retain the flexibility of conventional manual order picking systems. The use of mobile robotics together with humans fulfills both requirements. However, there are no concepts for a suitable planning and operation of such hybrid order picking systems.

Therefore, within the scope of this dissertation, a model was developed which is able to analyze the essential planning constraints and their influences on hybrid order picking systems. In the course of the model development, particular attention was paid to ensure that both the human and the robot were designed to correspond as closely as possible to reality. This concerns both the general movement in the order picking system and the behavior during joint interactions. Furthermore, the model is able to represent common layout configurations in different sizes and to investigate them with adjustable order structures. The model was subsequently implemented in a simulation environment. Based on this, a parameter study was carried out to investigate the relevant planning constraints by means of statistical methods for ten layout variants.

The results enabled the formulation of general operating strategies. These consider a suitable choice of planning constraints for humans and robots with regard to layout size and configuration. An evaluation of these operating strategies was then applied to two hybrid order picking systems currently in use. The effectiveness of each operating strategy was confirmed. The operating strategies can thus support planners and operators of hybrid order picking systems in limiting the choice of planning constraints to be investigated in advance or in making the existing system more efficient by taking appropriate actions.



# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Vorwort</b>	<b>I</b>
<b>Kurzzusammenfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation beim Einsatz mobiler Roboter in der Kommissionierung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
<b>2 Grundlagen der Kommissionierung</b>	<b>7</b>
2.1 Begriffsdefinition	7
2.2 Planung von Kommissioniersystemen	9
2.3 Zielgrößen bei der Dimensionierung	11
2.3.1 Quantitative Größen	12
2.3.2 Qualitative Größen	15
2.4 Planungsprobleme zur Zielerreichung	15
2.4.1 Automatisierungsgrad	16
2.4.2 Layoutgestaltung	18
2.4.3 Zonierung	20
2.4.4 Lagerplatzvergabe	20
2.4.5 Auftragsbatching	23
2.4.6 Routing	26
<b>3 Mobile Robotik in der Kommissionierung</b>	<b>31</b>
3.1 Begriffsdefinitionen im Bereich der mobilen Robotik	31
3.2 Technische Komponenten	33
3.3 Interaktionen mit dem Menschen	34
3.4 Systemalternativen in der Kommissionierung	37
3.4.1 Robotic Mobile Fulfillment Center	38
3.4.2 Pick Support AGV	41
3.4.3 Mobile Picking Robots	42
3.4.4 Fazit zum Stand der Forschung	44
3.5 Definition der Forschungslücke	45
3.6 Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen	48
	<b>VII</b>

<b>4</b>	<b>Konzeption eines Untersuchungsmodells für hybride Kommissioniersysteme</b>	<b>51</b>
4.1	Zielstellung und Anforderungen an das Untersuchungsmodell	51
4.2	Kennzahlen für einen Systemvergleich	53
4.3	Aufbau und Abgrenzung des Gesamtsystems	54
4.4	Ablauf des Kommissionierprozesses	56
4.5	Agenten	57
4.5.1	Beschreibung des Menschen	58
4.5.2	Beschreibung des Roboters	62
4.5.3	Interaktionsverhalten	64
4.6	Layout und Lagertechnik	72
4.6.1	Layoutvariation	72
4.6.2	Depot	73
4.6.3	Lagertechnik	74
4.7	Sortimentsgestaltung	75
4.8	Auftragsmanagement	76
4.8.1	Auftragseingang	77
4.8.2	Tourenbildung	78
4.9	Fazit zur Konzeption des Untersuchungsmodells	80
<b>5</b>	<b>Umsetzung des Untersuchungsmodells in einer Simulationsumgebung</b>	<b>83</b>
5.1	Ablausimulation als Untersuchungsmethode	83
5.2	Besonderheiten bei der Implementierung	84
5.3	Verifikation und Validierung des Modells	87
5.3.1	Schreibtischtest und strukturiertes Durchgehen	88
5.3.2	Grenzwerttest und Sensitivitätsanalyse	89
5.3.3	Validierung im Dialog	92
<b>6</b>	<b>Einflussanalyse der Planungsprobleme</b>	<b>95</b>
6.1	Zielstellung	95
6.2	Design of Experiments	96
6.2.1	Faktoren, Stufen und Qualitätsmerkmale	96
6.2.2	Methoden zur statistischen Versuchsplanung	98
6.2.3	Entwicklung der Layoutkonfigurationen	101
6.2.4	Entwicklung des Versuchsplans	103
6.3	Analyse der Ergebnisdaten	105
6.4	Effective Elements des Morris-Screenings	108
6.5	Regressionsanalyse	110
6.5.1	Entwicklung eines Regressionsmodells	111
6.5.2	Interpretation des Regressionsmodells	111
6.5.3	Auswahl eines Referenzlayouts	113
6.6	Einflussanalyse der relevanten Inputfaktoren im Referenzlayout	114

---

6.6.1	Anzahl an Artikeln je Position	115
6.6.2	Anzahl an Positionen je Batch	116
6.6.3	Anzahl und Verteilung der Agenten	117
6.6.4	Batchingverfahren und Auftragspool	117
6.6.5	Lagerbelegung und Zonierung	119
6.6.6	Übrige Inputfaktoren	120
6.6.7	Gestaltungsrichtlinien für das Referenzlayout	121
6.7	Generalisierung der Ergebnisse	122
6.7.1	Wesentliche Abweichungen innerhalb der Basiskonfiguration L1	122
6.7.2	Wesentliche Abweichungen innerhalb der Basiskonfiguration L2	126
6.7.3	Wesentliche Abweichungen zwischen den Basiskonfigurationen	129
6.7.4	Ableitung von geeigneten Betriebsstrategien	130
<b>7</b>	<b>Fallstudienbasierte Evaluation der entwickelten Betriebsstrategien</b>	<b>135</b>
7.1	Ziel der Evaluation	135
7.2	Durchführung der Evaluation	136
7.2.1	Design und Datensammlung	136
7.2.2	Analyse von Fall 1	139
7.2.3	Analyse von Fall 2	144
7.3	Fazit der Evaluation	149
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>153</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>157</b>
	<b>Verzeichnis der durch den Autor betreuten Studienarbeiten</b>	<b>169</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>171</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>175</b>
	<b>Anhang A Ergänzungen zu Kap. 5: Zusammensetzung der Pickzeit</b>	<b>A-1</b>
	<b>Anhang B Ergänzungen zu Kap. 6: Ergebnisse der Regressionsanalysen</b>	<b>B-1</b>
	<b>Anhang C Ergänzungen zu Kap. 7: Betriebsstrategie 2 im Planungsfall 2</b>	<b>C-1</b>



## Abkürzungsverzeichnis

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
AGV	Automated Guided Vehicle
AKL	Automatisches Kleinteilelager
AMR	Autonomous Mobile Robot
COI	Cube per Order Index
LHC	Latin Hypercube Verfahren
MPR	Mobile Picking Robots
MRI	Mensch-Roboter-Interaktion
PSA	Pick Support AGV
PzW	Person-zur-Ware
RMFC	Robotic Mobile Fulfillment Center
ROS	Robot Operating System
SFM	Social Force Model
SKU	Stock Keeping Unit
TSP	Traveling-Salesman-Problem
VRP	Vehicle-Routing-Problem
WMS	Warehouse-Management-System
WzP	Ware-zur-Person



## Formelzeichenverzeichnis

---

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$a$	[m/s <sup>2</sup> ]	Beschleunigung
$a_m$	[m/s <sup>2</sup> ]	Beschleunigung des Menschen
$a_r$	[m/s <sup>2</sup> ]	Beschleunigung des Roboters
$\alpha$	[-]	Signifikanzniveau
$b_j$	[-]	Regressionskoeffizient in einer linearen Regressionsfunktion
$\hat{b}_j$	[-]	Standardisierter Beta-Wert
$c_0^+$	[-]	Faktor zur Berücksichtigung der wahrgenommenen Entfernung eines Hindernisses in Bewegungsrichtung
$c_0^-$	[-]	Faktor zur Berücksichtigung der wahrgenommenen Entfernung eines Hindernisses entgegen der Bewegungsrichtung
$C_{T,m}$	[-]	Kapazität des Menschen
$C_{T,r}$	[-]	Kapazität des Roboters
$d_i$	[m]	Weglänge der Tour für den Kundenauftrag $i$
$d_{i,j}$	[m]	Weglänge der Tour für den Kundenauftrag $i$ und $j$
$d_j$	[m]	Weglänge der Tour für den Kundenauftrag $j$
$\vec{d}_b$	[m]	Wahrgenommene Entfernung eines Hindernisses entgegen der Bewegungsrichtung
$\vec{d}_f$	[m]	Wahrgenommene Entfernung eines Hindernisses in Bewegungsrichtung
$\vec{dx}_b$	[m]	Tatsächliche Entfernung eines Hindernisses entgegen der Bewegungsrichtung
$\vec{dx}_f$	[m]	Tatsächliche Entfernung eines Hindernisses in Bewegungsrichtung
$E_j^{(i)}$	[-]	Elementary Effect der $j$ -ten Variable im $i$ -ten Versuch
$H_{FB,i}$	[m]	Lichte Höhe des Fachbodens $i$
$K_A$	[-]	Gestaltung des Auftragseingangs
$L_G$	[m]	Länge der Kommissioniergasse

$L_{SF}$	[m]	Länge des Schutzfeldes des Roboters
$L_{SZ}$	[m]	Länge der Sicherheitszone des Menschen
$L_V$	[m]	Länge der Vorzone
$L_{WF}$	[m]	Länge des Warnfeldes des Roboters
$\mu_{E,j}$	[-]	Erwartungswert des Effective Element $j$
$\mu_M$	[kg]	Erwartungswert für die durchschnittliche Masse der Artikel
$\mu_V$	[cm <sup>3</sup> ]	Erwartungswert für das durchschnittliche Volumen der Artikel
$n_a$	[-]	Anzahl an Beschleunigungen
$n_{AV,m}$	[-]	Anzahl an Ausweichvorgängen des Menschen je Tour
$n_{AV,r}$	[-]	Anzahl an Ausweichvorgängen des Roboters je Tour
$n_B$	[-]	Anzahl an Lagerblöcken im Layout
$n_D$	[-]	Anzahl an Depots im Layout
$n_f$	[-]	Anzahl an Inputfaktoren
$n_{FB}$	[-]	Anzahl an Fachböden je Regalelement
$n_G$	[-]	Anzahl an Gassen je Block
$n_{KT}$	[-]	Anzahl an abgeschlossenen Touren
$n_l$	[-]	Anzahl an Ausprägungen je Inputfaktor
$n_M$	[-]	Anzahl an Menschen
$n_{pos}$	[-]	Anzahl an Positionen
$n_P$	[-]	Anzahl an Picks pro Position
$n_{PK}$	[-]	Anzahl an Prioritätsklassen
$n_r$	[-]	Versuchsaufwand
$n_R$	[-]	Anzahl an Robotern
$n_{WV}$	[-]	Anzahl an Wartevorgängen pro Tour
$n_{WV,m}$	[-]	Anzahl an Wartevorgängen pro Tour des Menschen
$n_{WV,r}$	[-]	Anzahl an Wartevorgängen pro Tour des Roboters
$r$	[-]	Anzahl an Effekte im Rahmen des Morris-Screenings

$P_D$	[-]	Position des Depots
$P_K$	[Pos/h]	Kommissionierleistung
$P_{K,g}$	[Pos/d]	Kommissionierleistung pro Tag
$P_P$	[Picks/h]	Pickleistung
$P_{P,m}$	[Picks/h]	Pickleistung des Menschen
$P_{P,r}$	[Picks/h]	Pickleistung des Roboters
$R^2$	[-]	Bestimmtheitsmaß des Regressionsmodells
$R_{korr}^2$	[-]	Korrigiertes Bestimmtheitsmaß des Regressionsmodells
$s_n$	[m]	Wegstrecke
$sav_{ij}$	[-]	Savings-Wert für Kundenauftrag $i$ und $j$
$S_{A,a}$	[-]	Anteil an A-Artikeln im Sortiment
$S_{A,b}$	[-]	Anteil an B-Artikeln im Sortiment
$S_{A,c}$	[-]	Anteil an C-Artikeln im Sortiment
$S_{A,r}$	[-]	Anteil an Artikeln, die der Roboter greifen kann
$S_{FS}$	[-]	Auftragsverteilung für die Frühschicht
$S_{NS}$	[-]	Auftragsverteilung für die Nachtschicht
$S_{PK,j}$	[-]	Anteil der Prioritätsklasse $j$ am Auftragseingang
$S_{S,a}$	[-]	Anteil an A-Artikeln im Auftragseingang
$S_{S,b}$	[-]	Anteil an B-Artikeln im Auftragseingang
$S_{S,c}$	[-]	Anteil an C-Artikeln im Auftragseingang
$S_{S,c}$	[-]	Anteil an C-Artikeln im Auftragseingang
$S_{TS}$	[-]	Auftragsverteilung für die Tagschicht
$S_{WT,i}$	[-]	Auftragsverteilung über den Wochentag $i$
$\sigma_{E,j}$	[-]	Standardabweichung des Effective Element $j$
$\sigma_M$	[kg]	Standardabweichung der durchschnittlichen Masse der Artikel
$\sigma_V$	[cm <sup>3</sup> ]	Standardabweichung des Volumens der Artikel
$t_B$	[s]	Bearbeitungszeit

$t_{basis}$	[s]	Basiszeit
$t_{basis,pos}$	[s]	Basiszeit je Position
$t_{DZ,m}$	[s]	Drehzeit des Menschen
$t_{DZ,r}$	[s]	Drehzeit des Roboters
$t_{greif}$	[s]	Greifzeit
$t_{greif,m}$	[s]	Greifzeit des Menschen
$t_{greif,r}$	[s]	Greifzeit des Roboters
$t_K$	[s]	Kommissionierzeit
$t_{KT}$	[s]	Gesamtzeit der Kommissioniertour
$t_{KT,m}$	[s]	Gesamtzeit der Kommissioniertour für den Menschen
$t_{KT,r}$	[s]	Gesamtzeit der Kommissioniertour für den Roboter
$t_n$	[s]	Fahrzeit
$t_{PK,j}$	[s]	Maximale Durchlaufzeit für die Prioritätsklasse $j$
$t_{RE,m}$	[s]	Rüstzeit des Menschen zum Ende der Kommissioniertour
$t_{RE,r}$	[s]	Rüstzeit des Roboters zum Ende der Kommissioniertour
$t_{RS,m}$	[s]	Rüstzeit des Menschen zu Beginn der Kommissioniertour
$t_{RS,r}$	[s]	Rüstzeit des Roboters zu Beginn der Kommissioniertour
$t_{tot}$	[s]	Totzeit
$t_{W,m}$	[s]	Wartezeit des Menschen, bevor ein Ausweichvorgang begonnen wird
$t_{W,r}$	[s]	Wartezeit des Roboters, bevor ein Ausweichvorgang begonnen wird
$t_{WZ,m}$	[s]	Wartezeit pro Kommissioniertour für den Menschen
$t_{WZ,r}$	[s]	Wartezeit pro Kommissioniertour für den Roboter
$t_Z$	[s]	Zusammenführungszeit
$u$	[-]	Störgröße
$v$	[m/s]	Geschwindigkeit
$v_m$	[m/s]	Geschwindigkeit des Menschen
$v_r$	[m/s]	Geschwindigkeit des Roboters

$x_j$	[-]	Unabhängige Variable in einer linearen Regressionsfunktion
$\hat{Y}$	[-]	Abhängige Variable in einer linearen Regressionsfunktion
$W_G$	[m]	Breite der Kommissioniergasse
$W_{SZ}$	[m]	Breite der Sicherheitszone des Menschen
$W_{SF}$	[m]	Breite des Schutzfeldes des Roboters



# 1 Einleitung

---

Die Globalisierung des 21. Jahrhunderts, mit ihren internationalen Lieferketten, basiert auf einer funktionsfähigen Logistik. Lokale Ereignisse wie die Schließung von Seehäfen in Asien oder die Sperrung von Meerwasserkanälen in Afrika können jedoch kurz- oder längerfristig Produktion und Handel auf der ganzen Welt gefährden. Nicht zuletzt hat die anhaltende COVID-19-Pandemie dazu geführt, dass bestehende Logistikkonzepte überdacht werden und durch Anpassungen versucht wird, sie resilienter zu gestalten. Diese anhaltende Hinterfragung des Status quo untermauert die Relevanz der Logistik als wissenschaftliche Disziplin.

Eine in Wissenschaft und Praxis gängige Variante ist die Unterteilung der Unternehmenslogistik in Beschaffungs-, Lager-, Produktions-, Transport-, Distributions- und Entsorgungslogistik (vgl. [Fot-2022a, S. 1–6]). Ein wesentlicher Funktionsbereich der Logistik ist die Kommissionierung, die vor allem in der Produktions- und Distributionslogistik eine essenzielle Rolle spielt. Insbesondere bei der Belieferung von Endkunden in der Distributionslogistik kann die Qualität der Kommissionierung ein entscheidender Wettbewerbsvorteil sein (vgl. [Hom-2011, S. 1]). Umfragen haben ergeben, dass die zu erwartende Lieferzeit eines der wichtigsten Kriterien ist, die bei einer Kaufentscheidung berücksichtigt werden (vgl. [Bah-2021]). Die Lieferzeit hängt im ersten Schritt von einer generellen Warenverfügbarkeit ab. Ist diese gegeben, kann im zweiten Schritt über kurze Reaktions- und Durchlaufzeiten eine möglichst schnelle Lieferung realisiert werden. Da die wenigsten Unternehmen den Transport der Waren selbst übernehmen, sind die Kommissionierung und die Versandvorbereitung die letzten internen Prozesse, die das Unternehmen beeinflussen kann.

Neben der Industrie hat auch die Wissenschaft die Wichtigkeit der Kommissionierung erkannt. Unter dem Begriff *Order Picking System* finden sich in der Wissenschaftsdatenbank *Scopus* über 2.000 Artikel. Sehr häufig steht in diesen die Entwicklung und Untersuchung neuer Strategien, die die Kommissionierung optimieren, im Vordergrund. Dabei übernimmt der Mensch die Aufgabe des Kommissionierens. Die Entwicklungen der letzten Jahre ermöglichen hingegen neue Kommissioniersysteme, in denen der Mensch nicht mehr allein in Kommissioniersystemen arbeiten wird.

## 1.1 Ausgangssituation beim Einsatz mobiler Roboter in der Kommissionierung

Die Betreiber von Kommissioniersystemen sehen sich diversen Herausforderungen gegenüber. Einerseits erwarten die Endkunden eine möglichst schnelle Lieferung. Andererseits

reicht es häufig nicht mehr aus, dass Unternehmen nur ein konzentriertes Sortiment anbieten, weswegen der Lagerbestand und damit auch die Kommissioniersysteme größer werden. Zudem muss das Unternehmen und damit auch das Kommissioniersystem flexibel auf Veränderungen des Marktes reagieren können, durch Anpassung des Sortiments oder auch in Phasen mit überdurchschnittlichem Auftragseingang, wie in der Vor-Weihnachtszeit oder am „Black-Friday“. Zudem ist die Intralogistik seit einigen Jahren von einem hohen Personalmangel betroffen (vgl. [Sem-2021]). Diese Kombination aus Flexibilitätsanforderung, steigenden Systemgrößen und gleichzeitigem Personalmangel erfordert innovative Konzepte, darunter die mobile Robotik.

Ein erstes Konzept zur Kommissionierung wurde bereits Mitte des letzten Jahrzehnts vorgestellt. Mobile Roboter werden hier eingesetzt, um in einem abgesperrten Bereich einzelne Regale mit Gütern zu definierten Pickplätzen zu transportieren. Dort entnehmen Menschen die angeforderten Artikel, worauf der Roboter das Regal zurück in den Lagerbereich transportiert (vgl. [And-2008]). In der Wissenschaft hat sich dafür der Begriff *Robotic Mobile Fulfillment Center* etabliert, wobei diese Systeme, bereits vielfach in der Wissenschaft untersucht wurden (vgl. [Aza-2019; Han-2012]).

Ein anderes Konzept sieht vor, dass der Roboter auch eigenständig Artikel aus einem Lagerbereich entnehmen kann. Diese *Mobile Picking Robots* arbeiten gemeinsam mit Menschen im gleichen System. Dies hat den Vorteil, dass das System nach wie vor allein von Menschen betrieben werden kann, sodass es bei Systemstörungen der Roboter nicht zu einem Totalausfall kommt. Andererseits können Roboter über lange Zeiträume konstant arbeiten, sodass sie insbesondere zur Bearbeitung der Grundlast eingesetzt werden können. Der Mensch wird hingegen in Phasen mit einem hohen Auftragseingang zusätzlich eingesetzt. Allerdings sind die Roboter in der heutigen Zeit noch nicht so leistungsfähig wie der Mensch, sodass bei ihrem Einsatz mit Einbußen in der Peak-Leistung zu rechnen ist. Dennoch zeigen die Konzepte einen eindeutigen positiven Trend, wenn es um den Einsatz mobiler Robotik in der Logistik geht (vgl. Abb. 1-1).

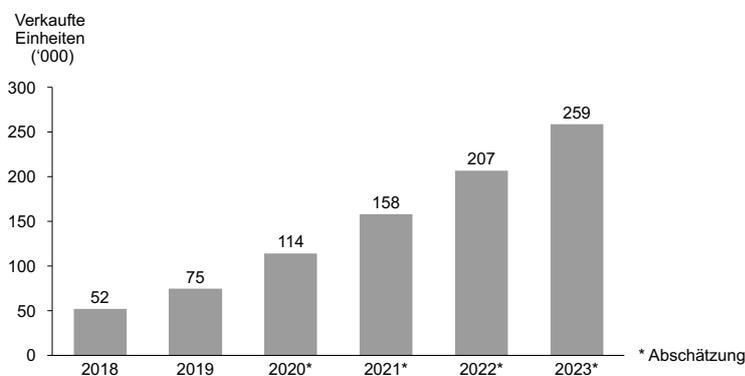


Abbildung 1-1: Entwicklung der weltweit verkauften mobilen Roboter in der Logistik. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Int-2020]

Es ist davon auszugehen, dass zu den weltweit verkauften Einheiten mobiler Roboter (vgl. Abb.1-1) viele Unternehmen beitragen, die erstmalig mobile Roboter in ihre Logistik integrieren. Dies setzt Erkenntnisse, Richtlinien und Planungsunterstützung hinsichtlich dieser Technologie voraus, auf die die Unternehmen zurückgreifen können. Zwar werden im Bereich der Mobile Picking Robots nach wie vor Erprobungsprojekte initiiert, bei denen das Sammeln von Erfahrungen sowohl beim Hersteller als auch beim Anwender im Vordergrund steht. Jedoch wird die Erwartungshaltung der Anwender an solche Systeme zunehmen und der Hersteller an seinen Leistungsversprechen gemessen werden, wie es bei etablierten Kommissioniersystemen bereits heute der Fall ist. Daher bedarf es Unterstützung bei der Planung und dem Betrieb.

Die Planung von Kommissioniersystemen unterliegt nicht selten einem umfangreichen Prozess, der je nach Komplexität durch verschiedene Untersuchungsmethoden unterstützt werden muss (vgl. [Gud-2012a, S. 765 f.]). Die Herausforderung für Systeme, die neben dem Menschen auch Mobile Picking Robots einsetzen, besteht darin, dass der Roboter als zusätzlicher Akteur im System betrachtet werden muss. Zwar wurden die gängigen Planungsprobleme<sup>1</sup> und deren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Menschen vielfach untersucht, allerdings kann nach aktuellem Wissensstand nicht davon ausgegangen werden, dass diese auch auf den Roboter zutreffen. In der Literatur finden sich dazu bisher nur vereinzelte Arbeiten und keine dieser Arbeiten liefert ganzheitliche Erkenntnisse zu Planung und Betrieb entsprechender Systeme.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Richtlinien und Erkenntnisse für die Planung und den Betrieb von Kommissioniersystemen, in denen sowohl Menschen als auch Roboter eingesetzt werden, fehlen. Diese sind jedoch notwendig, um bei dem zukünftigen Zuwachs an mobilen Robotern in den Kommissioniersystemen einen effizienten Betrieb zu gewährleisten. Um das Potenzial von hybriden Kommissioniersystemen zu heben, ist ein Untersuchungsmodell nötig, mit dem sich jeweils die beste Systemkonfiguration abhängig vom Einsatzfall identifizieren lässt. Daher ist das übergeordnete Ziel dieser Arbeit:

### **Die Entwicklung eines Untersuchungsmodells zur Einflussanalyse relevanter Planungsprobleme in hybriden Kommissioniersystemen.**

Dieses Modell soll in der Lage sein, alle relevanten Planungsprobleme abzubilden und deren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von Mensch und Roboter darzustellen. Die gesammelten Erkenntnisse sollen es ermöglichen, allgemeingültige Strategien für den Betrieb

---

<sup>1</sup> Planungsprobleme beschreiben in dieser Arbeit Maßnahmen zur Zielerreichung innerhalb der Planung von Kommissioniersystemen (vgl. [Gil-2018]). Eine detaillierte Abgrenzung der Begrifflichkeiten findet sich in Abschnitt 2.4.

abzuleiten. Diese Strategien sollen und können zwar im Einzelfall weitere Planungen individueller Systeme nicht ersetzen, jedoch können sie gewährleisten, dass der für die Planung relevante Untersuchungsraum von Freiheitsgraden im Rahmen der Grobplanung eingeschränkt werden kann, was einen wesentlichen Mehrwert für die Planung von hybriden Kommissioniersystemen darstellt.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in acht Kapitel (vgl. Abb. 1-2).

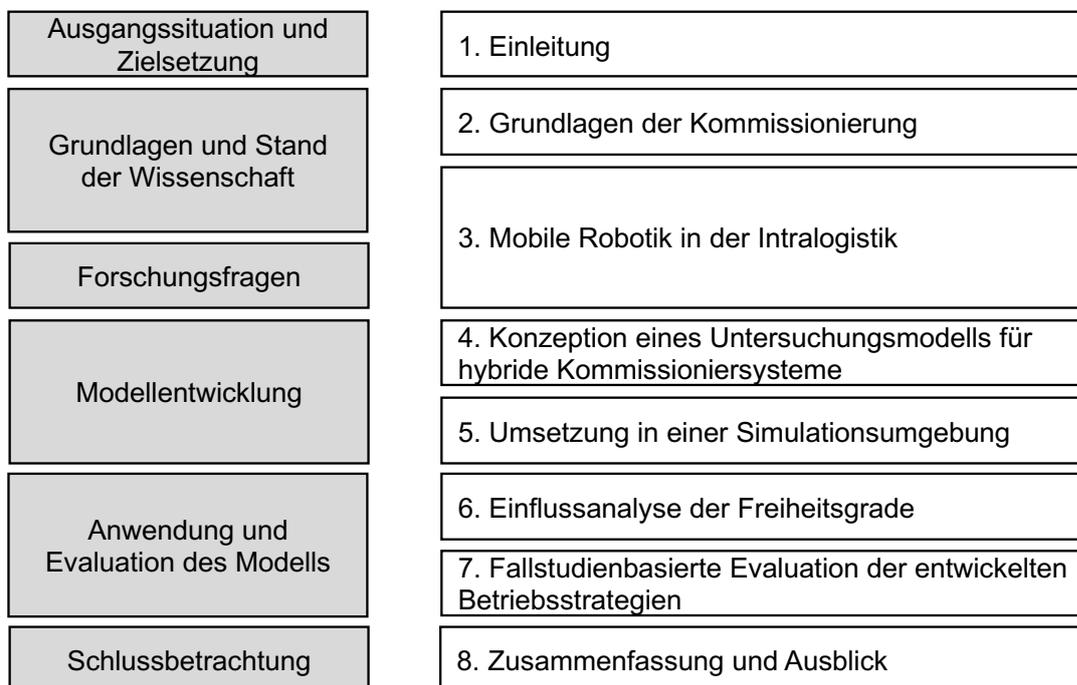


Abbildung 1-2: Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Im ersten Kapitel werden die Ausgangssituation in der Kommissionierung und die aktuellen Entwicklungen der mobilen Robotik erläutert. Darauf aufbauend werden in Kapitel 2 die Grundlagen der Kommissionierung beschrieben. Relevante Begriffe werden definiert und Zielgrößen bei der Planung und dem Betrieb von Kommissioniersystemen vorgestellt, um ein einheitliches Verständnis zu schaffen. Das Kapitel schließt mit einer Beschreibung der relevanten Planungsprobleme von Kommissioniersystemen.

In Kapitel 3 wird der Fokus auf die mobile Robotik und deren Rolle in der Kommissionierung gelegt. Dazu werden zunächst die Grundlagen der Robotik beschrieben und relevante Begriffe definiert. Darauf Bezug nehmend werden notwendige technische Komponenten eines Roboters vorgestellt und die Interaktionen zwischen Mensch und Roboter diskutiert,

bevor aktuelle Anwendungsfelder der mobilen Robotik in der Kommissionierung thematisiert werden. Im letzten Teil des Kapitels wird der Forschungsbedarf abgeleitet sowie die Forschungsfragen formuliert, woraus sich das weitere Vorgehen dieser Arbeit ergibt.

Im Anschluss erfolgt in Kapitel 4 die Konzeption des Untersuchungsmodells. Dazu werden neben den Anforderungen und Zielen des Untersuchungsmodells das Verhalten von Mensch und Roboter näher definiert. Zudem werden die Bestandteile des Untersuchungsmodells wie der Kommissionierprozess, das Lagerlayout und das Auftragsmanagement beschrieben. Das Ergebnis des Kapitels ist ein logisches Modell, welches alle relevanten Aspekte eines hybriden Kommissioniersystems beinhaltet. Dieses logische Modell wird in Kapitel 5 in ein ausführbares Simulationsmodell überführt. Dazu wird neben einer Begründung zur Wahl der Simulation als Untersuchungsmethode auch auf Besonderheiten bei der Implementierung eingegangen. Anschließend werden Tests zur Verifikation und Validierung des Simulationsmodells durchgeführt.

Im Anschluss der Verifikation und Validierung erfolgt in Kapitel 6 die Einflussanalyse der Planungsprobleme. Dazu werden zu Beginn Grundlagen zur statistischen Versuchsplanung und -auswertung erläutert und im Anschluss die relevanten Planungsprobleme und Versuchspläne zur Durchführung der Simulationsstudie erarbeitet. Die Ergebnisse werden anhand eines Referenzlayouts diskutiert und abschließend in die Formulierung von geeigneten Betriebsstrategien überführt. Diese Strategien werden in Kapitel 7 in Form einer fallstudienbasierten Evaluation auf ihre mögliche Anwendung in der Praxis hin bewertet. Dazu werden zwei existierende hybride Kommissioniersysteme herangezogen und es wird überprüft, inwieweit die entwickelten Betriebsstrategien die Systemleistung steigern können.

In einer Schlussbetrachtung werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf zukünftig mögliche Forschungsarbeiten gegeben.



## 2 Grundlagen der Kommissionierung

---

Die Kommissionierung als wesentlicher Bestandteil der Intralogistik steht in dieser Arbeit im Mittelpunkt, weswegen zu Beginn der Untersuchung zu deren Verständnis notwendige Grundlagen erläutert werden. Dazu werden zunächst in Abschnitt 2.1 die relevanten Begriffe aus dem Bereich der Kommissionierung und deren Umfeld definiert. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 2.2 der Prozess der Planung von Kommissioniersystemen beschrieben. In Abschnitt 2.3 werden die gängigen Zielgrößen betrachtet, die bei der Planung von Kommissioniersystemen berücksichtigt werden, bevor abschließend in Abschnitt 2.4 eine Untersuchung von relevanten Planungsproblemen erfolgt, die die Gestaltung von Kommissioniersystemen beeinflussen und demzufolge bei der Planung berücksichtigt werden.

### 2.1 Begriffsdefinition

*Gudehus* sieht die Kommissionierung als schwierigste Aufgabe der innerbetrieblichen Logistik. Er definiert das Kommissionieren als

*„[...] das Zusammenstellen von Ware aus einem bereitgestellten Artikelsortiment nach vorgegebenen Aufträgen“* [Gud-2012a, S. 707].

Er begründet die Herausforderungen damit, dass bei der Gestaltung eines Kommissioniersystems aus einer Vielzahl an Techniken, Verfahren und Strategien ausgewählt werden muss (vgl. [Gud-2012a, S. 707]). *Ten Hompel et al.* ergänzen, dass die Kommissionierung den personalintensivsten Bereich der Distributionslogistik darstellt und ihre Abläufe den Servicegrad gegenüber dem Kunden und damit die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens beeinflussen (vgl. [Hom-2011, S. 3]).

Ein Kommissioniersystem kann sowohl in Handels- als auch in Produktionsunternehmen notwendig sein. Im Umfeld der Produktion ist die Kommissionierung für eine losgrößenge-rechte Bereitstellung von Materialien verantwortlich. Bei Handelsunternehmen ist der Empfänger ein externer Kunde, dessen bestellte Artikel möglichst effizient zusammengestellt und anschließend versendet werden müssen. (vgl. [Hom-2011, S. 12])

Der Prozess des Kommissionierens besteht aus Picks. Picks bezeichnen den Greifvorgang einer Person, bei dem eine definierte Menge eines Artikels aus der Lagereinheit entnommen wird (vgl. [Gud-2012a, S. 707]). Das Picken von Artikeln erfolgt auf Basis der im Kommissionierauftrag definierten Vorgaben. Ein Kommissionierauftrag besteht aus einem oder mehreren Kundenaufträgen<sup>2</sup>. Der Kommissionierauftrag wird dem Kommissionierer in Form

---

<sup>2</sup> Hintergründe zur Kombination von Aufträgen werden in Abschnitt 2.4 näher beleuchtet.

einer Pickliste übermittelt, auf der die einzelnen Artikel, der jeweilige Lagerplatz und die zu entnehmende Menge hinterlegt sind. Die Übermittlungsform ist von der Größe des Kommissioniersystems abhängig. Kleinere Systeme arbeiten noch mit Papierlisten, größere nutzen papierlose Verfahren wie Pick-by-Light oder Pick-by-Voice (vgl. [Hom-2011, S. 53]).

Um den Aufbau und Ablauf von Kommissioniersystemen einheitlich beschreiben zu können, unterteilt die *VDI 3590* das Kommissioniersystem in drei Bestandteile<sup>3</sup>:

- Materialfluss
- Informationsfluss
- Organisation

Hinsichtlich des Materialflusses können die größten Unterschiede zwischen verschiedenen Kommissioniersystemen festgestellt werden. Dabei entscheidend ist die Bereitstellung der Güter, die statisch oder dynamisch und zentral oder dezentral erfolgen kann (vgl. [Hom-2011, S. 620; VDI-3590]). Damit lässt sich ein Großteil aller Kommissioniersysteme beschreiben und kategorisieren. Erfolgt die Bereitstellung statisch und dezentral, findet man häufig das klassische manuelle Person-zur-Ware (PzW)-Kommissioniersystem (vgl. [Hom-2011, S. 67]). Eine dynamische und zentrale Bereitstellung der Artikel liegt meist bei teilautomatisierten Systemen vor, bei denen aus einem automatischen Kleinteilelager (AKL) Waren ausgelagert und mittels automatisierter Fördertechnik zu einem Kommissionierplatz transportiert werden. In diesem Fall spricht man von einer Ware-zur-Person (WzP)-Kommissionierung (vgl. [Hom-2011, S. 76 ff.]). Die Bezeichnungen PzW und WzP geben Auskunft über ein zentrales Charakteristikum des jeweiligen Kommissioniersystems: die Fortbewegung des Kommissionierers. So kann man festhalten, dass entweder die Bereitstellung der Güter oder die Fortbewegung des Kommissionierers dynamisch ist – eine Kombination aus beidem findet man ebenfalls in einigen Systemen (vgl. [Hom-2011, S. 66]).

Die Kategorie Informationsfluss beschreibt vor allem den Umgang mit den eingehenden Kundenaufträgen und inwieweit diese optimiert und weiterverarbeitet werden. So unterteilt die *VDI 3590* die Auftragserfassung in manuell, manuell-automatisch und automatisch. Die Aufarbeitung der Aufträge erfolgt in Form von Einzelaufträgen, Auftragsgruppen oder Teilaufträgen. Der Kundenauftrag kann aus mehreren Positionen bestehen. Eine Position entspricht dabei einem abgrenzbaren Artikel bzw. einer sogenannten Stock Keeping Unit (SKU). Üblicherweise hat jede Position eines Kundenauftrages einen eigenständigen Lagerplatz. Je nach Gestaltung des Kommissioniersystems, wird der Kundenauftrag unmittelbar in einen Kommissionierauftrag überführt. Sollte der Auftrag nicht groß genug sein, werden mehrere vollständige Kundenaufträge zu einem Kommissionierauftrag zusammengefasst. (vgl. [Hom-2011, S. 28 ff.; VDI-3590])

---

<sup>3</sup> Eine ausführliche Beschreibung der Bestandteile kann entweder der *VDI 3590* selbst oder *ten Hompel et al.* entnommen werden (vgl. [Hom-2011; VDI-3590]). In dieser Arbeit wird nur auf einzelne relevante Aspekte eingegangen.

Die Organisation stellt das dritte Kriterium dar, nach dem laut *VDI 3590* ein Kommissioniersystem kategorisiert werden kann (vgl. [VDI-3590]). Elementar ist hier die Aufbauorganisation, besonders die Zonierung. Diese beschreibt, ob ein Kommissioniersystem nur aus einem Bereich besteht oder in mehrere Bereiche unterteilt wird. Grund für die Unterteilung können unterschiedliche Hilfsmittel (bspw. Handwagen oder Stapler) sein. Alternativ erfolgt die Zonierung auf Basis von Artikelcharakteristika, beispielsweise von Tiefkühl- oder Non-Food-Produkten im Lebensmittelhandel. Artikel können ebenfalls nach ihrer Umschlagshäufigkeit sortiert werden, sodass häufiger benötigte Artikel in räumlicher Nähe zueinander gelagert werden (vgl. [Hom-2011, S. 33]). Im Hinblick auf die Ablauforganisation kann zwischen einem ein- oder zweistufigen Ablauf differenziert werden (vgl. [Hom-2011, S. 34]). Bei einer einstufigen Kommissionierung liegt der Fokus auf vollständigen Kundenaufträgen, wobei ein Kommissionierauftrag aus einem oder mehreren vollständigen Kundenaufträgen bestehen kann. Bei einer zweistufigen Kommissionierung liegt der Fokus hingegen auf den Artikeln einzelner Kundenaufträge, sodass es vorkommen kann, dass ein Kundenauftrag auf mehrere Kommissionieraufträge verteilt wird. Dadurch können bei heterogenen Auftragsstrukturen Synergieeffekte durch das Kommissionieren ähnlicher Artikel erzielt werden (vgl. [Hom-2011, S. 38]). Diesen Effekten steht jedoch der personelle und zeitliche Aufwand zur Auftragskonsolidierung gegenüber, bei der die einzelnen Teilaufträge gesammelt werden müssen. Alternativ dazu kann eine serielle Bearbeitung erfolgen, sodass der Auftrag die einzelnen Zonen nacheinander durchläuft (vgl. [Hom-2011, S. 35 f.]).

Die *VDI 3590* deckt durch die drei Bestandteile Materialfluss, Informationsfluss und Organisation eine Vielzahl an Gestaltungsmöglichkeiten von Kommissioniersystemen ab. Insbesondere bei der Analyse bestehender Systeme ist sie ein hilfreiches Werkzeug, aber auch für die Planung sind die darin aufgeführten Ausprägungen nützlich. Welche weiteren Aspekte hierbei berücksichtigt werden müssen, wird im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

## 2.2 Planung von Kommissioniersystemen

*Klein und Scholl* definieren Planung als

*„[...] ein von Planern auf der Grundlage (zumeist) unvollkommener Informationen durchgeführter, grundsätzlich systematischer und rationaler Prozess zur Lösung von Entscheidungsproblemen unter Beachtung subjektiver Zielvorstellungen“* [Kle-2011, S. 2].

Sie setzen dabei voraus, dass die Planung zielorientiert erfolgt, wodurch ein verbesserter Zustand in der Zukunft erreicht werden soll. Die Planung ist ein gestaltungsorientierter, rationaler und systematischer Prozess, was dem Planer eine gedankliche Vorwegnahme von Entscheidungen und die Berücksichtigung aller relevanten Informationen ermöglicht,

um Handlungsalternativen vorzubereiten und eine geeignete Auswahl zu treffen. (vgl. [Kle-2011, S. 2])

Diese Definition lässt sich unmittelbar auf die Planung von Materialflusssystemen im Allgemeinen und auf die Planung von Kommissioniersystemen im Speziellen übertragen. So definiert *Fottner* die Schritte der Planung mit *Grundlagenermittlung*, *Konzeptplanung*, *Detailplanung* und *Realisierung* (vgl. [Fot-2022b, S. 1–8]). Eine ähnliche Planungsabfolge kann *Arnold und Furmans* sowie *ten Hompel et al.* entnommen werden (vgl. [Arn-2009, S. 233 ff.; Hom-2018, S. 348 ff.]). *Gudehus* wählt einen vergleichbaren Ansatz, konkretisiert diesen jedoch für die Planung von Kommissioniersystemen (vgl. Abb. 2-1).

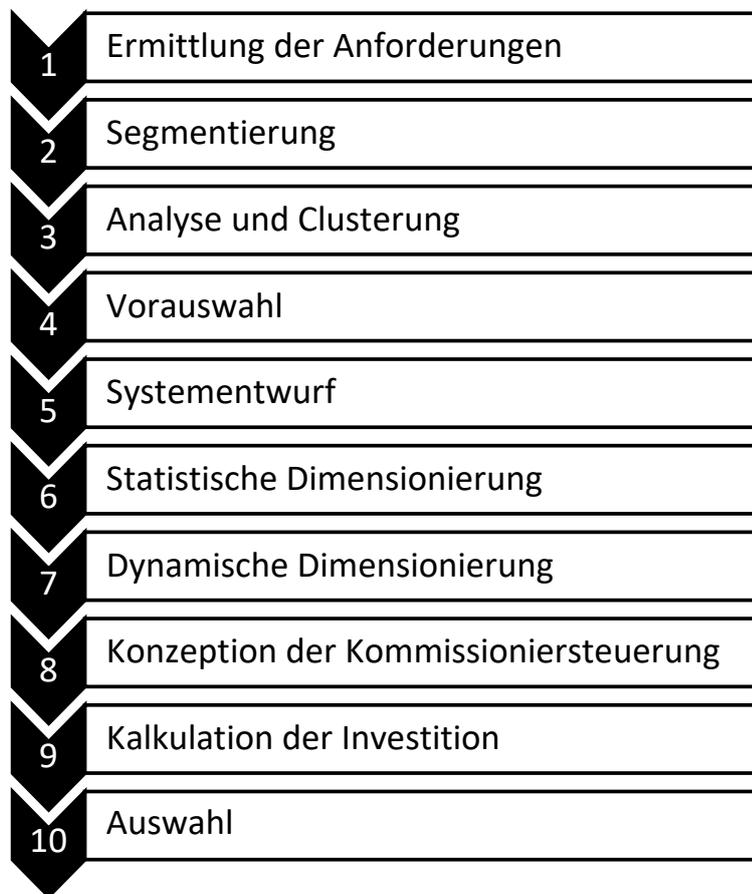


Abbildung 2-1: Planungsvorgehen für Kommissioniersysteme. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Gud-2012a, S. 765]

Den ersten Schritt der Planungsabfolge bildet die Ermittlung der Kommissionieranforderungen. Diese werden beeinflusst durch das Sortiment, die Auftragsstruktur, den erforderlichen Durchsatz und die Bestände. So stellen unterschiedliche Lagertemperaturen des Sortiments entsprechende Anforderungen an das Kommissioniersystem. Darauf aufbauend erfolgt eine Segmentierung des Artikelsortiments. Diese dient dazu, Sortimentsklassen zu bilden, deren Artikel bspw. über eine ähnliche Beschaffenheit verfügen, in denselben Lagereinheiten gelagert werden oder einer vergleichbaren Umschlagshäufigkeit unterliegen.

Nachdem das zu bevorratende Artikelsortiment in einzelne Klassen unterteilt worden ist, werden die Kundenaufträge ebenfalls segmentiert. Dabei werden die Aufträge nach Ein- oder Mehrpositionsaufträgen unterschieden, der Anteil an Eilaufträgen wird bestimmt und es werden die Größe und die Zusammensetzung der Aufträge berücksichtigt. Anschließend kann eine Auswahl geeigneter Kommissionierverfahren getroffen werden. Dazu werden einzelne Kombinationsmöglichkeiten der Sortimentsklassen daraufhin geprüft, ob Gemeinsamkeiten in der Lagerung und Kommissionierung vorliegen. Zusätzlich werden erste Gestaltungsmöglichkeiten des Systems näher untersucht. Im Zuge des Systementwurfs wird die Vorauswahl weiter eingegrenzt und konkretisiert. Dazu werden die Bestandteile des Systems, wie die Regalsysteme, die Kommissioniertechnik oder die Fördertechnik, näher spezifiziert. Darauf aufbauend erfolgt die statische Dimensionierung, in der erstmalig ein rechnerischer Leistungsnachweis des geplanten Systems erfolgt. Durch eine dynamische Dimensionierung erfolgt anschließend eine detailliertere Berechnung. Hier werden u. a. die optimale Anzahl an Kommissionierern, die Kommissioniergeräte sowie die Technik zur Nachschubversorgung bestimmt. Nachdem der Leistungsnachweis erbracht worden ist, erfolgt die konkrete Planung und Festlegung der Informations- und Kommunikationsflüsse. Das Planungsvorgehen mündet abschließend in eine Investitionsrechnung und die Auswahl des kostenoptimalen Kommissioniersystems. (vgl. [Gud-2012a, S. 765 f.]

Der Fokus dieser Arbeit liegt vor allem auf den Schritten zum Systementwurf und zur Dimensionierung. Um einzelne Planungsalternativen vergleichen zu können, bedarf es Zielgrößen. Diese werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

## 2.3 Zielgrößen bei der Dimensionierung

In die Planung von Logistiksystemen fließen grundsätzlich mehrere Faktoren ein, die unterschiedliche Zielkonflikte hervorrufen können. So sehen *ten Hompel et al.* Wirtschaftlichkeit, Kundenzufriedenheit und Zukunftssicherheit als Ziele von Logistiksystemen (vgl. [Hom-2018, S. 342]). *Gudehus* formuliert allgemeiner die drei Ziele Leistung, Qualität und Kosten (vgl. [Gud-2012b, S. 70]). Beide Ansätze verfolgen im Grunde die gleichen Ziele. Im Fokus steht zunächst die Leistung, die sich in der heutigen Zeit unmittelbar auf die Kundenzufriedenheit übertragen lässt. Hier stellt die Erwartung von möglichst kurzen Lieferzeiten im E-Commerce hohe Anforderungen an die Kommissioniersysteme. Gleiches gilt für die Zukunftssicherheit, die durch flexibel anpassbare Systeme sichergestellt werden kann. Mit einer schwankenden Anzahl an Aufträgen und sich verändernden Sortimentsanforderungen seitens der Kunden muss das Kommissioniersystem und damit das Unternehmen effizient umgehen können. Dabei müssen jedoch sowohl die Leistung als auch die Qualität in einem rentablen Kostenrahmen bleiben, andernfalls kann ein wirtschaftlicher und vor allem langfristiger Betrieb nicht gewährleistet werden. Mögliche Kennzahlen zur Messung der Zielerreichung werden in den beiden folgenden Unterabschnitten näher beschrieben.

### 2.3.1 Quantitative Größen

Im Zuge der Dimensionierung werden verschiedene Systemalternativen auf ihre Eignung überprüft. Dazu werden Kennzahlen benötigt, die einen direkten Vergleich zwischen Alternativen ermöglichen und typischerweise in qualitative und quantitative Kriterien unterteilt werden können. Unter den quantitativen Kriterien sind allen voran die Leistungskennzahlen entscheidend (vgl. [Hom-2011, S. 215]). Die Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit eines Kommissioniersystems ist wichtig, da sie meist durch nachgelagerte Prozesse und Abläufe oder externe Kunden vorgegeben ist und damit als Anforderung an das Kommissioniersystem formuliert werden kann. *Ten Hompel et al.* definieren die Leistung eines Kommissioniersystems wie folgt (vgl. [Hom-2011, S. 129]):

$$P_P = P_K \cdot n_p \quad (2-1)$$

Die Pickleistung errechnet sich letztlich aus der Kommissionierleistung  $P_K$  multipliziert mit der durchschnittlichen Anzahl an Picks pro Position  $n_p$ . Die Kommissionierleistung kann wiederum wie folgt beschrieben werden (vgl. [Hom-2011, S. 125]):

$$P_K = \frac{1}{t_K} \quad (2-2)$$

Die Kommissionierleistung  $P_K$  entspricht also dem Kehrwert der notwendigen Zeit  $t_K$  zur Bearbeitung einer Auftragsposition. Der Zeitanteil  $t_K$  setzt sich wiederum aus der Zusammenführungszeit  $t_Z$  und der eigentlichen Bearbeitungszeit  $t_B$  zusammen. Dabei gilt:

$$t_K = \begin{cases} t_Z + t_B, & \text{für PzW-Systeme} \\ \max(t_Z; t_B), & \text{für WzP-Systeme} \end{cases} \quad (2-3)$$

$$(2-4)$$

In PzW-Systemen ist die Zusammenführungszeit die Wegzeit, die der Kommissionierer zurücklegen muss, um eine Auftragsposition zu bearbeiten (vgl. [Hom-2011, S. 129]). Die Bearbeitungszeit  $t_B$  setzt sich wiederum aus der Basiszeit  $t_{basis}$ , der Greifzeit  $t_{greif}$  und der Totzeit  $t_{tot}$  zusammen. Die Summe dieser drei Bestandteile ergibt die Bearbeitungszeit:

$$t_B = t_{basis} + t_{greif} + t_{tot} \quad (2-5)$$

Die Basiszeit  $t_{basis}$  umfasst dabei diverse Aufgaben, die erforderlich sind, um einen Kommissionierauftrag vor- und nachzubereiten. Das kann das Ausdrucken von Listen oder die

Auf- und Abgabe von Behältern beinhalten (vgl. [Hom-2011, S. 133]). Um hier den Zeitan- teil für eine Auftragsposition zu erhalten, wird die benötigte Zeit durch die Gesamtanzahl an Positionen eines Kommissionierauftrages  $n_{pos}$  dividiert, sodass gilt:

$$t_{basis,pos} = \frac{t_{basis}}{n_{pos}} \quad (2-6)$$

Die Greifzeit  $t_{greif}$  entspricht dem Zeitbedarf, der benötigt wird, um die geforderte Men- ge eines Artikels aus der Bereitstelleinheit zu entnehmen und abzulegen. Die erforderliche Zeit hängt zum einen von der Entnahmemenge und zum anderen von der Bereitstellein- heit selbst ab. Die Greifzeit wird sowohl von der Lagerhöhe und der Greiftiefe als auch vom Gewicht und Volumen der Artikel beeinflusst (vgl. [Hom-2011, S. 133]). *Von Borries und Für- wentsches* sowie *Gudehus* haben dazu zwei umfassende Berechnungsmodelle vorgestellt (vgl. [Bor-1975, S. 60 ff.; Gud-2012a, S. 787 ff.]). Im Zuge dieses Unterabschnitts reicht die Anwendung eines Mittelwertes, wie sie *ten Hompel et al.* empfehlen (vgl. [Hom-2011, S. 133]).

Der letzte Zeitanteil ( $t_{tot}$ ) stellt unproduktive Zeit dar, die sich jedoch im Rahmen eines Kommissionierprozesses nicht vermeiden lässt. Bestandteile der Totzeit können u. a. die Orientierung am Entnahmeplatz, das Öffnen von Verpackungen oder das Kontrollieren von Artikelmen- gen sein. Der Umfang der Totzeit hängt maßgeblich vom Personal, der Informationsdarstellung sowie der Ergonomie am Arbeitsplatz ab. (vgl. [Hom-2011, S. 133])

Die Zusammenführungszeit  $t_Z$  stellt in PzW-Systemen, wie bereits beschrieben, die durch- schnittliche Zeit dar, die ein Kommissionierer bei der Fortbewegung zwischen zwei Entnah- meorten benötigt. Diese hängt zum einen von der Geschwindigkeit  $v$  und der Beschleu- nigung  $a$  des Kommissionierers ab, zum anderen hat die entsprechende Wegstrecke  $s_n$  einen maßgeblichen Einfluss. Eben diese Wegstrecke  $s_n$  ist jedoch unmittelbar von den angewandten Kommissionierstrategien abhängig. Der Einfluss der Kommissionierstrategi- en auf die Wegstrecken wird von *ten Hompel et al.* umfassend hergeleitet (vgl. [Hom-2011, S. 140 ff.]). An dieser Stelle soll lediglich auf die folgende Fallunterscheidung zur Bestim- mung der Gesamtfahrzeit  $t_n$  hingewiesen werden.

$$t_n = \begin{cases} \frac{s_n}{v} + n_a \cdot \frac{v}{a} & \text{für } \frac{s_n}{n} \geq \frac{v^2}{a} \\ n_a \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{s_n}{n \cdot a}} & \text{für } \frac{s_n}{n} < \frac{v^2}{a} \end{cases} \quad (2-7)$$

$$(2-8)$$

*Ten Hompel et al.* treffen die Annahme, dass ein Kommissionierer zum Absolvieren der Wegstrecke  $s_n$  insgesamt  $n_a$ -mal beschleunigen und bremsen muss, um  $n$  Positionen zu kommissionieren. Der Zeitanteil  $t_n$  errechnet sich daher aus der Zeit, die benötigt wird, um

die Gesamtstrecke zu absolvieren, addiert mit dem  $n_a$ -fachen Anteil der Beschleunigung. Sollten die Abstände zwischen zwei Entnahmeorten jedoch zu klein sein, um die maximale Geschwindigkeit zu erreichen, werden nur die Beschleunigungs- und Bremsanteile berücksichtigt.

Neben den Leistungskennzahlen spielen bei der Planung und im Betrieb von Kommissioniersystemen monetäre Zielgrößen eine entscheidende Rolle. Die Herausforderung liegt darin, dass der Kommissionierung kein direkter Gegenwert als Leistung gegenübergestellt werden kann, da diese keine Wertschöpfung im traditionellen Sinne darstellt. Daher gilt es, die laufenden Kosten für den Betrieb möglichst vollumfänglich sowie die notwendigen Investitionen zu dessen Realisierung zu berücksichtigen<sup>4</sup>. Sowohl *Gudehus* als auch *ten Hompel et al.* empfehlen in ihren Planungsvorgehen eine Gegenüberstellung der zu erwartenden Kosten und Investitionen sowie der Auswahl einer kostenoptimalen Lösung (vgl. [Hom-2018, S. 348; Gud-2012a, S. 765]). Anfallende Kosten können u. a. dem Personal, der eingesetzten Technik, dem Gebäude, dem Energiebedarf sowie der Instandhaltung zugeordnet werden (vgl. [Hom-2011, S. 213]). In der Intralogistik ist die Kommissionierung mit ca. 55 Prozent der anfallenden Gesamtkosten der größte Kostenfaktor (vgl. [Kos-2007, S. 2]). Um die Kosten auch im direkten Vergleich von Systemalternativen nutzen zu können, werden sie auf die Kommissionierleistung umgerechnet, sodass die Kosten je Position bestimmt werden können.

Darüber hinaus werden Zielgrößen berücksichtigt, die eine Aussage über die Qualität des Kommissioniersystems ermöglichen. Kommissionierfehler oder Liefertreue sind zwei Kennzahlen, die häufig zur Bewertung von Kommissioniersystemen herangezogen werden (vgl. [VDI-4490; Hom-2011, S. 214]). Die Fehlerquote gibt Auskunft darüber, wie viele Auftragspositionen fehlerhaft kommissioniert wurden, bezogen auf alle kommissionierten Positionen. Die Fehlerquote lässt sich unterteilen nach Typfehlern, Mengenfehlern, Auslassungsfehlern und Zustandsfehlern (vgl. [Fot-2022c, S. 144]). Alle Fehlerarten müssen durch diverse Sonderprozesse bereinigt werden und können sich unmittelbar auf die Kundenzufriedenheit auswirken. Das Nichteinhalten von Lieferterminen und -zeitfenstern führt gleichermaßen zu Sonderprozessen oder Vertragsstrafen, die je nach Unternehmensumfeld hohe Kosten verursachen können. Ein objektiver Vergleich zwischen verschiedenen Systemalternativen lässt sich mit quantitativen Größen realisieren. Dennoch werden auch qualitative Kriterien zur Entscheidungsfindung herangezogen. Diese werden im folgenden Unterabschnitt näher beleuchtet.

---

<sup>4</sup> Ein möglicher Ansatz besteht in der Berücksichtigung der Total Cost of Ownership (TCO). Hier werden neben den notwendigen Investitionen für eine Anschaffung ebenfalls die Folgekosten für den Betrieb, Schulung, Wartung etc. berücksichtigt (vgl. [Wer-2020, S. 36]).

### 2.3.2 Qualitative Größen

Wie schon bei den quantitativen Kenngrößen, obliegt die Auswahl von qualitativen Kennzahlen allein dem Anwender oder Planer. Zwei wesentliche Bereiche, in denen vermehrt qualitative Größen angewandt werden, sind die Flexibilität und das Personalmanagement (vgl. [Hom-2011, S. 216]). Die Flexibilität beschreibt die Fähigkeit des Kommissioniersystems, auf sich verändernde Bedingungen reagieren zu können. Dies können eine steigende Nachfrage aufgrund von Rabattaktionen oder saisonale Ereignisse sein, wobei bspw. kurzfristig auf zusätzliches Personal zurückgegriffen werden muss. Hierbei ist entscheidend, dass kurze Anlernphasen realisiert werden können und zusätzliche Kapazitäten und Ressourcen verfügbar sind. Eine dynamische Sortimentsführung sowie Erweiterungen in der Zukunft gehören, insbesondere im E-Commerce, zu den zwingenden Anforderungen, die ein Kommissioniersystem erfüllen muss.

Im Zuge des stetigen Personalmangels in der Logistik spielen Kennzahlensysteme im Personalmanagement eine zunehmend wichtigere Rolle. Um diesem Mangel entgegenzuwirken und eine möglichst niedrige Mitarbeiterfluktuation zu realisieren, werden verschiedene Kennzahlen erhoben. Im Vordergrund steht dabei die Zufriedenheit der Mitarbeiter, die ohne Beeinträchtigung der weiteren Zielgrößen (Leistung und Kosten) gesteigert oder zumindest erhalten werden soll. Für den Bereich der Kommissionierung respektive der Logistik sei u. a. auf Arbeiten von *Klevers* und *Koch* verwiesen, die Ansätze zur Steigerung der Mitarbeiterzufriedenheit entwickeln (vgl. [Kle-2016; Koc-2017]).

## 2.4 Planungsprobleme zur Zielerreichung

Zur Erreichung von (Unternehmens-)Zielen muss aus einer Menge an alternativen Lösungen eine gewählt werden, die am geeignetsten zur Zielerreichung beiträgt. Dazu verfügt der Entscheider über eine Menge an Maßnahmen, die unterschiedliche Ausprägungen annehmen können (vgl. [Kle-2011, S. 7 f.]). Im Zuge dieser Arbeit sollen die Maßnahmen zur Zielerreichung innerhalb der Kommissionierung als Planungsprobleme bezeichnet werden (vgl. [Gil-2018, S. 2]). Ein Planungsproblem kann über unterschiedliche Freiheitsgrade verfügen, wobei für ein Planungsproblem stets nur ein Freiheitsgrad je Planungsfall angewandt werden kann. Eine erste umfassende Untersuchung diverser Planungsprobleme erfolgte zu Beginn des 21. Jahrhunderts, als *de Koster et al.* neben der Layoutgestaltung die Lagerbelegung, das Auftragsbatching (Zusammenfassen von Aufträgen), die Zonierung und das Routing näher betrachteten (vgl. [Kos-2007]).

Einige Jahre später griff *van Gils* zusammen mit *de Koster* diese Arbeit auf. Der Fokus ihrer Studie liegt vor allem auf der Darstellung von Untersuchungen, die mehrere Planungsprobleme gleichzeitig betrachten (vgl. [Gil-2018]). Dieser Veröffentlichung wurde die folgende

Abbildung entnommen, die die Abfolge der relevanten Planungsprobleme in eine zeitliche Reihenfolge bringt (vgl. Abb. 2-2).

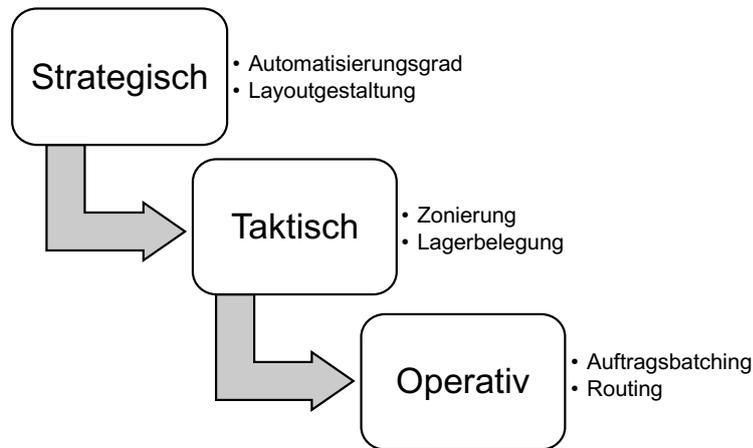


Abbildung 2-2: Einteilung der relevanten Planungsprobleme. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Gil-2018, S. 2]

*Strategische Entscheidungen* werden in der Regel zu Beginn des Planungsprozesses beschlossen und nur selten angepasst. Dazu gehören u. a. der Automatisierungsgrad des Systems sowie die Layoutgestaltung. Mittelfristig werden die taktischen Planungsprobleme beschlossen, zu denen die gesamte Dimensionierung aller Ressourcen, die Zonierung sowie das Lagerlayout gehören. Diese Entscheidungen werden häufiger neu getroffen, da Phasen wie das Weihnachtsgeschäft sowohl in Bezug auf die zur Verfügung stehenden Ressourcen als auch im Hinblick auf andere Faktoren eine Anpassung erfordern. In kürzeren Intervallen werden die operativen Planungsprobleme untersucht und ggf. angepasst. Dazu gehören das Batching, das Routing und die Auftragsvergabe. Hierbei kann beispielsweise die aktuelle Auslastung des Systems oder die Auftragslage eine Veränderung des Batching aufgrund von vermehrten Eilaufträgen zur Folge haben. (vgl. [Gil-2018, S. 2 ff.] )

Um ein einheitliches Verständnis der einzelnen Planungsprobleme zu schaffen, sollen diese in den nachfolgenden Unterabschnitten näher beschrieben werden.

### 2.4.1 Automatisierungsgrad

Die Wahl des Automatisierungsgrades ist angesichts des Personalbedarfs und des anhaltenden Kostendrucks ein aktuelles Planungsproblem. Die möglichen Freiheitsgrade gestalten sich dabei vielfältig. Der Einsatz von mobilen Robotern, den auch diese Arbeit fokussiert und der in Kapitel 3 näher beschrieben wird, stellt nur einen Freiheitsgrad dar. Eine weitere Möglichkeit sind WzP-Systeme, die von der Lagerung in AKL bis zum Transport über Fördertechnik vollautomatisiert umgesetzt werden können (vgl. [Hom-2011, S. 76 ff.]). Je nach Sortimentsgestaltung ist das Greifen der Artikel ebenfalls automatisierbar. Häufig

wird hier zwischen Single Item Picking und Kolli-Picking unterschieden. Beim Single Item Picking handelt es sich häufig um kompakte Manipulatoren, die einzelne Artikel greifen und in einen Versandbehälter ablegen können (bspw. im E-Commerce). Das Kolli-Picken fokussiert das Greifen von Gebinden, bestehend aus mehreren Artikeln, um u.a. Mischpaletten für die Belieferung von Supermarktfilialen zu automatisieren (vgl. [Hom-2011, S. 85]). Dem gegenüber stehen die häufig nur teilautomatisiert oder gänzlich manuell durchgeführten PzW-Systeme, bei denen der Kommissionierer sich an unterschiedliche Entnahmestellen im System bewegt und dort aus einem Regal oder von einer Palette einzelne Artikel entnimmt (vgl. [Hom-2011, S. 67 ff.]). Aus Sicht der Planung stellt sich daher die Frage, in welchen Fällen eine PzW- und in welchen eine WzP-Kommissionierung sinnvoll ist.

In der Literatur können bisher nur morphologische Ansätze zur Entscheidungsfindung identifiziert werden. Aktuell gibt es keine analytischen oder simulationsbasierten Modelle, welche auf der Grundlage von Eingangsparametern bei der Wahl eines geeigneten Automatisierungsgrades unterstützen. Ansätze von *ten Hompel et al.* und *Gudehus* basieren auf Erfahrungen und theoretischen Abschätzungen. Außer der Grundlagenliteratur gibt es einige wissenschaftliche Arbeiten, die sich detailliert mit der Auswahl des Automatisierungsgrades und mit dessen Hintergründen beschäftigen. *Baker und Halim* sowie *Marchet et al.* haben dazu Kommissioniersysteme in der Praxis untersucht, diese unterteilt und Führungspersonen über die Beweggründe ihrer Entscheidungen interviewt (vgl. [Bak-2007; Mar-2015]). *Dallari et al.* führten eine ähnliche Studie durch, um allgemeingültige Aussagen zur Wahl der Kommissionierart treffen zu können (vgl. [Dal-2009]).

Vergleicht man nun die Empfehlungen, kann keine einheitliche Tendenz erkannt werden. So raten *ten Hompel et al.* zum Einsatz von WzP-Kommissionierung, vor allem bei normal und langsam drehenden Artikeln, da diese meist einen Großteil des Gesamtsortiments ausmachen und somit einen hohen Flächenbedarf erfordern. Die Bevorratung in einem AKL ermöglicht dabei einen deutlich höheren Flächennutzungsgrad (vgl. [Hom-2011, 219f.]). *Dallari et al.* ergänzen, dass bei WzP-Systemen mindestens 1.000 unterschiedliche Artikel bevorratet werden sollten, unterhalb dieser Sortimentsbreite sei eine klassische PzW-Kommissionierung sinnvoller. Allerdings sollte die geforderte Kommissionierleistung bei maximal 2.000 Positionen pro Tag liegen. Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen *Marchet et al.* in ihren empirischen Untersuchungen und bestätigen die Arbeit von *Dallari et al.* (vgl. [Mar-2015]).

Einen anderen Ansatz empfiehlt jedoch *Gudehus*. Er bestätigt zwar ebenfalls die Notwendigkeit eines breiten Sortiments, setzt allerdings eine hohe Leistungsanforderung voraus. Dazu soll im ersten Schritt einer zweistufigen Kommissionierung artikelweise kommissioniert werden, wobei vorausgesetzt wird, dass parallel mehrere Aufträge kommissioniert werden können, sodass ein Artikeltyp für mehrere Aufträge gleichzeitig entnommen und auf mehrere Ladehilfsmittel verteilt werden kann (vgl. [Gud-2012a, S. 723]). Die parallele Bearbeitung von mehreren Kundenaufträgen setzt eine gewisse Umschlaghäufigkeit

voraus. Schnell drehende Güter nehmen jedoch einen geringen Anteil am Gesamtsortiment ein, wodurch der mehrheitlich geltende Konsens einer hohen Sortimentsbevorratung in WzP-Systemen nur bei sehr großen Systemen erreicht werden kann. Um dem entgegenzuwirken, werden vermehrt Mischlösungen eingesetzt. Beispielsweise ermöglicht die Kommissionierung entlang einer AKL-Front eine klassische PzW-Kommissionierung, die jedoch Nachschub durch das angebundene AKL automatisiert ermöglicht (vgl. Abb. 2-3) (vgl. [Hom-2011, S. 87 f.]).

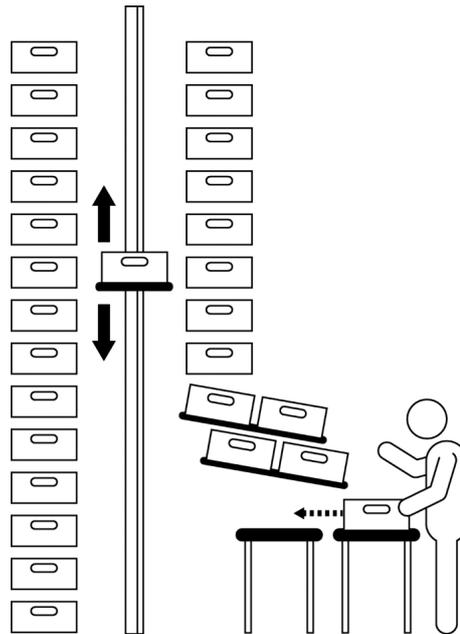


Abbildung 2-3: Beispiel einer PzW-Kommissionierung mit der Nachschubversorgung durch ein AKL (vgl. [Hom-2011, S. 88])

Die Wahl des Automatisierungsgrades beeinflusst die relevanten Freiheitsgrade der übrigen Planungsprobleme. Bei einer WzP-Kommissionierung sind die Freiheitsgrade des Routings obsolet, da sich der Kommissionierer üblicherweise nicht viel bewegen muss. Da im Rahmen dieser Arbeit die Betrachtung von teilautomatisierten PzW-Systemen im Vordergrund steht, sollen die nachfolgenden Planungsprobleme und deren Freiheitsgrade für diese Art der Kommissionierung berücksichtigt werden. Es ist im Sinne des Planungsprozesses daher davon auszugehen, dass der Planer den Automatisierungsgrad bereits bestimmt hat.

### 2.4.2 Layoutgestaltung

Kommissioniersysteme werden häufig als Blocklayout visualisiert und konfiguriert. Daraus ergeben sich u. a. folgende Freiheitsgrade (vgl. [Kos-2007, S. 9 f.]):

- Anzahl der Lagerblöcke
- Anzahl an Lagergassen je Block
- Länge der Lagergassen



rung bspw. die Verpackung und der Versand statt, sind ggf. mehrere Arbeitsplätze sinnvoll. Erfolgt andererseits zunächst eine Sortierung der einzelnen Aufträge, beispielsweise durch automatisierte Fördertechnik, kann auch eine Abgabestelle ausreichen. Letztlich wird deutlich, dass das Layout einer individuellen Gestaltung unterliegt, die häufig von baulichen Anforderungen, dem spezifischen Artikelsortiment und unternehmerischen Prozessen und Zielen geprägt ist.

### 2.4.3 Zonierung

Im Rahmen der Zonierung wird ein Kommissioniersystem in mehrere Bereiche unterteilt (vgl. [Hom-2011, S. 33; Gud-2012a, S. 744; Kos-2007, S. 14]). Die Motivation zur Einrichtung kann jedoch variieren. *De Koster et al.* empfehlen grundsätzlich eine Zonierung bei größeren Systemen, um die Zonen auf verschiedene Kommissionierer aufzuteilen und so die Wegstrecken zu minimieren (vgl. [Kos-2007, S. 14]). Einen ähnlichen Ansatz verfolgt *Gudehus*, der empfiehlt, dass ein System mit vielen gleichartigen Artikeln in mehrere kleinere Zonen unterteilt werden sollte (vgl. [Gud-2012a, S. 744]). *Ten Hompel et al.* setzen für ein mehrzoniges System jedoch unterschiedliche Lager- und Kommissioniertechniken in den jeweiligen Zonen voraus (vgl. [Hom-2011, S. 33]). Dies empfiehlt *Gudehus* insbesondere dann, wenn sich die Artikel in ihrer Beschaffenheit und Häufigkeit stark unterscheiden. Allerdings macht *Gudehus* deutlich, dass ein Kommissioniersystem mit zu vielen Zonen und unterschiedlichen Techniken einen hohen Koordinationsaufwand bei der Auftragszuweisung und -zusammenführung hervorruft (vgl. [Gud-2012a, S. 745]).

### 2.4.4 Lagerplatzvergabe

Die Strategie zur Lagerplatzvergabe oder Lagerbelegung beschreibt, nach welchen Prinzipien das Artikelsortiment im Kommissioniersystem platziert wird. Dabei muss zwischen der Lagerung aus Sicht des Gesamtsystems und aus der Perspektive eines Regalsegments unterschieden werden. Ersteres kann auch als Makro-Lagerung und Zweiteres als Mikro-Lagerung bezeichnet werden. In der Literatur wird zunächst von einer systemweiten Betrachtung ausgegangen. Erst im zweiten Schritt, im Rahmen der Überlegung zur Ergonomie, werden einzelne Regalsegmente und -ebenen betrachtet. Im Rahmen dieses Unterabschnitt soll es vornehmlich um die Makro-Lagerung gehen.

Die Grundlagenliteratur beschreibt eine Vielzahl an Lagerplatzvergabe-strategien, wobei häufig keine einheitliche Systematisierung vorliegt. So sehen *ten Hompel et al.* eine Lagerbelegung nach Zugriffshäufigkeiten als Teil des Freiplatzprinzips, wohingegen *Gudehus* sie als Teil der festen Pickplatzordnung erachtet (vgl. [Hom-2011, S. 92; Gud-2012a, S. 752]). Unabhängig davon lassen sich in der Literatur vier wesentliche Strategien in Bezug auf die Lagerplatzvergabe erkennen (vgl. [fml-2018]):

- freie Lagerplatzvergabe
- feste Lagerplatzvergabe
- klassenbasierte Lagerplatzvergabe
- Lagerplatzvergabe unter Berücksichtigung von Artikelkorrelationen

Bei der freien oder auch chaotischen Lagerplatzvergabe werden einzulagernde Artikel einem freien Lagerplatz zugeordnet. Dies kann auf zwei Arten erfolgen. In der ersten Variante, welche am häufigsten angewandt wird, werden die Artikel gleichmäßig über das gesamte Lager verteilt (vgl. [Kos-2007, S. 11]). Dies ermöglicht einen effizienten Raumnutzungsgrad (vgl. [Pet-2004, S. 12]), der Blockierungen unter den Kommissionierern minimieren kann (vgl. [Kau-2019a, S. 295]). Um den Artikeln einen festen Lagerplatz zuzuweisen, bedarf es jedoch einer geeigneten Lagerverwaltungssoftware oder eines Warehouse-Management-Systems (WMS) (vgl. [Kos-2007, S. 11]). Neben der systemseitigen Vorgabe von zufälligen Lagerplätzen besteht auch die Möglichkeit, dass das Personal im Rahmen des Einlagerungsprozess eigenständig einen freien Lagerplatz wählt. Dies führt häufig dazu, dass um das Depot herum ein sehr hoher Belegungsgrad herrscht, der mit weiterer Entfernung zum Depot abnimmt, wodurch sich automatisch eine Wegstreckenoptimierung einstellt (vgl. [Kos-2007, S. 11]).

Die feste Lagerplatzvergabe definiert für jeden Artikel einen oder mehrere Lagerplätze. Vorteilhaft sind dabei der geringe Steuerungsaufwand und die bei den Kommissionierern einsetzende Routine, durch die über die Zeit der Suchaufwand minimiert wird (vgl. [Ber-1997, S. 74; Kos-2007, S. 11]). Nachteilig ist der reservierte Platzbedarf, der durch das Vorhalten auch von langsam drehenden Artikeln oder Saisonware entsteht. Untersuchungen konnten zudem zeigen, dass bei dieser Variante mit einer Zunahme der Wegstrecke zu rechnen ist (vgl. [Ber-1997, S. 74; Fon-2014, S. 7]).

Die klassenbasierte Lagerplatzvergabe berücksichtigt Artikelklassen zur Bevorratung des Sortiments (vgl. [Kos-2007, S. 12]). Die jeweiligen Klassen werden dabei definierten Lagerbereichen zugeordnet, wobei die Vergabe der Plätze innerhalb des Bereiches zufällig erfolgt (vgl. [Ber-1999, S. 754]). Somit könnte man die feste und freie Lagerplatzvergabe als Teil der klassenbasierten Belegung definieren, da bei einer einzigen Klasse im Sortiment eine freie Lagerbelegung angenommen werden kann. Erhält hingegen jeder Artikel eine eigene Klasse, liegt eine feste Lagerplatzvergabe vor (vgl. [Gu-2007, S. 8]). Innerhalb der klassenbasierten Lagerplatzvergabe haben sich zwei wesentliche Einteilungskriterien etabliert. Dies ist zum einen die ABC-Analyse (vgl. [Kos-2007, S. 12 f.; Hom-2011, S. 93 f.; Gud-2012a, S. 752 ff.]) und zum anderen der Cube per Order Index (COI) (vgl. [Hes-1963; Hes-1964]).

Das Ziel der ABC-Analyse ist die Zuordnung des Sortiments zu einer der drei Artikelklassen A, B oder C, denen wiederum ein definierter Lagerbereich zugeordnet wird. Die Grundlage der Zuordnung sind in der Regel die Zugriffshäufigkeiten der Artikel (vgl. [Ber-1997, S. 88;

Kos-2007, S. 13; Hom-2011, S. 92 f.; Gud-2012a, S. 753 f.]). Entsprechend ihrer Gewichtung werden die Artikel den Klassen zugeordnet, wobei A die höchste und C die niedrigste Priorität aufweist. Damit im Hinblick auf die Kommissionierleistung Optimierungen erreicht werden können, werden die Artikel in absteigender Priorität in der Nähe des Depots platziert (vgl. Abb. 2-5) (vgl. [Hom-2011, S. 94]).

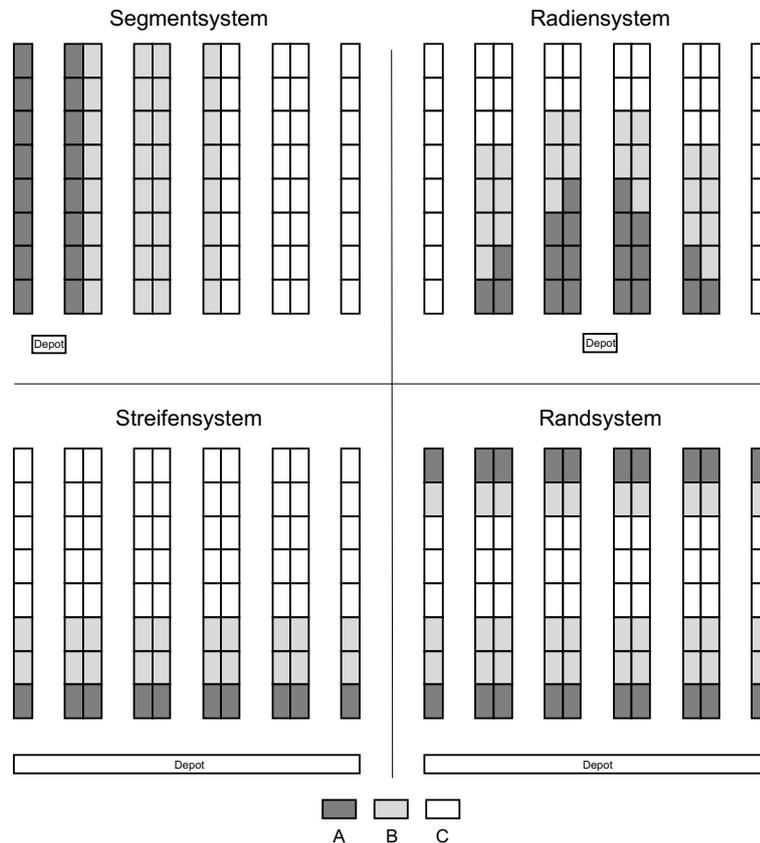


Abbildung 2-5: Platzierung der ABC-Artikel. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Hom-2011, S. 93]

Die COI-Regel wurde erstmalig von *Heskett* vorgestellt (vgl. [Hes-1963; Hes-1964]). Ähnlich der ABC-Belegung, versucht die COI-Regel ebenfalls die Kommissionierwege zu reduzieren. Dazu wird für jeden Artikel der Quotient aus Volumen und Anzahl an Zugriffen bestimmt, sodass der entsprechende Platzbedarf eines Artikels berücksichtigt wird. Die Idee dabei ist, dass Artikel mit einem kleinen COI möglichst nahe am Depot gelagert werden, da sie entweder einen geringen Platzbedarf haben, einer hohen Nachfrage unterliegen oder, im optimalen Fall, beides zutrifft.

Die vierte Lagerplatzvergabe-strategie ist die Berücksichtigung der Artikelkorrelationen. Im Detail wurde sie erstmals von *Frazelle* vorgestellt (vgl. [Fra-1989]). Demnach sollen Artikel, die häufig gemeinsam nachgefragt werden, möglichst nah beieinander gelagert werden. Damit lassen sich kürzere Kommissioniertouren erreichen, die wiederum die Leistung des Systems erhöhen (vgl. [Fra-1989; Kos-2007, S. 13 f.; Gil-2018, S. 30]).

### 2.4.5 Auftragsbatching

Das Auftragsbatching oder Order-Batching-Problem untersucht, welche Kundenaufträge zu einem Kommissionierauftrag (Batch) zusammengefasst werden sollen (vgl. [Koc-2014, S. 23]). Unterliegt das Batching keinen Strategien, entspricht der Kommissionierauftrag dem Kundenauftrag (vgl. [Hom-2011, S. 33]).

Zu Optimierungszwecken können mehrere Kundenaufträge zu einem Kommissionierauftrag gebündelt werden. Dies bietet sich an, wenn mehrere Kunden gleiche Artikel oder Artikel, die in räumlicher Nähe liegen, bestellen. Zusätzlich ist es möglich, dass einzelne Kundenaufträge aufgelöst und die einzelnen Positionen mit Positionen anderer Kundenaufträge zusammengefasst werden. Dadurch wird eine mehrstufige Kommissionierung vorgenommen. Daraus resultiert zwar die höchste Optimierung, muss jedoch im Anschluss eine Zusammenführung mit den ursprünglichen Kundenaufträgen gewährleisten. Daher bietet sich dieser Vorgang vor allem bei sehr großen Systemen an, wodurch die Durchlaufzeit eines Auftrags deutlich reduziert werden kann und dementsprechend der Mehraufwand zur Zusammenführung gerechtfertigt ist (vgl. [Hom-2011, S. 31; Gud-2012a, S. 796]).

Wenn beim Auftragsbatching mehrere Kundenaufträge zusammengefasst werden sollen, bedarf es entsprechender Verfahren, um dies möglichst effizient zu gestalten. Ein umfangreiches Auftragsbatching erfordert die Berücksichtigung des Traveling-Salesman-Problems (TSP). Ergänzt man die Tatsache, dass Kommissionierer aufgrund einer begrenzten Kapazität nicht alle Haltepunkte anfahren und damit nicht alle Artikel entnehmen können, handelt es sich um das Vehicle-Routing-Problem (VRP) (vgl. [Pro-2016, S. 408]). Zu beachten ist, dass das VRP NP-schwer ist. Das bedeutet, dass die zur Lösung des Problems erforderliche Zeit stärker als polynomiell zunimmt, wodurch bei steigender Modellgröße (hier: Anzahl an möglichen Stopps) eine exakte Lösung nicht in einer akzeptablen Rechenzeit zu ermitteln ist (vgl. [Gad-2005, S. 65]). Dies führt dazu, dass insbesondere in der Praxis vermehrt Heuristiken eingesetzt werden (vgl. [Koc-2014, S. 30 ff.]).

Heuristiken lassen sich u. a. in Konstruktionsheuristiken und Metaheuristiken unterteilen. Beide haben gemeinsam, dass sie das Finden der optimalen Lösung nicht garantieren können, allerdings im Vergleich zu exakten Verfahren deutlich schneller in der Entwicklung von Lösungen sind (vgl. [Dom-2015, S. 135]). Konstruktionsheuristiken dienen zur Generierung einer ersten möglichen Lösung (vgl. [Dom-2015, S. 136]). Das Ziel dieser Heuristiken ist, eine zulässige Lösung zu finden, ohne diese verbessern zu wollen (vgl. [Koc-2014, S. 33]). Metaheuristiken werden verwendet, um das Ergebnis einer Konstruktionsheuristik zu verbessern.

*Koch* stellt im Rahmen seiner Arbeit drei Gruppen von Konstruktionsheuristiken vor<sup>5</sup>: Prioritätsregeln, Seed-Verfahren und Savings-Verfahren (vgl. [Koc-2014, S. 33 ff.]).

---

<sup>5</sup> Eine ähnliche Einteilung findet sich in [Kos-1999].

regeln bestehen aus zwei Schritten. Zunächst wird jedem Kundenauftrag ein Prioritätswert zugeordnet. Anschließend erfolgt die Rangfolge der Aufträge auf Basis der entwickelten Reihenfolge (vgl. [Koc-2014, S. 33 f.]). Die sicherlich bekanntesten Regeln sind „First in – First out“ oder „Last in – First out“ (vgl. [Kos-1999, S. 1483; Hen-2012, S. 115]). Obwohl die Prioritätsregeln meist keine optimale Lösung liefern, finden sie in der Praxis wegen ihrer Einfachheit häufig Anwendung (vgl. [Alb-2009, S. 659]).

Die zweite Gruppe sind die Seed-Verfahren, die in den zwei Schritten Seed-Auswahl und Auftragsergänzung ablaufen. Im Rahmen der Seed-Auswahl wird ein Start-Auftrag aus dem zur Verfügung stehenden Auftragspool entnommen (vgl. [Hen-2012, S. 116; Koc-2014, S. 35; Kos-1999, S. 1483]). Dabei kann der erste Auftrag u. a. nach folgenden drei Regeln ausgewählt werden:

- Wähle einen beliebigen Auftrag (vgl. [Gib-1992, S. 61]).
- Wähle den Auftrag mit der längsten Kommissioniertour (vgl. [Kos-1999, S. 1483]).
- Wähle den Auftrag mit den meisten Kommissioniergassen (vgl. [Kos-1999, S. 1483]).

Im zweiten Schritt, der Auftragsergänzung, sollen möglichst viele Aufträge gefunden werden, die der Seed-Auswahl ähneln und somit den neueröffneten Batch optimal ergänzen. Auch hier stehen die übrigen Aufträge aus dem Auftragspool zur Verfügung, die unter Einhaltung der Kapazitätsrestriktionen dem aktuellen Batch hinzugefügt werden können (vgl. [Koc-2014, S. 35]). Das Erweitern um zusätzliche Aufträge basiert ebenfalls auf definierten Regeln<sup>6</sup>:

- Wähle den Auftrag, der die größten Überschneidungen bei den bereits anzufahrenden Entnahmeorten aufweist (vgl. [Els-1983, S. 582]).
- Wähle den Auftrag, der die größten Überschneidungen bei den bereits anzufahrenden Kommissioniergassen aufweist (vgl. [Ho-2006, S. 3397]).
- Wähle den Auftrag, der die kleinste Anzahl an zusätzlich anzufahrenden Kommissioniergassen aufweist (vgl. [Ho-2006, S. 3397]).

Im Rahmen des Savings-Verfahrens, welches die dritte Gruppe der Konstruktionsheuristiken bildet, wird meistens auf das Verfahren von *Clarke und Wright* zurückgegriffen (vgl. [Cla-1964]). Dabei werden jeweils zwei Aufträge als Paar betrachtet. Der Savings-Wert  $sav_{ij}$  der Kundenaufträge  $i$  und  $j$  gibt dabei die Differenz der Gesamtlänge ( $d_i + d_j$ ) an, wenn beide Aufträge einzeln auf separaten Touren kommissioniert worden wären, und die Weglänge bei einer gemeinsamen Tour ( $d_{ij}$ ) (vgl. [Koc-2014, 37f.]). Daraus resultiert folgender Zusammenhang:

$$sav_{ij} = d_i + d_j - d_{ij} \quad (2-9)$$

---

<sup>6</sup> Eine umfassende Auflistung möglicher Verfahren zur Seed-Auswahl und der Auftragsergänzung ist in [Hen-2012] zu finden.

Nachdem für alle Kundenaufträge die Savings-Werte ermittelt wurden, werden die Auftragspaare in absteigender Reihenfolge sortiert und entsprechend den Batches zugeordnet (vgl. [Koc-2014, S. 38]).

Ein weiterer Ansatz zur Entwicklung einer ersten Lösung ist die Durchführung der Nearest-Neighbour-Heuristik. Dieses Verfahren ähnelt im Prinzip dem oben aufgeführten Seed-Verfahren mit der Einschränkung, dass dieses nicht die gesamten Aufträge, sondern lediglich einzelne Auftragspositionen eines Auftrages betrachtet. Im ersten Schritt wird eine (beliebige) Auftragsposition ausgewählt. Im nächsten Schritt wird die Position gewählt, die die kürzeste Entfernung zu der vorher ausgewählten Position hat. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis die Kapazität des Kommissionierers erschöpft ist. (vgl. [Pro-2016, S. 411])

Nachdem mittels einer Konstruktionsheuristik eine erste Lösung generiert wurde, empfiehlt es sich, im Anschluss eine Metaheuristik anzuwenden. Die Metaheuristiken gehören den Verbesserungsverfahren an und setzen daher eine bestehende Lösung voraus (vgl. [Dom-2015, S. 136]). Auf Grundlage der Ausgangslösung wird anschließend mittels verschiedener Techniken nach einer Lösung gesucht, die einen besseren Zielwert aufweist als die primäre Lösung (vgl. [Koc-2014, S. 40]).

Lokale Suchverfahren, wie sie u. a. von *Gademann und van de Velde* entwickelt wurden, basieren darauf, im direkten Umfeld des Lösungsraums nach besseren Alternativen zu suchen (vgl. [Gad-2005]). Um zu gewährleisten, dass nicht ausschließlich ein lokales Optimum gefunden wird, werden dem iterativen Verfahren Störphasen hinzugefügt, um den Lösungsraum zu erweitern und das globale Optimum zu finden (vgl. Abb. 2-6).

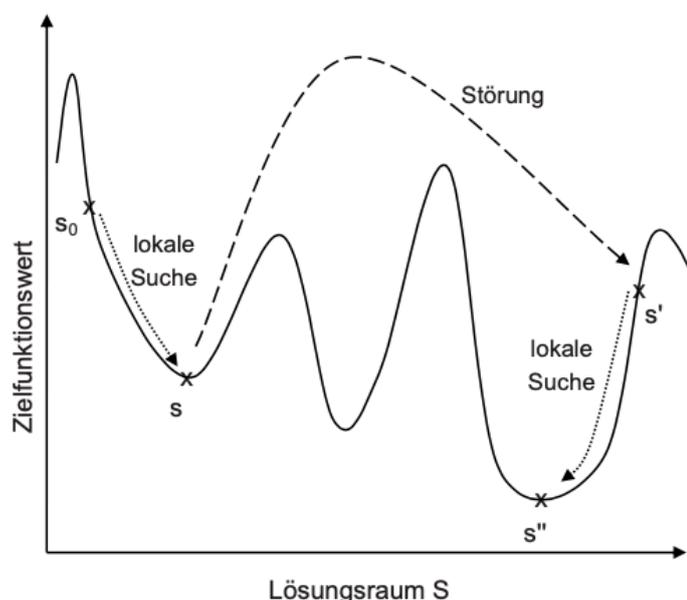


Abbildung 2-6: Prinzip der iterativen lokalen Suche [Tal-2009, S. 147]

Im Fall des Auftragsbatchings innerhalb der Kommissionierung wird zunächst ein erster Kommissionierauftrag bestimmt. Sobald ein lokales Minimum identifiziert wurde, erfolgt im Rahmen der Störphase das Tauschen einer Position des Kommissionierauftrages mit einer nicht berücksichtigten Position. Sollte damit der Kommissionierauftrag verbessert werden, indem bspw. die Wegstrecke minimiert werden konnte, wird der neue Auftrag übernommen und das Vorgehen wiederholt. Im Fall von *Gademann und van de Velde* wird nach 25 Wiederholungen das Verfahren abgebrochen und die bis dahin beste Lösung gewählt. (vgl. [Gad-2005])

Einen vergleichbaren Ansatz zur Optimierung bestehender Routen bildet das sogenannte  $k$ -Opt-Verfahren. In dieser Heuristik werden häufig ( $k=2$ ) Kanten (Verbindung zwischen zwei Wegpunkten) einer Route vertauscht, um zu überprüfen, ob sich die Distanz einer Route minimieren lässt (vgl. Abb. 2-7). Nach jedem Tausch wird überprüft, ob die Gesamtwegstrecke der Tour minimiert werden konnte. Falls ja, wird die neue Route als Basis genommen und es werden erneut zwei Kanten vertauscht. Diese beiden Schritte werden so lange wiederholt, bis keine weiteren Verbesserungen erzielt werden oder alle Alternativen geprüft wurden (vgl. [Lin-1965, S. 2245 ff.; Pro-2016, S. 411]). Im Vergleich zum lokalen Suchverfahren nach *Gademann und van de Velde* wird beim  $k$ -Opt-Verfahren der Lösungsraum nicht vollständig berücksichtigt. Daher ist hier eine Konstruktionsheuristik zu wählen, die bereits eine adäquate Lösung liefert (bspw. die Nearest-Neighbour-Heuristik).

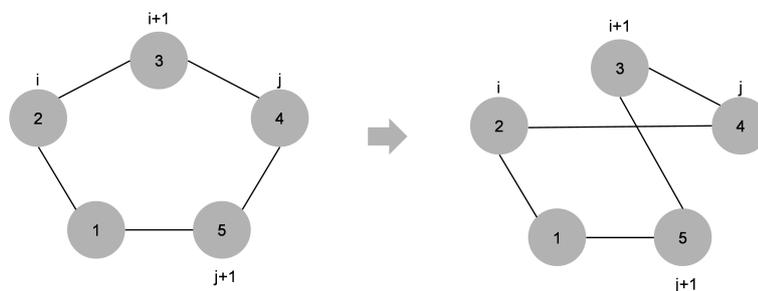


Abbildung 2-7: Beispielhafte Darstellung des 2-Opt-Verfahrens. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Dom-2015, S. 147]

## 2.4.6 Routing

Das Routing beschreibt die Bewegungsabfolge des Kommissionierers durch das Kommissioniersystem, sodass die Reihenfolge der zu bearbeitenden Aufträge innerhalb einer Tour bestimmt werden können. Voraussetzung dafür ist eine Vorauswahl an Aufträgen. Die Reihenfolge zur Entnahme kann daher als TSP beschrieben werden (vgl. [Hom-2011, S. 95]). *Ten Hompel et al.* sehen in den exakten Methoden zur Lösung des TSP die Herausforderung, dass bei großen Kommissioniertouren ein hoher Rechenaufwand notwendig ist,

der im industriellen Alltag nur schwer zu bewältigen ist<sup>7</sup> (vgl. [Hom-2011, S. 95]). Deshalb werden wie zuvor beim Auftragsbatching Heuristiken empfohlen, die zwar keine optimale, allerdings eine schnelle Lösung garantieren. In der Literatur werden dazu vier wesentliche Heuristiken beschrieben (vgl. [Hom-2011, S. 95; Gud-2012a, S. 759]):

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

Die Schleifenstrategie (engl. S-shape) unterscheidet sich von allen anderen Strategien dadurch, dass der Kommissionierer die Gasse hier stets von einer Seite betritt und über die andere Seite verlässt. Dies setzt im Layout einen Quer- oder Kopfgang voraus. Der Vorteil liegt dabei in der einfachen Handhabung, wodurch insbesondere neues Personal effizient angelernt werden kann. Der Nachteil ist, dass zusätzliche Wegstrecken überwunden werden müssen, um eine Gasse wieder zu verlassen (vgl. [Hom-2011, S. 95 f.; Gud-2012a, S. 759]). In Kommissioniersystemen mit sehr schmalen Gängen, in denen weder überholt noch gewendet werden kann, ist die Schleifenstrategie die einzige Möglichkeit. Allerdings wird in der Theorie noch unterschieden, ob einzelne Gassen übersprungen werden können. Werden Gassen nicht übersprungen, bedeutet dies, dass der Kommissionierer durch jede Gasse des Systems läuft, auch wenn er dort keine Artikel zu picken hat. Dies verstärkt die Einfachheit des Routings, erhöht jedoch zusätzlich die Wegstrecke. Wird ein Überspringen ermöglicht, sollten die Gassen jedoch in beide Richtungen durchfahrbar sein (vgl. [Hom-2011, S. 96]).

Bei der Stichgangstrategie (engl. Return) wird die Gasse von derselben Seite betreten und verlassen. Dies kann u. a. nötig sein, wenn das System über keinen Kopf- oder Quergang verfügt. Im Rahmen dieser Strategie wird die Gangwiederholung als Unterscheidungsmerkmal herangezogen. Ist eine Gangwiederholung notwendig, liegt das häufig daran, dass die Gänge so schmal sind, dass ein Wenden mit einem Kommissionierwagen nicht möglich ist. Dies führt dazu, dass der Kommissionierer den Gang mehrfach betreten muss, da er seinen Kommissionierwagen im Kopf- oder Quergang zurücklassen muss. (vgl. [Hom-2011, S. 97; Gud-2012a, S. 759])

Mögliche Erweiterungen der Stichgangstrategie bilden die Mittelpunkt- und die Largest-Gap-Heuristik (engl. Midpoint und Largest Gap), die jedoch ein beidseitiges Betreten der Lagergasse erfordern. Bei der Mittelpunkt-Heuristik werden die jeweiligen Kommissioniergassen stets bis zur Mitte betreten und alle Aufträge, die auf diesem Weg liegen, eingesammelt. Auf dem Rückweg wird auf der Rückseite analog vorgegangen, sodass die äußersten

---

<sup>7</sup> Bei  $n$  unterschiedlichen Pickpositionen pro Tour resultieren  $n!$  unterschiedliche Varianten der Route. Bei  $n = 10$  sind es über 3,6 Millionen Alternativen.

Gassen stets komplett durchlaufen werden und alle übrigen jeweils maximal bis zur Mitte (vgl. Abb. 2-8). Die Largest-Gap-Heuristik betrachtet stets den nächsten Entnahmeort innerhalb einer Gasse und überprüft, ob es kürzer ist, wenn der Artikel noch aus der aktuellen Richtung kommend oder besser von der jeweils anderen Seite gepickt wird. (vgl. [Hom-2011, S. 98])

In der Fachliteratur werden häufig zwei weitere Standardstrategien betrachtet: die kombinierte (engl. Combined) und die optimale Strategie (engl. Optimal) (vgl. [Roo-2001, S. 34; Kos-2007, S. 19]). Die kombinierte Strategie berücksichtigt alle zuvor genannten Heuristiken und versucht dadurch die notwendige Wegstrecke zu reduzieren. Die optimale Route verknüpft alle Heuristiken, um die Wegstrecke abermals zu reduzieren, wobei einzelne Wegstrecken auch doppelt zurückgelegt werden können (vgl. [Roo-2001, S. 35]) (vgl. Abb. 2-8).

Die zuvor beschriebenen Metaheuristik (vgl. Unterabschnitt 2.4.5) können für die Entwicklung einer optimalen Route herangezogen werden. Insbesondere das optimale Routing kann als Ergebnis einer Metaheuristik im Batching erachtet werden. Wie bspw. beim *k-Opt-Verfahren* wird eine nahezu ideale Reihenfolge bestimmt, wodurch die Bewegung des Kommissionierers bereits vorbestimmt ist.

Die Entwicklung und Untersuchung von Routing-Strategien hat sich in den letzten Jahrzehnten neben der Untersuchung des Auftragsbatchings zu der Fragestellung mit den meisten wissenschaftlichen Arbeiten entwickelt [Gil-2018, S. 15]. Die meisten bauen auf den zuvor genannten Verfahren auf, versuchen jedoch stets innovative Ansätze oder spezifische Sonderfälle der Kommissionierung einzubinden.

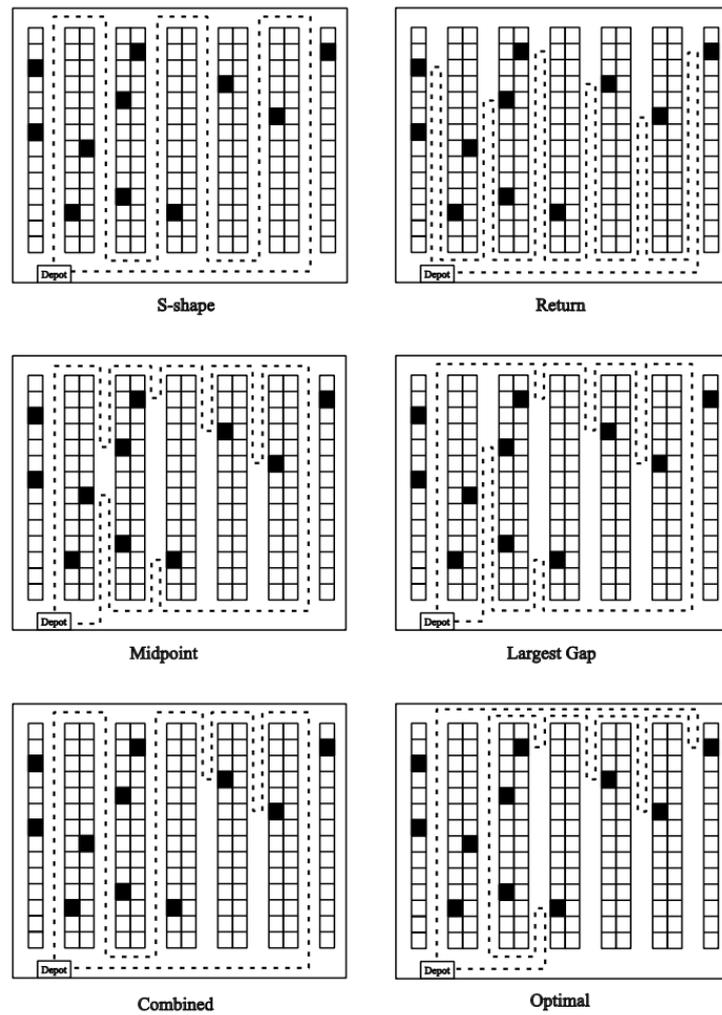


Abbildung 2-8: Beispielhafte Darstellung möglicher Routing-Strategien in der Kommissionierung [Roo-2001, S. 36]



## 3 Mobile Robotik in der Kommissionierung

---

In diesem Kapitel sollen mobile Roboter betrachtet und deren Einsatzmöglichkeiten innerhalb der Kommissionierung dargestellt werden. Zunächst wird in Abschnitt 3.1 ein einheitliches Verständnis von mobiler Robotik geschaffen. Dazu gehören u. a. eine geschichtliche Herleitung der Technologie sowie die Begriffsbestimmungen von Autonomie und Automatisierung, die im Umfeld der Robotik häufig synonym gehandhabt werden. Darauf aufbauend sollen in Abschnitt 3.2 die wesentlichen technischen Bestandteile eines mobilen Roboters vorgestellt werden. Im Anschluss wird die Rolle des Menschen in Robotiksystemen näher untersucht (vgl. Abschn. 3.3). Dabei sollen vor allem die verschiedenen Formen der Zusammenarbeit sowie die daraus resultierenden Interaktionen analysiert werden. Abschließend werden in Abschnitt 3.4 aktuelle Systembeispiele von mobilen Robotern in der Kommissionierung beschrieben und der wissenschaftliche Untersuchungsstand erläutert.

### 3.1 Begriffsdefinitionen im Bereich der mobilen Robotik

#### Roboter und Robotik

Der Begriff Roboter entspringt nicht einer wissenschaftlichen Erfindung des letzten Jahrhunderts, sondern einem tschechischen Theaterstück mit dem Titel „Rossum’s Universal Robots“ aus dem Jahre 1920, für das Karel Čapek das Wort „robot“ von „robota“ (tschechisch: „Zwangsarbeit“) ableitete. In dem Theaterstück geht es um ein Unternehmen, welches künstliche Menschen als Arbeiter (robots) entwickelt. Der russisch-amerikanische Science-Fiction-Autor Isaac Asimov führte anschließend 1942 in einem seiner Romane den Begriff „robotics“ ein (vgl. [Neh-2002, S. 7]). Heute werden Roboter verschiedener Arten sowohl im industriellen als auch im privaten Umfeld, in der Medizin, beim Militär, in der Pflege, in Produktionssystemen, im öffentlichen Raum und auch im privaten Bereich vielfältig eingesetzt (vgl. [Hau-2013, S. 7]). Durch den vielfältigen Einsatz lässt sich folgende Definition aufstellen:

*„Roboter sind multi-funktionale Manipulatoren (oder Vorrichtungen), deren Programm verändert werden kann. Sie sind in der Lage, Materialien, Bauteile, Werkzeuge oder Spezialgeräte in variablen programmierten Abläufen so zu bewegen, daß [sic!] eine Vielfalt von verschiedenen Aufgaben ausgeführt wird“*  
[Neh-2002, S. 8].

Die Robotik wiederum ist

*„[...] ein interdisziplinäres Wissensgebiet, das sich umfassend mit der Realisierung und Anwendung von Robotersystemen beschäftigt“ [Sta-2009, S. 18].*

### **Mobile Robotik, AGV und AMR**

Mobile Robotersysteme unterscheiden sich von den stationären Systemen darin, dass

*„[...] sie ihren Standort durch Lokomotion, sozusagen aus eigener Kraft, verändern können“ [Hau-2013, S. 18].*

Ein in der Industrie häufig vorkommender mobile Roboter ist das Automated Guided Vehicle (AGV). Das Fahrzeug übernimmt auf definierten Routen eigenständig Transportaufgaben, ist dabei jedoch in seiner Flexibilität und Entscheidungsfähigkeit sehr eingeschränkt. Um diesen Einschränkungen entgegenzuwirken, hat sich eine zweite Gruppe an mobilen Robotern entwickelt: die Autonomous Mobile Robots (AMR). Diese sind, im Gegensatz zu den AGV, in der Lage flexibel auf sich verändernde Umgebungsbedingungen zu reagieren und selbstständig, ohne Unterstützung durch den Menschen, Entscheidungen zu treffen (vgl. [Fra-2021, S. 405]). Im weiteren Verlauf der Arbeit ist bei der Verwendung des Begriffs Roboter stets ein AMR gemeint.

### **Automatisierung und Autonomie**

Im Zuge der technologischen Weiterentwicklung mobiler Roboter wird zwischen automatisierten und autonomen Systemen differenziert [Fra-2021, S. 406]. Die Automatisierung ist die

*„[...] Delegation von Tätigkeiten an Maschinen, die in der Lage sind, diese selbstständig auszuführen. Prinzipielles Ziel von Automatisierung ist es, einen Prozess ohne menschliche Handlungen ablaufen zu lassen“ [Hess-2019, S. 235].*

Die Schwachstelle von automatisierten Systemen liegt darin, dass sie bei sich verändernden Rahmenbedingungen, wie notwendigen Abweichungen von einer definierten Route, ihren Prozess nicht fortsetzen können. Dies erfordert schließlich doch ein Eingreifen des Menschen (vgl. [Neh-2002, S. 9]). Dem gegenüber steht die Autonomie. Der Begriff der Autonomie kann je nach Fachrichtung unterschiedlich ausgelegt werden. Üblicherweise werden damit Eigenschaften wie Unabhängigkeit, Selbstständigkeit oder Selbstbestimmtheit verbunden, wobei bei einer technischen Autonomie vor allem die ersten beiden Eigenschaften im Vordergrund stehen und bei menschlicher Autonomie die beiden letzteren (vgl. [Got-2019, S. 238]). Mit Blick auf das Eingreifen des Menschen in autonomen Systemen kann folgendes festgestellt werden:

„Mit zunehmender Autonomie nimmt typischerweise die Häufigkeit und Dauer von Benutzerinterventionen ab und verändert sich die Art der Benutzerinteraktion; sie wird globaler, abstrakter und höherwertiger“ [Got-2019, S. 239].

Nehmzow sieht in den klassischen AGV eine eher schwache Autonomie, die den Fahrzeugen erlaubt, sich dank einer eingebauten Steuerung und Energieversorgung selbstständig zu bewegen, aber die in ihrer Entscheidungsfreiheit eingeschränkt sind<sup>8</sup>. Um auf unvorhersehbare Ereignisse reagieren zu können, benötigt ein AMR eigene Inferenzprozesse (starke Autonomie), die im Gegensatz zu festgelegten Anweisungssequenzen den Handlungsbedarf flexibel selbst bestimmen können. Der AMR ist damit in der Lage, auf sich verändernde Umweltbedingungen zu reagieren, aus Erfahrungen zu lernen sowie ein eigenes Weltbild zu entwickeln, welches für Inferenzprozesse, wie die Navigation, herangezogen werden kann (vgl. [Neh-2002, S. 9]). Fottner *et al.* konkretisieren die Autonomie von intralogistischen Systemen wie folgt:

„Autonomous intralogistics systems enable self-contained, decentralized planning, execution, control, and optimization of internal material and information flows through cooperation and interaction with other systems and with humans“ [Fot-2021, S. 3].

Die Flexibilität und Entscheidungsfreiheit eines Roboters werden unmittelbar durch den Aufbau und die verfügbaren technischen Komponenten beeinflusst. Dies wird im nachfolgenden Abschnitt näher beleuchtet.

## 3.2 Technische Komponenten

Unabhängig von ihrer spezifischen Gestaltung und dem Aufgabengebiet, können mobile Robotersysteme in folgende Subsysteme unterteilt werden (vgl. Abb. 3-1).

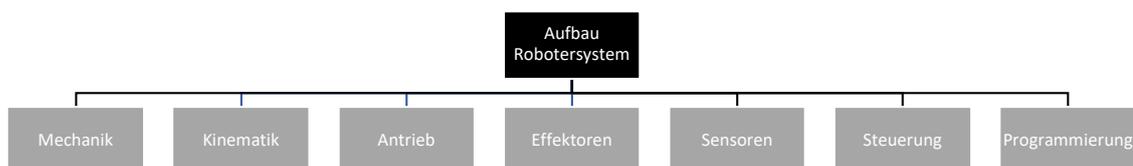


Abbildung 3-1: Einordnung der Bestandteile eines Robotersystems. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Hau-2013, S. 21]

Die Mechanik beschäftigt sich vorrangig mit der Positionierung und Orientierung des Roboters bzw. dem Abfahren einer Bewegungsbahn im dreidimensionalen Raum. Dies betrifft die Lokomotion oder mögliche Anbauteile, wie einen Greifer oder Manipulator [Hua-2015,

<sup>8</sup> Andere Arbeiten definieren diese Art der AGV nach wie vor als automatisierte Systeme (vgl. [Fra-2021, S. 406]).

S. 21]. Ein Fahrzeug weist meist drei Freiheitsgrade auf: Translation in der Ebene und Drehung um die eigene Achse (z-Achse) (vgl. [Hau-2013, S. 22]).

Die Kinematik beschreibt im Allgemeinen die Bewegung eines Punktes im Raum, wobei die Ursache der Bewegung vernachlässigt wird (vgl. [Gro-2012, S. 5]). Dabei spielen die Position, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und die Zeit die primären Rollen. Mittels eines Antriebs wird die benötigte Energie erzeugt, um das Fahrzeug oder die Anbauteile (Effektoren) zu bewegen (vgl. [Hau-2013, S. 23]). Effektoren übertragen dem Roboter die notwendigen Funktionalitäten. Üblich sind Greifer jeder Art, Bohrer oder Schweißgeräte (vgl. [Hau-2013, S. 24]). In der Logistik werden zudem Hubvorrichtungen oder Fördertechnik eingesetzt.

Um die gewünschten Funktionalitäten zu gewährleisten, bedarf es Sensoren, die sowohl den Effektor (bspw. Öffnungswinkel) als auch die Umwelt (Abstandsmessung) überwachen. Die verwendete Sensorik lässt sich wiederum in drei Kategorien unterteilen (vgl. [Hau-2013, S. 24]):

- interne Sensoren (Zustandsgrößen des Roboters)
- externe Sensoren (Eigenschaften der Umwelt)
- Oberflächensensoren (bspw. Tastsensoren)

Die Verarbeitung der Sensordaten für die übrigen Subsysteme übernimmt die Steuerung. Bei diesem Zusammenspiel von Hard- und Software können drei wesentliche Steuerungsarten festgestellt werden. Die Ablaufsteuerung hat die übergeordnete Kontrolle beim Gesamtablauf einer definierten Aufgabe, während die Bewegungssteuerung die Überwachung aller bewegungsrelevanten Prozesse und Abläufe übernimmt. Die Aktionssteuerung wiederum ist für die Kommunikation mit der technologischen Umwelt durch die eingesetzten Sensoren zuständig (vgl. [Hau-2013, S. 25]).

Um die Steuerung des Roboters und damit ein reproduzierbares Verhalten auf seiner Seite zu gewährleisten, wird eine Programmierung benötigt, die die entsprechenden Befehle formuliert (vgl. [Hau-2013]). Grundsätzlich lassen sich alle gängigen Programmiersprachen nutzen, allerdings haben sich in den letzten Jahren vor allem *Robot Operating System* (ROS) sowie *Isaac* des Herstellers NVIDIA etabliert.

### 3.3 Interaktionen mit dem Menschen

Im ursprünglichen Anwendungsfall des Roboters diente der Mensch lediglich als Entwickler und Programmierer (vgl. [Spa-2019, S. 169]). Im Zuge der Weiterentwicklung vor allem beim Einsatz von mobilen Robotiklösungen trat die Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) als Forschungsschwerpunkt in den Vordergrund. Dies führte dazu, dass eine Vielzahl an Arbeiten das Thema MRI aufgriff und geeignete Klassifizierungsmerkmale verschiedener

Interaktionsformen entwickelt wurden<sup>9</sup> (vgl. [Spa-2019, S. 169]). In der hier durchgeführten Untersuchung soll die Klassifizierung nach *Onnasch et al.* herangezogen werden (vgl. [Onn-2016]), in der Kriterien zur Beschreibung der *Interaktions-*, der *Roboter-* sowie der *Teamklassifikation* entwickelt werden (vgl. Abbildung 3-2).

Interaktionsrolle des Menschen	Einsatzgebiet des Roboters	Aufgabe des Roboters	Kommunikationskanal	Zusammensetzung
Nicht-Beteiligter Supervisor Operator Kooperateur Kollaborateur	Industrie Kommerzieller Service Persönlicher Service	Informationsaustausch Präzision Entlastung Transport Manipulation	Akustisch Elektronisch Haptisch Mechanisch Taktile Visuell	$N_M = N_R$ $N_M > N_R$ $N_M < N_R$
Interaktionsform	Autonomiegrad des Roboters	Morphologie des Roboters	Räumliche Nähe	Zeitliche Nähe
Koexistenz Kooperation Kollaboration	Aufnahme* Verarbeitung* Entscheidung* Ausführung* <i>*Einordnung von hoch bis niedrig</i>	Funktional Humanoid Zoomorph	Ferngesteuert Vermeidend Vorbeigehend Führend Annähernd Berührend	Asynchron Synchron

Abbildung 3-2: Kategorisierung der Mensch-Roboter-Interaktionen. Darstellung der Interaktions- (erste Spalte), der Roboter- (zweite und dritte Spalte) und der Teamklassifikation (vierte und fünfte Spalte) [Onn-2016]

Die *Interaktionsklassifikation* fokussiert dabei vor allem die Rollenverteilung von Mensch und Roboter und in welcher Form die beiden grundsätzlich zusammen agieren können. Bestandteil sind die Interaktionsformen und -rollen des Menschen mit dem Roboter. Hinsichtlich der Interaktionsformen unterscheiden *Onnasch et al.* zwischen Koexistenz, Kooperation und Kollaboration. Die Koexistenz geht von einem räumlichen Aufeinandertreffen von Mensch und Roboter aus. Im Rahmen dieser Interaktionsform verfolgen Mensch und Roboter kein gemeinsames Ziel. Ein Beispiel sind Transportroboter im Krankenhaus, die auf Besucher treffen. Dabei wird kein gemeinsames Ziel verfolgt, allerdings müssen Mensch und Roboter bei Begegnungen reagieren, um Kollisionen zu vermeiden. (vgl. [Onn-2016, S. 5])

Bei der Kooperation und der Kollaboration verfolgen Mensch und Roboter ein gemeinsames Ziel. Bei der Kooperation sind Mensch und Roboter in ihrem Arbeitsablauf nicht unmittelbar voneinander abhängig, da eine definierte Aufgabenteilung vorliegt. Beispielsweise übernimmt der Roboter nachgelagerte Verpackungsschritte, nachdem der Mensch Ware zur Station des Roboters transportiert hat. Die Kollaboration setzt eine direkte Zusammenarbeit voraus, bei der neben der übergeordneten Zielstellung auch gemeinsame Subziele verfolgt und ausgeführt werden. Exemplarisch dafür sind kleinere Roboterarme, die dem Menschen bei sensiblen Montageschritten assistieren. (vgl. [Onn-2016, S. 5])

Die Interaktionsform von Mensch und Roboter wird maßgeblich durch die Interaktionsrolle des Menschen bestimmt. Bei einer Koexistenz ist der Mensch häufig nicht beteiligt. Im Rahmen der Kooperation und der Kollaboration hingegen ist der Mensch Kooperateur oder Kol-

<sup>9</sup> Arbeiten zur Klassifizierung sind u. a. [Spa-2019; Sch-2002; Sch-2015; Onn-2016; Onn-2021; Yan-2002; Yan-2004].

laborateur. Übrig bleiben die Rollen des Supervisors und des Operators. Der Supervisor überwacht den Roboter und übergibt ihm Aufgaben, während der Operator den Roboter steuert und kontrolliert, beispielsweise durch Remote-Steuerung. (vgl. [Onn-2016, S. 6])

Die zweite Gruppe betrifft die *Roboterklassifikation*, die das Einsatzgebiet des Roboters, dessen Aufgaben sowie den Autonomiegrad und die Morphologie beschreibt. Gemäß *Onnash et al.* kann das Einsatzgebiet des Roboters in drei Bereiche unterteilt werden: Industrie, kommerzieller Service und persönlicher Service. Ein kommerzieller Service-Roboter kann beispielsweise Besucher in einem Museum informieren, wohingegen der persönliche Service-Roboter im privaten Umfeld, bspw. als Staubsaugroboter oder zur Gartenpflege, eingesetzt wird. Eine weitere Roboterklassifikation beschreibt den Autonomiegrad des Roboters. Dazu werden die Funktionen Aufnahme, Verarbeitung, Entscheidung und Ausführung in eine niedrige bis hohe Ausprägung eingestuft. Je höher das jeweilige Level ist, desto seltener ist das Eingreifen des Menschen notwendig. (vgl. [Onn-2016, S. 7 f.] )

Dem Roboter können unterschiedliche Aufgaben übertragen werden. Beispielsweise kann er Informationen übermitteln, die für den Menschen nicht oder nur schwer zu erreichen oder zu erkennen sind. Des Weiteren kann er für Arbeiten genutzt werden, die wiederkehrende Präzision erfordern (wie Schweißroboter in der Automobilproduktion). Dabei kann der Roboter durch seine Tätigkeiten den Menschen entlasten (monotone oder körperlich schwere Arbeit), beispielsweise indem er Bauteile innerhalb eines Produktionsablaufs transportiert. Eine andere Aufgabe kann die Manipulation von Objekten sein (Kommissionieren oder Stapeln von Gütern). (vgl. [Onn-2016, S. 7])

Die Morphologie beschreibt die äußere Erscheinung des Roboters (vgl. Abb. 3-3). Diese kann humanoid sein, was bedeutet, dass der Roboter in seinem Erscheinungsbild einem menschlichen Wesen ähnelt. Funktional ist er gestaltet, wenn seine eigentliche Funktion im Vordergrund steht und keine besondere Assoziation mit einem Lebewesen geweckt werden soll. Von Zoomorphie wird gesprochen, wenn der Roboter einem Tier ähnelt. (vgl. [Onn-2016, S. 8])



Abbildung 3-3: Morphologie von Robotern; links: humanoid [Bos-2021a], Mitte: funktional [Mag-2018], rechts: zoomorph [Bos-2021b]

Die dritte Klassifikation ist die *Teamklassifikation*, die den Aufbau und die Art der Zusammenarbeit von Menschen und Roboter näher beschreibt. Dazu wird zunächst die Art der

Kommunikation, die zwischen Mensch und Robotern herrscht, definiert. Sie kann auf elektronische, mechanische, akustische, optische oder visuelle Weise erfolgen und hängt vor allem von der Gestaltung des Roboters und seinem Einsatzzweck ab. Hinzu kommt die räumliche Nähe. *Onnasch et al.* definieren dazu insgesamt sechs Alternativen. Zunächst kann der Roboter durch den Menschen ferngesteuert werden, wodurch eine räumliche Nähe zwar nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann, allerdings von unterschiedlichen Arbeitsbereichen ausgegangen wird. Der Zustand Vermeidend trifft zu, wenn Mensch und Roboter nicht in unmittelbarer Nähe zusammenarbeiten und der Mensch den Arbeitsbereich des Roboters meidet. Vorbeigehend liegt vor, wenn beide Arbeitsbereiche sich überschneiden können, eine Berührung untereinander aber vermieden wird (bspw. automatisierter Warentransport durch AMRs). Führend bedeutet, dass Roboter und Mensch über einen längeren Zeitraum einen physischen Kontakt ausüben. Dies wird durch externe Schnittstellen oder über gemeinsam gehandhabte Teile realisiert. Annäherend liegt vor, wenn sich Roboter und Mensch durchgehend einen Arbeitsbereich teilen, allerdings ohne direkten physischen Kontakt. Bei Berührend liegt dieser Kontakt eben vor. (vgl. [Onn-2016, S. 9])

Die Zusammensetzung der Teams kann sowohl ausgeglichen als auch durch einen zahlenmäßigen Überhang von Menschen oder Robotern geprägt sein. Darüber hinaus unterliegt die MRI einer zeitlichen Komponente. Diese kann entweder synchron oder asynchron sein, das heißt, Mensch und Roboter arbeiten entweder zur gleichen Zeit oder zu getrennten Zeiten, wobei bei asynchronen Zeiten grundsätzlich keine Interaktionen auftreten. (vgl. [Onn-2016, S. 10])

### 3.4 Systemalternativen in der Kommissionierung

Durch die technische Weiterentwicklung von industriell einsetzbaren Robotersystemen steigen auch deren Einsatzmöglichkeiten in der Kommissionierung. Dabei kann zwischen einer reinen Transportfunktion sowie der Fähigkeit, eigenständig Artikel zu greifen (Pickfunktion), unterschieden werden. In der Wissenschaft werden in der Kommissionierung eingesetzte mobile Roboter in drei Kategorien unterteilt (vgl. [Aza-2019]). Das erste Konzept sind die *Robotic Mobile Fulfillment Systems* oder *Robotic Mobile Fulfillment Center* (RMFC). Bei diesem System übernehmen die AGV lediglich eine Transportfunktion, indem sie einzelne Regale zu Kommissionierstationen liefern und der Mensch daraus die benötigten Artikel entnimmt<sup>10</sup> (vgl. [Aza-2019, S. 932 ff.]). Ein weiteres Konzept sind die *Pick Support AGV* (PSA), die den Menschen auf der Kommissioniertour begleiten und als automatisierte Kommissionierwagen agieren. Der Mensch übernimmt auch hier das Picken von Artikeln (vgl.

---

<sup>10</sup> Entsprechend der eigenen Definition aus Abschnitt 3.1 werden für RMFC AGV genutzt. Da lediglich AMR im Rahmen dieser Arbeit als Roboter bezeichnet werden, soll nachfolgend AGV als Begriff verwendet werden, auch wenn in der Literatur meist von Robotern gesprochen wird.

[Aza-2019, S. 938]). Die dritte Gruppe, die *Mobile Picking Robots* (MPR), entnehmen unabhängig vom Menschen Artikel aus einem Regal und können somit den gesamten Kommissionierprozess übernehmen (vgl. [Aza-2019, S. 938]). Die Abbildung 3-4 zeigt Beispiele von mobilen Robotern in den verschiedenen Anwendungen, bevor diese in den nachfolgenden Unterabschnitten näher beschrieben werden.



Abbildung 3-4: Mobile Roboter in der Kommissionierung; links: RMFC [Swi-o.J.], Mitte: PSA [Geb-o.J.], rechts: MPR [Mag-2019]

### 3.4.1 Robotic Mobile Fulfillment Center

Ein RMFC wurde in der Wissenschaft erstmalig 2008 durch *Andrea und Wurmman* und *Wurmman et al.* vorgestellt. Es wurde zunächst Kiva Mobile Fulfillment System genannt, da sich Kiva als erstes Unternehmen mit diesem Konzept befasste. In der Grundform repräsentiert ein RMFC eine WzP-Kommissionierung, nur liegt die Ware in diesem Fall nicht in einem AKL und wird auch nicht über Fördertechnik an den jeweiligen Arbeitsplatz transportiert, sondern befindet sich in Fachbodenregalen, welche mittels einer AGV-Flotte an den Bedarfsort transportiert werden. Die Arbeitsbereiche von Mensch (Kommissionierung) und Roboter (Lager) sind strikt getrennt, sodass die Regale für einen hohen Flächennutzungsgrad möglichst eng beieinander gelagert werden können. Nachdem das Regal an den jeweiligen Arbeitsplatz des Menschen transportiert wurde, entnimmt dieser die gewünschten Artikel, worauf das AGV die Regaleinheit zurück in den Lagerbereich transportiert (vgl. [And-2008; Wur-2008]). Abbildung 3-5 zeigt ein beispielhaftes Layout.

Im linken Teil des Layouts ist der Bereich zu sehen, in dem die Kommissionierer arbeiten. Jeder Mitarbeiter hat dort einen Arbeitsplatz, an dem er aus den bereitgestellten Fachbodenregalen die geforderten Artikel entnimmt. Um die Verkehrsflächen von etwaigen Rückstaus einzelner AGV zu entlasten, befindet sich um den Arbeitsplatz herum eine separate Zu- und Abführung, die bei einem hohen Aufkommen als Warteschlange fungieren kann (vgl. [Wur-2008, S. 13]). Die dargestellten Arbeitsplätze ähneln dabei denen in der klassischen WzP-Kommissionierung.

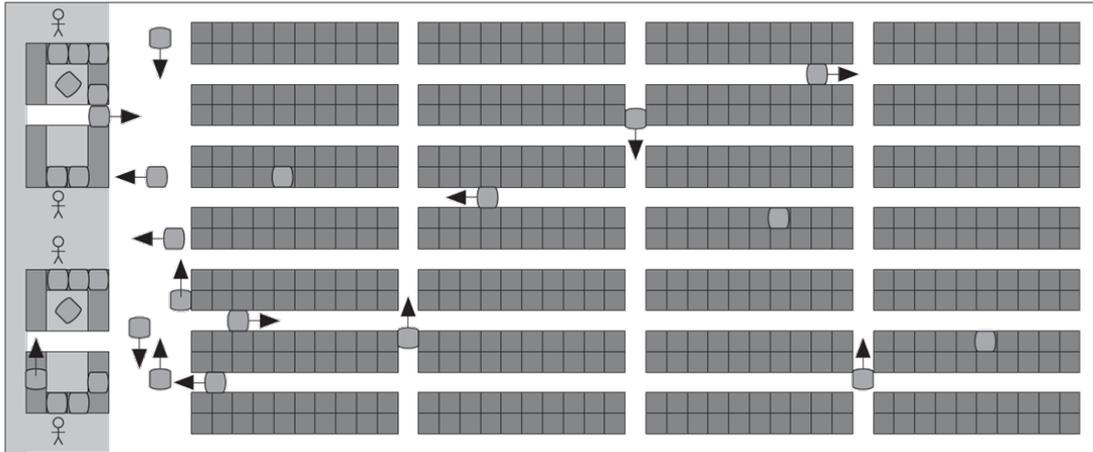


Abbildung 3-5: Beispielhaftes Layout eines RMFC [Wur-2008]

Der übrige Bereich wird ausschließlich von den AGV genutzt. Die dunklen Quadrate bilden dabei die Fachbodenregale, die aktuell nicht in Verwendung sind. Die hellen Ovale sind die AGV, die sich sowohl in den Gassen als auch unbeladen unterhalb der Fachbodenregale bewegen können. Damit entsteht eine größere Bewegungsfläche, wodurch weniger Blockierungen auftreten und mehr AGV eingesetzt werden können, als wenn eine Bewegung ausschließlich innerhalb der Gassen möglich wäre. (vgl. [Wur-2008, S. 13])

Die Kommissionierleistung eines RMFC hängt maßgeblich von der Verfügbarkeit der AGV an den Arbeitsplätzen ab. *Wurmann et al.* gehen in dem von ihnen vorgestellten System davon aus, dass die Wechselzeit zweier Roboter an den Arbeitsplätzen sechs Sekunden beträgt. Dadurch kann eine theoretische Kommissionierleistung von 600 Picks pro Stunde erreicht werden, die bei einem mehrfachen Zugriff auf ein Fachbodenregal noch gesteigert werden kann. (vgl. [Wur-2008, S. 13])

Die Aufmerksamkeit von Industrie und Wissenschaft für RMFC nahm durch den Kauf von Kiva Systems durch den Versandhändler Amazon deutlich zu (vgl. [Han-2012]). Wurde zunächst vornehmlich über und durch die Gründer und Entwickler von Kiva Systems veröffentlicht (vgl. [Gui-2008; And-2008; Wur-2008]), ist die Entwicklung von RMFC in den letzten fünf Jahren auch verstärkt durch Forschungsinstitute vorangetrieben worden. Da Amazon RMFC nur im eigenen Unternehmen implementiert, haben sich mittlerweile einige Konkurrenzprodukte<sup>11</sup> am Markt etabliert.

Der Fokus einzelner Arbeiten variiert dabei ähnlich wie bei Untersuchungen zu manuellen Kommissioniersystemen. In der Literatur finden sich Arbeiten, die durch verschiedene, eigens entwickelte Methoden und Ansätze die Dimensionierung eines RMFC bestimmen. Hervorzuheben ist hier die Arbeit von *Lamballais et al.*, die dazu ein analytisches Warteschlangenmodell entwickelt haben. Neben der Leistungsberechnung untersuchen sie,

<sup>11</sup> Im europäischen Raum sind es Unternehmen wie Swisslog, Grenzebach oder Scallog, die vergleichbare Systeme anbieten.

welchen Effekt die Layoutstruktur (Verhältnis von Länge zu Breite und Depot-Position) auf die Gesamtleistung des Systems hat. Es werden vier Systemvarianten berücksichtigt. Einerseits werden Kundenaufträge mit einer oder mehreren Positionen angenommen, zum anderen werden für das Lagerlayout eine freie Zonierung oder eine definierte Einteilung nach Umschlagshäufigkeit vorgenommen. Die Autoren konnten zeigen, dass das Länge-Breite-Verhältnis des Layouts keinen großen Einfluss hat, so lange es nicht den Wert 3 übersteigt. Eine Zonierung nach Umschlagshäufigkeit kann den Durchsatz um bis zu 50 Prozent erhöhen. Hinsichtlich der Positionen der Depots kann festgestellt werden, dass bei einer ABC-Zonierung eine höhere Leistung erzielt wird, wenn die Depots links und rechts des Layouts positioniert sind. Liegt keine Zonierung vor, sollten die Depots im Norden oder Süden angeordnet werden, da so die mittlere Wegstrecke eines Roboters minimiert werden kann (vgl. [Lam-2017]). Einen ähnlichen analytischen Ansatz verfolgen *Wang et al.* sowie *Yuan und Gong* [Wan-2020; Yua-2017]. Einen simulativen Ansatz zur Dimensionierung durch ein zeitenfensterbasiertes Routing wählt *Lienert* in seinen Arbeiten (vgl. [Lie-2018; Lie-2019; Lie-2021]).

Neben der Dimensionierung eines RMFC untersuchen viele Arbeiten einzelne Steuerungsstrategien. Insbesondere die Optimierung von Kommissionieraufträgen und ihre Einlastung in das System sind häufige Untersuchungsgegenstände. Im Mittelpunkt steht häufig die Erreichung einer geforderten Leistung bei einem minimalen Einsatz von AGV. Dazu haben *Boysen et al.* eine Untersuchung vorgenommen. Sie zeigen, dass durch eine optimierte Auftragssequenzierung die AGV-Flotte um bis zu 50 Prozent reduziert werden kann. Des Weiteren kann eine optimierte Lagerbelegung die Anzahl an AGV weiter reduzieren. Die Autoren stellen fest, dass der Bestand an Produkten möglichst über alle verfügbaren Regale verteilt werden sollte. Besonders Artikel des gleichen Typs sollten nicht in einem Regal mehrfach vorgehalten werden, da insbesondere bei Kundenaufträgen mit nur wenigen Positionen, wie sie im Endkundengeschäft häufig vorkommen, die Wahrscheinlichkeit abnimmt, den Auftrag mit nur einer Andienung eines Regals abzuschließen (vgl. [Boy-2017]). Weitere Ansätze zur Auftragsoptimierung sind in [Gon-2020; Val-2021; Xie-2021] zu finden.

Ähnlich wie die Optimierung von Kommissionieraufträgen, sind Strategien zur Lagerbelegung ein häufiger Untersuchungsgegenstand wissenschaftlicher Arbeiten. Einen ersten Ansatz liefern *Roy et al.*, die nicht die Belegung einzelner Regale mit Artikeln untersuchen, sondern die Platzierung der jeweiligen Regale im Gesamtsystem. Durch analytische Warteschlangenmodelle konnten sie zeigen, dass bei einem Pooling-Verfahren<sup>12</sup> die Durchlaufzeit der Kommissionierung bis zu einem Drittel reduziert werden kann. Außerdem wird eine mögliche Zonierung untersucht, bei der mehrfach vorhandene Artikel auf mehrere Zonen verteilt werden, um Aufträge mit gleichen Artikeln parallel zu bearbeiten. Hierbei ging man der Frage nach, ob es sinnvoll ist, dass die Wahl des Regals und der entsprechenden Zone

---

<sup>12</sup>Im Pooling-Verfahren wird eine AGV-Flotte sowohl für die Kommissionierung als auch die Nachschubversorgung verwendet.

auf Grundlage der aktuellen Auslastung an Robotern in diesem Bereich erfolgt. Im Zuge der Untersuchungen kann genau dies bestätigt werden. (vgl. [Roy-2019])

*Lamballais et al.* untersuchen, welchen Einfluss die Bevorratung eines gleichen Artikeltyps verteilt auf mehrere Fachbodenregale haben kann. Im Rahmen ihrer Untersuchungen verteilen sie Artikel auf ein bis sechs Regale. Des Weiteren untersuchen sie eine optimale Nachfüllstrategie der einzelnen Behälter. Entweder werden die Behälter nach jedem Pickprozess, bei Unterschreitung des Bestands von 50 Prozent oder bei einem Bestand von null mit neuen Artikeln befüllt. Durch die Entwicklung eines analytischen Warteschlangenmodells konnten sie zeigen, dass bereits bei zwei Behältern im System die durchschnittliche Durchlaufzeit eines Auftrags um nahezu 50 Prozent reduziert werden kann. Einen erheblichen Einfluss der Nachfüllstrategie kann nur im Ein-Behälter-System festgestellt werden. Die dortige Durchlaufzeit kann auf ein Drittel reduziert werden, wenn die Behälter bereits bei einem Bestand von 50 Prozent neu befüllt werden und nicht erst bei einem Bestand von null Einheiten (vgl. [Lam-2020]). Weitere Untersuchungen hinsichtlich der Artikelbelegung können [Nig-2014; Yua-2016] entnommen werden.

Neben den bereits aufgeführten Forschungsschwerpunkten zur Dimensionierung, der Optimierung der Kommissionieraufträge oder der Lagerbelegung gibt es einzelne wissenschaftliche Arbeiten, die sich keinem der genannten Gebiete zuordnen lassen. So untersucht *Lienert et al.* den Umgang mit Fehlern beim Einsatz von mobilen Robotern und *Zou et al.* widmen sich unterschiedlichen Batterieladestrategien (vgl. [Lie-2019; Zou-2018]).

### 3.4.2 Pick Support AGV

Pick Support AGV (PSA) unterstützen den Menschen im Zuge des Kommissionierprozesses. In der Wissenschaft wurde diese Art der Kommissionierung erstmals durch *Azadeh et al.* und *Boysen et al.* erwähnt (vgl. [Aza-2019; Boy-2019]). Gegenüber den zuvor vorgestellten RMFC werden PSA in manuell betriebenen PzW-Systemen eingesetzt. Ihre wesentliche Unterstützungsleistung liegt vor allem im Transport der bereits gepickten Artikel, sodass der Mitarbeiter einen Kommissionierwagen ö. Ä. nicht eigenständig bewegen muss. Darüber hinaus entfällt im Zuge der Kommissioniertour der Rückweg zum Depot, um den fertigen Auftrag abzugeben und einen neuen vorzubereiten. Üblicherweise bekommt der Kommissionierer ein neues AGV zur Verfügung gestellt, sodass die Kommissionierung ohne Zeitverlust fortgesetzt werden kann. Dadurch können Wegstrecken reduziert werden und der Mitarbeiter kann sich auf seine wesentliche Tätigkeit – das Picken – konzentrieren (vgl. [Aza-2019; Boy-2019]). Obwohl die Industrie bereits eine Vielzahl an Systemen anbietet<sup>13</sup>, wurde dieses Konzept in der Wissenschaft bisher nur in wenigen Arbeiten untersucht.

---

<sup>13</sup>Beispielhafte Anbieter sind Gebhardt Fördertechnik, SSI-Schäfer oder Locus Robotics.

*Löffler et al.* waren die Ersten, die abseits einer Literaturrecherche das PSA-Konzept detaillierter betrachteten [Lof-2019]. In ihrer Arbeit liegt der Fokus auf dem Routing des Kommissionierers, welches durch analytische Ansätze optimiert wird. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz von PSA die Wegstrecke des Kommissionierers um bis zu 20 Prozent reduzieren kann. Dazu bedarf es jedoch exakter Lösungsverfahren. Heuristische Verfahren, wie beispielsweise die Schleifenstrategie, reduzieren die Wegstrecke nur bedingt. Hinsichtlich der AGV-Flotte empfehlen die Autoren ein Pooling-Konzept, so dass im Schnitt 1,5 AGV je Mitarbeiter ausreichen (vgl. [Lof-2019]).

Aufbauend auf der oben genannten Arbeit haben sich *Žulj et al.* den Themengebieten Auftragsbatching und Auftragssequenzierung zugewendet, wobei einige Anpassungen vorgenommen wurden. Das Lager wird in verschiedene Zonen unterteilt, in denen jeweils ein Mitarbeiter tätig ist. Das AGV begleitet den Mitarbeiter nicht kontinuierlich, sondern wartet an definierten Übergabepunkten. An diesen übergibt der Mitarbeiter die jeweiligen Aufträge und geht anschließend zurück in seinen Kommissionierbereich, um den nächsten Batch zu kommissionieren. Es wird in der Studie mittels eines zweistufigen heuristischen Verfahren zunächst nach der optimalen Gruppierung einzelner Kundenaufträge zu Batches gesucht. Anschließend wird die Verteilung der Batches auf die einzelnen AGV sowie die Reihenfolge festgelegt, nach der diese Batches eingelastet werden. Dabei sollte die Termintreue, d. h. die Einhaltung von Cut-off-Zeiten, in denen der Kundenauftrag abgeschlossen sein muss, gewährleistet sein. Die Ergebnisse zeigen, dass mit steigender Größe des Lagers und einer geringeren Anzahl an verfügbaren AGV eine mögliche Steigerung der Durchschnittsgeschwindigkeit der AGV die Termintreue erhöht wird. Je kleiner das Lager und je größer die AGV-Flotte ist, desto geringer fällt die Durchschnittsgeschwindigkeit ins Gewicht. (vgl. [Zul-2022])

*Azadeh et al.* untersuchten, inwieweit die Zonierung des Systems eine Leistungssteigerung hervorrufen kann. Dabei wird das System im Vorfeld in mehrere Bereiche unterteilt und jedem Bereich mindestens ein Kommissionierer zugeordnet. Unter Berücksichtigung dieser Zonierung werden im Betriebsablauf Aufträge generiert und den einzelnen AGV zugeordnet. Es konnte gezeigt werden, dass die Zonierung vor allem bei kleineren Batches eine Leistungssteigerung hervorbringt. Umgekehrt empfehlen die Autoren keine Zonierung, wenn größere Aufträge auftreten. Sie sind sich jedoch auch bewusst, dass die Auftragsgrößen schwanken können, sodass die Auswahl eines geeigneten Ansatzes schwierig ist. In diesem Fall empfehlen sie einen dynamischen Ansatz. (vgl. [Aza-2020])

### **3.4.3 Mobile Picking Robots**

Im dritten Konzept übernehmen die Roboter nicht nur Transportfunktionen, sondern sind in der Lage, eigenständig Artikel und Aufträge zu kommissionieren. Dies hat zur Folge, dass

aus Gesamtsystemsicht je nach Verfügbarkeit und Bedarf sowohl Roboter als auch Menschen zur Kommissionierung eingesetzt werden können. Für dieses Verfahren hat sich der Begriff der *hybriden Kommissionierung* gefestigt (vgl. [Kau-2020a; Win-2021]). *Winkelhaus et al.* definieren die hybride Kommissionierung wie folgt:

„A HOPS [Hybrid Order Picking System] exists if autonomous systems and human order pickers work together on one shopfloor for a joint target“ [Win-2021, S. 13].

Damit lässt sich eine klare Abgrenzung zu den beiden vorangegangenen Konzepten erkennen. Im Fall der hybriden Kommissionierung handelt es sich um autonome Roboter, die im Rahmen einer Koexistenz gemeinsam mit dem Menschen in einem Kommissioniersystem arbeiten. Zu dem ist es notwendig, dass die eingesetzten Roboter, nach Definition von *Nehmzow*, eigene Inferenzprozesse besitzen, um auf Besonderheiten im Prozessablauf (bspw. Hindernisse, Routenänderung etc.) selbstständig reagieren zu können (vgl. [Neh-2002, S. 9]). Durch diese stark ausgeprägte Autonomie sowie aufgrund der Tatsache, dass in einem hybriden Kommissioniersystem der Mensch und der Roboter den jeweils anderen substituieren kann, bedarf es der Berücksichtigung der Planungsprobleme beider Agenten unter Einbeziehung ihrer Charakteristika. Als Agenten werden in einem hybriden Kommissioniersystem der Mensch und Roboter zusammenfassend bezeichnet (vgl. [Kau-2020a]). Da *Gudehus* bereits Kommissioniersysteme, die ausschließlich von Menschen betrieben werden, als hoch komplex in der Planung und Steuerung bezeichnet (vgl. [Gud-2012a, S. 707]), ist davon auszugehen, dass hybride Kommissioniersysteme noch stärker davon betroffen sind.

In der Wissenschaft werden die MPR vor allem in Literaturrecherchen als möglicher Einsatzbereich von mobilen Robotern vorgeschlagen (vgl. [Aza-2019; Fra-2021; Win-2021]). Sie heben zwar den Forschungsbedarf hervor, insbesondere in der Planung und Gestaltung solcher Systeme, betrachten dies jedoch nicht detaillierter. *Winkelhaus et al.* betonen die zwischen Mensch und Roboter auftretenden Interaktionen und referenzieren dazu erste Ansätze, die vor allem den Menschen dabei unterstützen sollen, bestmöglich mit dem Roboter zusammenzuarbeiten. Mögliche Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit werden jedoch nicht diskutiert (vgl. [Win-2021, S. 13]).

Eine erste umfassende Untersuchung von hybriden Kommissioniersystemen nahmen *Lee und Murray* vor. Als Grundlage dient das System der Firma Fetch Robotics, welches sich in zwei Subsysteme untergliedert. Zum einen wird ein Roboter eingesetzt, der die kommissionierten Artikel transportiert. Ein zweiter Roboter wird genutzt, der über die gleiche Basis verfügt, jedoch zusätzlich mit einem Greifarm ausgestattet ist, um die Artikel aus den Regalen zu entnehmen. Mit Hilfe eines analytischen Modells und durch das Lösen des VRP-Problems untersuchen die Autoren die Leistungsfähigkeit des Systems. Dabei wird sowohl ein ausschließlich mit Robotern betriebenes System betrachtet als auch eine

weitere Variante, in der jedoch der Mensch pickt und der Roboter die kommissionierten Artikel transportiert (vgl. [Lee-2019]). Damit wird deutlich, dass per Definition kein hybrides Kommissioniersystem berücksichtigt wurde, sondern lediglich ein PSA-System, ohne dabei näher auf die möglichen Interaktionen einzugehen.

Einen simulativen Ansatz zur Untersuchung eines hybriden Kommissioniersystems wählen *Zhang et al.* Ziel ihrer Untersuchungen ist es, für einen konkreten Anwendungsfall festzustellen, welche prozentuale Zusammensetzung aus Menschen und Robotern die geringsten Kosten pro Pick hervorruft (vgl. [Zha-2021a; Zha-2021b]). Aus den veröffentlichten Daten geht jedoch nicht hervor, wie detailliert die zwischen den Agenten auftretenden Interaktionen berücksichtigt oder modelliert werden. Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse muss davon ausgegangen werden, dass die Ausweich- und Wartevorgänge nur bedingt in das Modell integriert werden. Daher bleibt auch in dieser Arbeit ein wesentlicher Bestandteil der hybriden Kommissionierung unberücksichtigt.

Zusätzlich finden sich in der Wissenschaft einige Vorveröffentlichungen des Autors, die eine hybride Kommissionierung im Untersuchungsfokus haben. Dazu wird zunächst ein erstes Grobkonzept zur Modellierung und Untersuchung von hybriden Kommissionierung in [Kau-2019b] vorgestellt, welches in [Kau-2020b] konkretisiert wird. Das wesentliche Ergebnis beider Arbeiten ist das Aufzeigen der Planungskomplexität von hybriden Kommissioniersystemen sowie die Notwendigkeit der Berücksichtigung der auftretenden Interaktionen zwischen Mensch und Roboter. Darauf aufbauend erfolgt in [Kau-2020a] eine erste Dimensionierung, in der u. a. gezeigt werden konnte, dass bei Zunahme von Mensch und Roboter mit einer Reduzierung der Leistung zu rechnen ist. Das Ziel von [Kau-2021] ist die Entwicklung einer dynamischen Heuristik für das Routing der Roboter. Es konnte gezeigt werden, dass durch einen dynamischen Ansatz eine geringe Leistungssteigerung hervorgerufen werden kann, diese jedoch mit einem hohen Rechenaufwand verbunden ist, sodass die dynamische Heuristik für das Routing der Roboter in der weiteren Entwicklung nicht berücksichtigt wurde.

#### **3.4.4 Fazit zum Stand der Forschung**

Die drei vorangegangenen Unterabschnitte haben die wesentlichen Arbeiten der drei Systemalternativen in der Kommissionierung hervorgehoben. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die RMFC in der Literatur am umfangreichsten analysiert und diskutiert werden. Das Konzept der PSA wird ebenfalls aufgegriffen und im Rahmen einiger Arbeiten untersucht. Deutlich weniger Forschungsarbeiten lassen sich jedoch für die MPR identifizieren. Neben eigenen Forschungsarbeiten finden sich in der Literatur nur vereinzelt vergleichbare Untersuchungen. Die industrielle Umsetzung von MPR bekräftigt jedoch, dass wie schon bei den übrigen beiden Konzepten Untersuchungen notwendig sind, um Optimierungen feststellen zu können. Daher stellt sich die Frage, ob die aufgeführte Literatur zu RMFC und die daraus

entstandenen Erkenntnisse auf einen Einsatz von hybriden Kommissioniersystemen übertragen werden können. Dies lässt sich ausschließen, da sich in diesem Fall der Mensch und das AGV in getrennten Arbeitsbereichen aufhalten. Eine Interaktion zwischen Mensch und Roboter wird ausgeschlossen, wodurch wesentliche Charakteristika eines hybriden Kommissioniersystems nicht gegeben sind. Im Zuge der PSA ist der gemeinsame Arbeitsraum gegeben, allerdings verfolgen Roboter und Mensch verschiedene Ziele. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Planungsprobleme mit anderen Freiheitsgraden für Mensch und Roboter. Darüber hinaus schließen die bestehenden Arbeiten zu PSA Interaktionen zwischen Mensch und Roboter aus, sodass auch zu diesem Themengebiet keine Erkenntnisse vorliegen, die auf den Einsatz von MPR übertragen werden könnten.

Da mit Hilfe des Stands der Forschung zu den Systemen RMFC und PSA keine Untersuchung zu MPR vorgenommen werden kann, soll abschließend die Übertragung von bestehenden Ansätzen aus der manuellen PzW-Kommissionierung überprüft werden. Wie bereits in Abschnitt 2.4 näher beschrieben gibt es bereits eine Vielzahl an Untersuchungen zur Planung und zum Betrieb von manuellen Kommissioniersystemen. Auf Grundlage der aktuellen Erkenntnisse zu MPR ist davon auszugehen, dass ein Großteil dieser Planungsprobleme und Freiheitsgrade auf den Menschen in einem hybriden Kommissioniersystem anwendbar ist. Allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, dass dies ebenfalls auf den Roboter zutrifft, da sich dieser anders als der Mensch verhält.

In diesem Kapitel sollen der Forschungsbedarf und die weitere wissenschaftliche Vorgehensweise in dieser Arbeit beschrieben werden. Dazu wird in Abschnitt 3.5 der aktuelle Forschungsstand zu MPR in der manuellen Kommissionierung analysiert. Darauf aufbauend wird die Forschungslücke im Bereich MPR identifiziert und das geplante Vorgehen zu ihrer Schließung mit geeigneten Forschungsfragen untermauert. In Abschnitt 3.6 wird die Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen beschrieben.

### **3.5 Definition der Forschungslücke**

Die mobile Robotik hat im letzten Jahrzehnt vermehrt Einzug in das industrielle Umfeld gefunden. Insbesondere in manuellen und personalintensiven Bereichen wie der Logistik bietet die Automatisierung im Hinblick auf den zunehmenden Personalmangel und steigenden Kostendruck ein hohes Potenzial (vgl. [Hei-2021a; Hei-2021b; Kue-2019]). Eine Möglichkeit der Automatisierung sind MPR, die gemeinsam mit dem Menschen in einem hybriden Kommissioniersystem arbeiten. Der Forschungsbedarf liegt dabei einerseits bei der Optimierung des Greifprozesses, wobei ein möglichst breites Spektrum an Artikeln aus verschiedenen Positionen (Fachboden, Behälter etc.) gepickt werden soll. Andererseits ist nach wie vor eine Vielzahl an logistischen Fragestellungen ungeklärt, allen voran die Planung und Steuerung solcher hybriden Systeme.

Zu Beginn dieser Arbeit wurden bereits die Komplexität von klassischen manuellen Kommissioniersystemen sowie die unterschiedlichen Planungsprobleme bei deren Ausgestaltung hervorgehoben. Nun stellen hybride Kommissioniersysteme, in denen Mensch und Roboter gemeinsam kommissionieren, noch komplexere Anforderungen an die Gestaltung solcher Systeme, insbesondere weil nun zwei Agenten mit unterschiedlichen Charakteristika eingesetzt werden. So ist der Mensch im Vergleich zum Roboter flexibler und kann von Natur aus Herausforderungen (bspw. Hindernisse) frühzeitig erkennen und selbst Entscheidungen treffen. Der Roboter hingegen muss trotz einer ausgeprägten Autonomie heute noch aufgrund von Sicherheitsanforderungen deutlich restriktiver agieren. Gleichzeitig ist seine Fähigkeit zur Wahrnehmung der eigenen Umgebung nach wie vor beschränkt, was sich unmittelbar auf den möglichen Autonomiegrad und Entscheidungsfindung auswirkt. Die individuellen Fähigkeiten der Agenten müssen jedoch bei der Gestaltung von Systemen berücksichtigt werden. Aus Sicht der Planung bedarf es daher, wie *ten Hompel et al.* und *Gudehus* betonen, Erkenntnisse über die Auswirkung einzelner Planungsprobleme auf die Leistungsfähigkeit, damit ein entsprechendes System optimal gestaltet und betrieben werden kann (vgl. [Hom-2011; Gud-2012a]). In der wissenschaftlichen Literatur konnten im Hinblick auf die Planung und Steuerung von hybriden Kommissioniersystemen neben den eigenen Vorarbeiten des Autors aktuell nur drei weitere identifiziert werden (vgl. [Lee-2019; Zha-2021a; Zha-2021b]). In Unterabschnitt 3.4.3 wurden die Inhalte und Ziele dieser Arbeiten bereits näher beschrieben. *Lee und Murray* ziehen in ihrer Untersuchung zwar ein Robotersystem in Betracht, welches eine hybride Kommissionierung ermöglichen würde, jedoch wurde dieser Fall von ihnen nicht näher untersucht. Sie übertrugen dem Roboter in der hybriden Form lediglich Transportaufgaben, sodass der Mensch nach wie vor allein das Picken übernimmt. Darüber hinaus wurden innerhalb der homogenen Roboterflotte keine Interaktionen und daraus resultierende Leistungseinbußen berücksichtigt (vgl. [Lee-2019]). *Zhang et al.* untersuchten in ihren beiden Veröffentlichungen zwar ein hybrides System in der vorgesehenen Form, allerdings wurden von ihnen nur wenige Freiheitsgrade, wie die Anzahl an Agenten, variiert. Ein allgemeingültiges Framework zur Planung von hybriden Kommissioniersystemen kann die Arbeit nicht liefern. Die Autoren gehen darüber hinaus weder näher auf die Modellierung des Simulationsmodells ein, noch darauf, in welcher Form sie die Agenten und Interaktionen gestaltet haben (vgl. [Zha-2021a; Zha-2021b]).

Damit wird deutlich, dass es bereits erste wissenschaftliche Ansätze gibt, die sich mit der Planung und Steuerung von hybriden Kommissioniersystemen beschäftigen. Diese berücksichtigen jedoch nur einen Teil der Planungsprobleme und variieren diese im Rahmen ihrer Untersuchung (vgl. [Kau-2020a; Kau-2020b; Kau-2021; Zha-2021a; Zha-2021b]). Unklar bleiben dabei der Gesamteinfluss aller relevanten Planungsprobleme, deren Wechselwirkung und die jeweiligen Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit von Mensch und Roboter. Erst wenn dazu Erkenntnisse vorliegen, kann aus Sicht der Planung eine ganzheitliche Systemgestaltung erfolgen. Die Tabelle 3-1 fasst den aktuellen Stand der Forschung nochmals zusammen.

Tabelle 3-1: Übersicht über den Stand der Forschung zu hybriden Kommissioniersystemen

	Hybrider Systembetrieb		Berücksichtigung von Interaktionen		Untersuchung der Planungsprobleme							Untersuchungsmethode		Ableitung allgemeingültiger Strategien					
	Ja	Nein	Ja	Nein	Layout	Zonierung	Lagerbelegung	Batching	Routing	Agenten	A	K	K,S	S	S	S	Ja	Nein	
[Lee-2019]		x		x	x				x										x
[Kau-2019b]	x		x																x
[Kau-2020a]	x		x		x	x				x									x
[Kau-2020b]	x		x		x	x				x									x
[Kau-2021]	x		x		x			x		x									x
[Zha-2021a]	x		x					x											x
[Zha-2021b]	x		x					x		x									x

A: Analytisch, K: Konzept, S: Simulation

Der aufgezeigte Forschungsbedarf bildet die Grundlage dieser Arbeit und mündet in der Beantwortung folgender Forschungsfrage:

*Wie kann ein leistungsgerechter Einsatz von mobilen Kommissionierrobotern in der hybriden Kommissionierung erfolgen?*

Aus dieser Forschungsfrage lassen sich drei untergeordnete Forschungsfragen ableiten:

1. *Wie kann das Verhalten von Mensch und Roboter möglichst realitätsnah modelliert werden und eine Systemdimensionierung hinreichend genau erfolgen?*
2. *Wie wird die Leistungsfähigkeit von Mensch und Roboter durch die Planungsprobleme von Kommissioniersystemen beeinflusst?*
3. *Inwieweit können die Ergebnisse auf einen praktischen Einsatz übertragen werden und welche generellen Rahmenbedingungen lassen sich für einen industriellen Betrieb von mobilen Kommissionierrobotern definieren?*

### 3.6 Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen

Um die Forschungsfragen beantworten zu können, wird folgendes Vorgehen verfolgt (vgl. Abb. 3-6).

Schritt	Ziel	Relevanz
1 Kapitel 4	Konzeptionelle Entwicklung eines Modells mit allen wesentlichen Bestandteilen zur Untersuchung von hybriden Kommissioniersystemen	Forschungsfrage 1
2 Kapitel 5	Überführung des Konzeptmodells in ein ausführbares Simulationsmodell inkl. Verifikation und Validierung	Forschungsfrage 1
3 Kapitel 6	Entwicklung eines geeigneten Versuchsplans zur statistischen Einflussanalyse der relevanten Freiheitsgrade	Forschungsfrage 2
4 Kapitel 7	Evaluation der Betriebsstrategien anhand praxisrelevanter Fallstudien	Forschungsfrage 3

Abbildung 3-6: Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen

Im ersten Schritt (Kap. 4) wird ein geeignetes Untersuchungsmodell für hybride Kommissioniersysteme konzipiert. Im Vordergrund stehen dabei vor allem eine geeignete Abstraktion

der Agenten (Mensch und Roboter) sowie die möglichen Interaktionen und das Ausweichverhalten. Zusätzlich sollen die weiteren Bestandteile und Planungsprobleme eines hybriden Kommissioniersystems in einem geeigneten Rahmen ausgewählt werden. Darauf aufbauend wird das konzipierte Untersuchungsmodell in ein ausführbares Simulationsmodell überführt (Kap. 5), welches mittels einer geeigneten Software die Untersuchungen ermöglicht. Um sicherzugehen, dass das Modell fehlerfrei funktioniert und sich auf ein in der Realität befindliches System übertragen lässt, bedarf es einer Verifikation und Validierung. In Schritt 3 (Kap. 6) erfolgt die eigentliche Untersuchung der Planungsprobleme. Nachdem zunächst ein geeigneter Versuchsplan definiert worden ist, wird mittels statistischer Werkzeuge eine Einflussanalyse zu den zuvor festgelegten Planungsproblemen durchgeführt. Die daraus resultierenden Erkenntnisse sollen dazu dienen, geeignete Betriebsstrategien abzuleiten. Diese werden im letzten Schritt (Kap. 7) anhand von Fallstudien in Hinsicht auf ihre Anwendbarkeit in der Praxis evaluiert, um abschließend die Allgemeingültigkeit der entwickelten Betriebsstrategien zu gewährleisten.



## 4 Konzeption eines Untersuchungsmodells für hybride Kommissioniersysteme

---

Der erste Schritt zur Beantwortung der Forschungsfragen besteht in der Konzeption eines geeigneten Untersuchungsmodells. Dazu sollen zunächst die Zielstellung und Anforderungen an das Modell definiert werden (Abschn. 4.1). Darauf aufbauend werden in Abschnitt 4.2 die Kennzahlen bestimmt, die im Zuge der Einflussanalyse einen Vergleich zwischen Mensch und Roboter ermöglichen. Im Anschluss wird der Aufbau des hybriden Kommissioniersystems beschrieben und von den umliegenden Bereichen innerhalb der Intralogistik abgegrenzt (Abschn. 4.3). Darauf aufbauend wird in Abschnitt 4.4 der Kommissionierprozess erläutert. Im weiteren Verlauf werden der Mensch und der Roboter als wesentliche Bestandteile des Modells modelliert (Abschn. 4.5). Dies beinhaltet sowohl die jeweils typischen Charakteristika als auch ihr Interaktionsverhalten. In den Abschnitten 4.6, 4.7 und 4.8 erfolgt die Beschreibung der relevanten Bestandteile der Layout- und Sortimentsgestaltung sowie des Auftragsmanagements. Im letzten Abschnitt 4.9 wird ein Fazit zur Konzeptionierung des Untersuchungsmodells gezogen.

### 4.1 Zielstellung und Anforderungen an das Untersuchungsmodell

Zur Planung eines leistungsgerechten Einsatzes mobiler Kommissionierroboter bedarf es eines Modells, welches in der Lage ist, hybride Kommissioniersysteme abzubilden und zu untersuchen. Dazu werden relevante Planungsprobleme von Kommissioniersystemen untersucht und auf ihre Anwendbarkeit sowie die Effektivität einzelner Freiheitsgrade in hybriden Systemen analysiert. Zudem sollen die Planungsprobleme sowie die generelle Funktionalität des Untersuchungsmodells durch einen Einsatz in der Praxis evaluiert werden. Damit soll gezeigt werden, dass das Modell nicht nur aus Sicht der Wissenschaft valide Ergebnisse liefert, sondern auch im Rahmen der Grobplanung ein reales System konfigurieren und dimensionieren kann. Ein solches Untersuchungsmodell muss spezifische Anforderungen erfüllen, die im weiteren Verlauf näher beschrieben werden.

#### **Anforderung 1: Berücksichtigung der individuellen Charakteristika von Mensch und Roboter**

Die Besonderheit des hier zu entwickelnden Untersuchungsmodells besteht darin, dass Mensch und Roboter gemeinsam innerhalb eines Arbeitsraumes agieren. Dies setzt voraus, dass die Agenten im Modell so implementiert sein müssen, dass sie dem Verhalten eines

Menschen oder eines Roboters entsprechen. Dazu gilt es zu identifizieren, welche Eigenschaften des Menschen und des Roboters für die Untersuchung relevant sind und welche spezifischen Ausprägungen diese haben. Denkbare Charakteristika wären Bewegungs-, Wahrnehmungs- oder Handhabungsweisen. Darüber hinaus muss das Modell in der Lage sein, Begegnungen und Interaktionen abzubilden. Dabei ist bei möglichen Verhaltensmustern zu differenzieren, ob die Interaktion zwischen zwei Menschen, zwischen zwei Robotern oder zwischen Mensch und Roboter auftritt. Die Beachtung dieser Anforderung ist für den erfolgreichen Einsatz des Untersuchungsmodells unabdingbar.

### **Anforderung 2: Untersuchung von unterschiedlichen Systemvarianten**

Die Gestaltung von (hybriden) Kommissioniersystemen erfolgt höchst individuell und ist von vielen Faktoren abhängig. So variieren Systeme in ihrer Gesamtgröße (Fläche und Personal), in ihrer Lagertechnik oder in der Anwendung diverser Strategien. In Abschnitt 2.4 wurden bereits diverse Strategien und die möglichen Ausprägungen eines klassischen Kommissioniersystems vorgestellt. Die für die hybride Kommissionierung relevanten Strategien werden in das Untersuchungsmodell integriert und um spezifische Planungsprobleme ergänzt. Damit soll es möglich sein, einzelne Systeme mit unterschiedlichen Freiheitsgraden der Planungsprobleme zu untersuchen und deren Einfluss auf die Pickleistung darzustellen.

### **Anforderung 3: Abstraktion von Auftragsdaten**

Die Auftragsdaten bilden den wesentlichen Input eines Kommissioniersystems. Beim Blick auf den Aufbau und die Struktur von Auftragsdaten verschiedener Unternehmen können in der Praxis nur bedingt Gemeinsamkeiten identifiziert werden. Zwar lassen sich aus jedem Datensatz die wesentlichen Informationen (Artikeltyp, Menge, Lagerplatz) ableiten, allerdings sind insbesondere die Struktur und der Aufbau der Datensätze stets individuell. Daraus resultieren zwei Herausforderungen für die Modellbildung: Einerseits muss für die theoretischen Untersuchungen eine geeignete Datenstruktur entwickelt werden, die die notwendigen Informationen für einen Kommissionierprozess bereitstellt. Andererseits soll eine Methode gefunden werden, wie die individuellen Auftragsdaten einzelner Unternehmen vereinheitlicht und abstrahiert werden können, um so generisch einen geeigneten Input an Auftragsdaten sicherstellen zu können.

### **Anforderung 4: Differenzierte Analyse der Einflüsse beider Agenten**

Durch die Berücksichtigung von unterschiedlichen Systemvarianten soll das Modell in der Lage sein, die Einflüsse beider Agenten zu messen. So lassen sich Erkenntnisse darüber

erlangen, welche Planungsprobleme und deren Freiheitsgrade welchen Einfluss auf welchen Agenten haben. Dazu bedarf es der Entwicklung eines Zielsystems, bei dem geeignete Kennzahlen ausgewählt werden, um sowohl die Vergleichbarkeit der Agenten als auch einzelne Systemkonfigurationen bewerten zu können. Letztlich soll das Modell Aussagen darüber zulassen, ob gültige Strategien für homogene Systeme auf hybride Systeme übertragbar sind.

### **Anforderung 5: Nachvollziehbare und schlanke Handhabung**

Die fünfte Anforderung stellt eine Art Gegenpol zur zweiten Anforderung dar. Zwar soll das Modell möglichst generisch und umfassend Funktionen abbilden, andererseits soll es in einem annehmbaren Zeitrahmen reproduzierbare und nachvollziehbare Ergebnisse liefern. Zudem soll es möglich sein, mit wenig Aufwand und Komplexität ein lauffähiges System zu modellieren und zu untersuchen. Dies erleichtert sowohl die Untersuchung wissenschaftlicher Fragestellungen als auch einen potenziellen Einsatz in der Praxis.

## **4.2 Kennzahlen für einen Systemvergleich**

Um im Rahmen der Planung und Gestaltung von Kommissioniersystemen eine Vergleichbarkeit mit Alternativen sicherzustellen, müssen geeignete Kennzahlen definiert werden. Diese sollen darüber Aufschluss geben, welche Planungsvarianten als geeignet und welche als ungeeignet angesehen werden können. In der Wissenschaft wird in den meisten Fällen die notwendige Zeit zur Erledigung eines Auftrags oder einer Position gemessen (vgl. [Gil-2018, S. 8]). Dies entspricht im Wesentlichen der Leistung eines Kommissioniersystems. Die mathematische Herleitung zur Berechnung der Leistung findet sich in der Gleichung 2-1 und den darauf folgenden Gleichungen.

Zur differenzierten Analyse der Einflüsse beider Agenten wird daher auch auf die Pickleistung  $P_P$  zurückgegriffen. Diese wird getrennt für den Menschen ( $P_{P,m}$ ) und den Roboter ( $P_{P,r}$ ) vom Modell ausgegeben. Damit lassen sich die Einflüsse eindeutig und trennbar auf beide Agenten übertragen. Die Kommissionierleistung soll im Rahmen einer praktischen Evaluation gesamtheitlich als Summe für beide Agenten ( $P_{K,g}$ ) berücksichtigt werden. Damit kann die notwendige Relevanz für die Praxis sichergestellt werden, da in dieser häufig eine Gesamtanzahl an zu kommissionierenden Positionen vorgegeben wird und es weniger relevant ist, welcher Agent wie viele davon übernimmt.

Zusätzlich wird es im Rahmen der Modellentwicklung und -untersuchung notwendig sein, auf weitere Kennzahlen zurückzugreifen, um Planungsvarianten einzuordnen. So kann die Anzahl an Ausweichvorgängen des Roboters ( $n_{AV,r}$ ) ein Indikator für eine geringe Leistung

des Menschen ( $P_{P,m}$ ) sein. Die nachfolgende Tabelle 4-1 fasst die relevanten primären und sekundären Kennzahlen nochmals zusammen.

Tabelle 4-1: Übersicht über die im Untersuchungsmodell abzubildenden Kennzahlen

<b>Primär</b>	Picks pro Stunde Mensch ( $P_{P,m}$ )
	Picks pro Stunde Roboter ( $P_{P,r}$ )
	Positionen pro Tag Gesamt ( $P_{K,g}$ )
<b>Sekundär</b>	Anzahl an Ausweichvorgängen je Tour Mensch ( $n_{AV,m}$ )
	Anzahl an Ausweichvorgängen je Tour Roboter ( $n_{AV,r}$ )
	Anzahl an abgeschlossenen Touren ( $n_{KT}$ )
	Anzahl an Wartevorgänge pro Tour Mensch ( $n_{WV,m}$ )
	Anzahl an Wartevorgänge pro Tour Roboter ( $n_{WV,r}$ )
	Gesamtzeit pro Kommissioniertour Mensch ( $t_{KT,m}$ )
	Gesamtzeit pro Kommissioniertour Roboter ( $t_{KT,r}$ )
	Wartezeit pro Tour Mensch ( $t_{WZ,m}$ )
Wartezeit pro Tour Roboter ( $t_{WZ,r}$ )	

### 4.3 Aufbau und Abgrenzung des Gesamtsystems

Im Zuge der Entwicklung des Untersuchungsmodells ist es notwendig, dessen Bestandteile zu erläutern und abzugrenzen. Dazu wird auf die generische Beschreibung von *ten Hompel et al.* im Bezug auf die Systemgestaltung eines Kommissioniersystems zurückgegriffen (vgl. [Hom-2011, S. 4 ff.]).

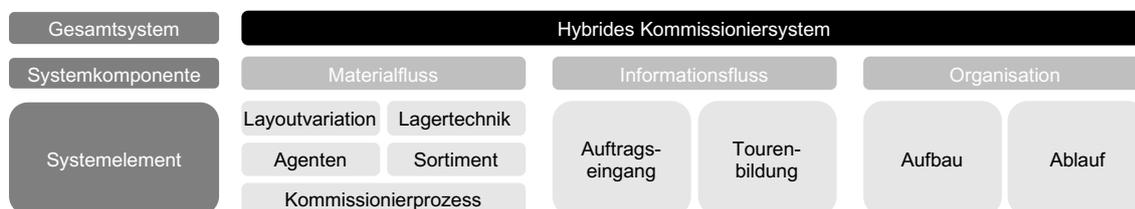


Abbildung 4-1: Morphologische Betrachtung des Gesamtsystems hybride Kommissionierung

Abbildung 4-1 zeigt die Unterteilung des hybriden Gesamtsystems in die Systemkomponenten und -elemente. An oberster Stelle steht das hybride Kommissioniersystem als Gesamtsystem. Darunter fallen drei Systemkomponenten: Der Materialfluss umfasst alle relevanten Systemelemente, die einen direkten Bezug zum physischen Transport oder zur

Handhabung von Waren haben. Dies sind einerseits das Layout und die eingesetzte Lager-technik und andererseits die Agenten und das Artikelsortiment selbst sowie der Kommissionierprozess. Als zweite wesentliche Systemkomponente kann der Informationsfluss definiert werden. Dieser berücksichtigt vorrangig das Auftragsmanagement und beinhaltet die Systemelemente Auftragseingang und Tourenbildung. Im Rahmen des Auftragseingangs soll konkretisiert werden, wie die Aufträge in das Gesamtsystem eingebunden werden. Die Tourenbildung beschreibt die anschließende Verarbeitung der Aufträge zu einzelnen Kommissioniertouren. Die dritte Systemkomponente ist die Organisation, welche sich in den Aufbau und den Ablauf unterteilt. Im Zuge des Organisationsaufbaus soll das Untersuchungsmodell in der Lage sein, neben einem einzonigen System, ebenfalls ein System mit zwei Zonen abzubilden. Dabei sollen der Mensch und der Roboter jeweils einer Zone zugeordnet werden und in dieser Konstellation auch nur in dieser kommissionieren<sup>14</sup>. Für die Ablauforganisation wird stets von einer zweistufigen, parallelen Kommissionierung ausgegangen. Das bedeutet, dass einzelne Kundenaufträge auf mehrere Agenten verteilt werden. Eine einstufige Kommissionierung ist in hybriden Kommissioniersystemen nicht praktikabel, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass ein gesamter Kundenauftrag, auf Grund von heterogenen Arteikeigenschaften im Sortiment, von einem Roboter kommissioniert werden kann<sup>15</sup>. Eine Besonderheit von hybriden Kommissioniersystemen stellt zudem die Betriebsart im Rahmen des Organisationsablauf dar. Im Rahmen des Untersuchungsmodells werden Mensch und Roboter parallel eingesetzt und es wird lediglich die Anzahl beider Agenten variiert.

Im Zuge der Abgrenzung eines hybriden Kommissioniersystem sind die Systemgrenzen relevant. Der Auftragseingang spiegelt den Systeminput wider und stellt somit eine der Systemgrenzen zu allen vorgelagerten Elementen und Prozessen dar. Das bedeutet, dass im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt wird, ob es sich bei den Aufträgen um externe oder interne Aufträge handelt und ob bereits erste Filterungen durch ein ERP- oder WMS-System vorgenommen wurden. Die wesentlichen Bestandteile des Auftragseingangs werden in Abschnitt 4.8 beschrieben. Eine weitere Systemgrenze ist der Nachschub von Artikeln aus einer vorgelagerten Lagerstufe. Beim Untersuchungsmodell wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass stets genügend Ware vorrätig ist und dementsprechend Nachschubprozesse und -strategien vernachlässigt werden können.

Die Systemgrenze beim Output wird unmittelbar nach der Entladung der kommissionierten Waren im Depot definiert. Im Zuge weiterer Betrachtungen werden vorbereitende Versandprozesse, wie beispielsweise das Verpacken von Artikeln im Rahmen der Distribution oder

---

<sup>14</sup>Im Untersuchungsmodell sollen zwei Fälle einer Zonierung berücksichtigt werden. Dies stellt eine simplifizierte Variante der Zonierung aus Unterabschnitt 2.4.3 dar. Im Fall des Untersuchungsmodells liegt der Fokus jedoch auf die Untersuchung der auftretenden Interaktionen zwischen Mensch und Roboter, die in einem einzonigen System sowohl homogen als auch hybrid und in einem zwei-zonigen System vorrangig homogen ausfallen.

<sup>15</sup>Die relevante Arteikeigenschaften werden in Abschnitt 4.7 beschrieben.

die Beladung von Transportsystemen zur Produktionsversorgung, nicht näher untersucht und als gegeben angesehen. Außerdem werden Zusammenführungsprozesse und notwendige Puffer vernachlässigt. Die Abbildung 4-2 fasst alle Bestandteile des Gesamtsystems zusammen, die in den nachfolgenden Unterabschnitten näher beschrieben werden.

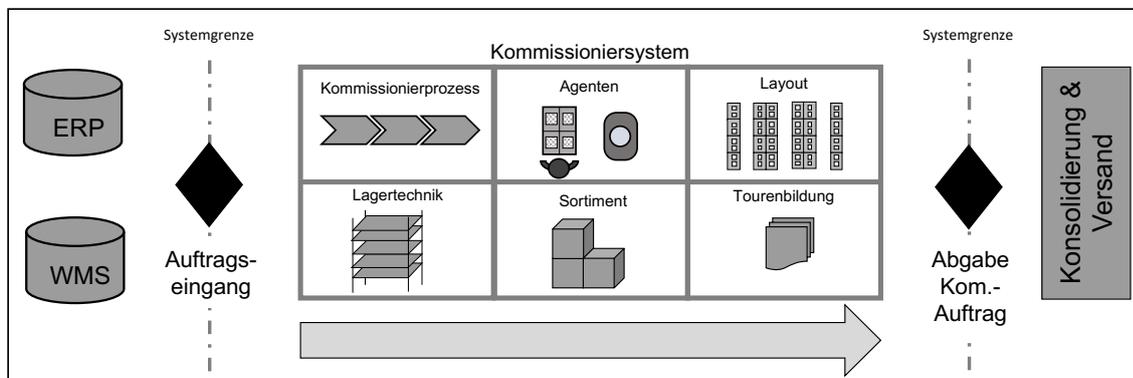


Abbildung 4-2: Darstellung des hybriden Kommissioniersystems als Gesamtsystem und die Anordnung der Systemkomponenten Materialfluss und Informationsfluss

#### 4.4 Ablauf des Kommissionierprozesses

Der Kommissionierprozess beschreibt die Abfolge von sich wiederholenden Tätigkeiten, die zu absolvieren sind, um einen Kommissionierauftrag abzuschließen. Diese Schritte können, je nach Anwendungsfall, stark variieren. Insbesondere bei Zusatztätigkeiten wie dem Etikettieren oder sonstigen Handhabungsschritten, wie Value-Added-Services, lassen sich nur selten identische Prozessschritte feststellen. Daher soll für das Untersuchungsmodell ein möglichst generalisierter Kommissionierprozess definiert werden, der zwar über einen geringeren Detailgrad verfügt, aber dafür in seiner Grundform auf nahezu alle Kommissioniervorgänge übertragbar ist. Als Grundlage sollen die Beschreibungen von *Grosse et al.* und *de Koster et al.* dienen (vgl. [Gro-2016, S. 405 f.; Kos-2007, S. 5 f.]).

Der Kommissionierprozess beginnt üblicherweise an einem Depot. Dort erfolgt ein erster Rüstvorgang, der notwendig ist, um die Kommissioniertour zu starten. Um möglichst verschiedene Arbeitsschritte abbilden zu können, soll für Mensch ( $t_{RS,m}$ ) und Roboter ( $t_{RS,r}$ ) jeweils ein Zeitanteil definiert werden, der den Rüstaufwand repräsentiert. In der Praxis könnte dies das Drucken von Picklisten oder die Bestückung eines Kommissionierwagens sein. Für den Roboter wird ein Zeitanteil angenommen, der die Verarbeitung der neuen Auftragsdaten repräsentiert. Nachdem der Rüstvorgang abgeschlossen ist, kann die Kommissioniertour beginnen. Dazu bewegt sich sowohl der Roboter als auch der Mensch zu der ersten Entnahmeposition im System. Für das Untersuchungsmodell wird angenommen, dass die Agenten stets nur eine Position des Kommissionierauftrages kennen. Damit kann sichergestellt werden, dass beide stets die Aufträge in der Reihenfolge abarbeiten, die das

System vorsieht. Am Entnahmeort angekommen, müssen sich beide Agenten zunächst orientieren, um das richtige Regal und Fach sowie den entsprechenden Artikel zu identifizieren. Im Anschluss erfolgt der eigentliche Greifvorgang, um die geforderte Menge an Artikeln zu entnehmen<sup>16</sup>. Nachdem dieser Schritt abgeschlossen ist, bewegt sich der Agent entweder zum nächsten Entnahmeort, wenn weitere Positionen des Kommissionierauftrages zu bearbeiten sind, oder es erfolgt die Rückkehr zum Depot. Der Prozess endet mit einem weiteren Rüstvorgang, in dem die kommissionierten Aufträge entladen und zur nachfolgenden Bearbeitung vorbereitet werden. Dieser Vorgang kann je nach Anwendungsfall individuell gestaltet sein, sodass dazu ebenfalls zwei Zeitanteile die entsprechenden Prozessschritte berücksichtigen sollen ( $t_{RE,m}$ ), ( $t_{RE,r}$ ). Nach Abschluss dieses Rüstvorgangs erfolgt der Beginn eines neuen Kommissionierprozesses. Abbildung 4-3 fasst den Prozess nochmals grafisch zusammen.

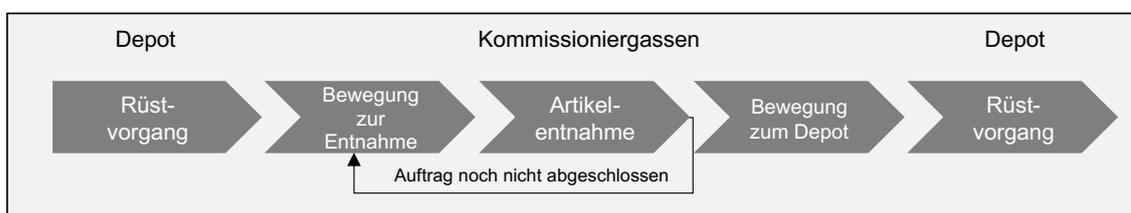


Abbildung 4-3: Darstellung des Kommissionierprozesses

Der in Abbildung 4-3 skizzierte Prozess stellt den idealen Ablauf eines Kommissionierauftrages dar. In der Realität, insbesondere dann, wenn mehrere Agenten im System aktiv sind, kann es zu Interaktionen kommen, sodass der Ablauf unterbrochen wird. Um die Interaktionen im Modell entsprechend abzubilden, werden im folgenden Abschnitt die Agenten näher beschrieben.

## 4.5 Agenten

Bei der Modellierung der Agenten spielt die Kombination der definierten Anforderungen 1 und 4 aus Abschnitt 4.1 eine wichtige Rolle, denn das Untersuchungsmodell soll die wesentlichen Einflussfaktoren und Eigenschaften beider Agenten abbilden. Prinzipiell lassen sich aus dem Kommissionierprozess zwei wesentliche Anforderungen an die Modellierung der Agenten ableiten:

- Die Agenten sollen ihren Charakteristika entsprechend den Kommissionierprozess durchführen können.
- Die Agenten sollen in ihrer Form so konzipiert sein, dass individuelle Interaktionen innerhalb des Kommissionierprozess abbildbar sind.

<sup>16</sup>Im Untersuchungsmodell wird angenommen, dass mit einem Pick stets nur ein Artikel entnommen werden kann. Außerdem werden mögliche Anbruchmengen vernachlässigt, bei denen der Mensch zunächst eine Umverpackung öffnen und daraus eine bestimmte Menge an Artikeln entnehmen muss.

Das übergeordnete Ziel beider Agenten liegt in der Durchführung der Kommissionieraufgabe. Dazu müssen sie sich zu einem definierten Ort bewegen können und dort gemäß einer Vorgabe eine definierte Menge an Artikeln entnehmen. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis alle Aufträge kommissioniert sind und der Mensch oder der Roboter den Auftrag am Depot abschließt. Der Grundablauf ist für beide Agenten identisch, lediglich der Zeitaufwand wird ein anderer sein. Daher ist wichtig, dass beide Agenten parametrierbar sind, um diese Zeitunterschiede abbilden zu können. Neben den parametrierbaren Zeitannteilen, die den Kommissionierprozess beider Agenten beeinflussen, sind die Eigenschaften des Menschen und des Roboters relevant, um die auftretenden Interaktionen modellieren zu können. Auf beide Aspekte soll in den beiden nachfolgenden Unterabschnitten nach Mensch und Roboter getrennt eingegangen werden.

#### 4.5.1 Beschreibung des Menschen

Der Mensch stand in den bisherigen Untersuchungsmodellen von Kommissioniersystemen im Hintergrund und diente lediglich als ausführende Kraft des definierten Kommissionierprozesses. Im Zuge der Betrachtung von Blockierungen in Kommissioniersystemen stieg seine Bedeutung und die seiner Interaktionen mit anderen Teilnehmern im Kommissioniersystem. Es ist jedoch festzustellen, dass bis dato kein Untersuchungsmodell für Kommissioniersysteme entwickelt wurde, welches die menschlichen Charakteristika berücksichtigt. Eine sehr umfangreiche Betrachtung findet sich in Untersuchungen zum *Social Force Model* (SFM), welches von *Helbing und Molnar* für die Untersuchung des Verhaltens von Fußgängern entwickelt wurde. Daraus geht u. a. die Erkenntnis hervor, dass Menschen zwar in außergewöhnlichen Situationen individuell agieren, sonst aber meist einem ähnlichen Verhalten unterliegen (vgl. [Hel-1995, S. 4282]).

Bei genauerer Untersuchung des SFM finden sich im definierten Ablauf Ähnlichkeiten zu einem Kommissionierprozess<sup>17</sup>. *Helbing und Molnar* sehen folgende Einflüsse auf die menschliche Bewegung (vgl. [Hel-1995, S. 4283 ff.]):

1. Der Mensch möchte ein übergeordnetes Ziel so einfach wie möglich erreichen. Dabei versucht er den direktesten und damit kürzesten Weg zu nehmen. Treten keine Störfaktoren auf, kann er sich mit einer von ihm gewünschten Geschwindigkeit bewegen, wobei Störeinflüsse eine Verringerung der bevorzugten Geschwindigkeit zur Folge haben oder von der geplanten Route abgewichen werden muss.
2. Der Bewegungsablauf des einzelnen Menschen wird zudem von den übrigen Passanten beeinflusst. Üblicherweise hält er einen Abstand zu fremden Personen in Abhängigkeit von der Dichte an Passanten und der eigenen Geschwindigkeit. Mit Verrin-

---

<sup>17</sup>Der Einfachheit halber soll auf eine mathematische Modellierung der Bestandteile verzichtet werden. Diese können in [Hel-1995, S. 4284 ff.] nachvollzogen werden. Die Gegenüberstellung soll lediglich zeigen, dass Gemeinsamkeiten zwischen einem Kommissionierprozess und einer Bewegung im öffentlichen Raum bestehen. Die konkrete Modellierung der Bestandteile wird in Kapitel 5 umgesetzt.

gerung des Abstands entsteht ein zunehmendes Unwohlsein des Menschen. Diese Fläche, die die Person benötigt, um sich weiter fortzubewegen, wird in Form einer Ellipse dargestellt.

3. Im SFM werden zudem Begegnungen mit weiteren Passanten oder Objekten beschrieben. Hierbei wird betont, dass der Einfluss dieser Begegnungen mit der Zeit abnimmt<sup>18</sup>.

Das SFM findet bereits in vielen Untersuchungen, in denen das menschliche Verhalten eine Rolle spielt, Anwendung. Dazu gehören zum Beispiel Arbeiten, die sich mit der Evakuierung aus Gebäuden beschäftigen (vgl. [Zhe-2009]). Darüber hinaus lassen sich Arbeiten finden, die das SFM in geschlossenen Räumen anwenden, um menschliches Verhalten abseits von Extremsituationen wie einer Evakuierung zu analysieren (vgl. [Tsu-2021; Xi-2010]). Das SFM wurde zudem auf Fälle angewandt, in denen nicht nur ausschließlich Passanten berücksichtigt wurden. So haben *Rinke et al.* den Einfluss eines SFM im Straßenverkehr untersucht (vgl. [Rin-2017]). Insbesondere die Anwendungen verschiedener Akteure, wie sie im Straßenverkehr vorkommen, geben Grund zu der Annahme, dass der Ansatz des SFM auch auf das Umfeld der Kommissionierung und damit auf die dort auftretenden menschlichen Bewegungen übertragbar ist.

Der Kommissionierer hat wie der Passant im SFM ein übergeordnetes Ziel, welches er erreichen will. Bei der Kommissionierung sind dies die einzelnen Positionen des Kommissionierauftrages, die ebenfalls auf möglichst kurzem Wege erreicht werden sollen. Der Mensch bewegt sich dabei mit einer individuellen Geschwindigkeit fort, die er, solange keine Störeinflüsse eintreten, beibehält. Auch innerhalb der Kommissionierung ist davon auszugehen, dass der Mensch eine *Sicherheitszone* besitzt. Sollte ein Hindernis in diese eintreten, wird er entweder stehen bleiben oder ausweichen. So trifft der Kommissionierer im Zuge des Prozesses auf andere Agenten (Menschen und Roboter), die den Ablauf seiner Bewegung beeinflussen. Daher sind die Grundeigenschaften des SFM auf die Kommissionierung anwendbar und können bei der weiteren Modellierung des Menschen berücksichtigt werden.

Der Abstand von Passanten ist laut *Helbing und Molnar* von der Dichte an Personen im Umfeld und deren Geschwindigkeit abhängig. Sie beschreiben, dass sich Passanten sehr schnell unwohl fühlen, wenn ihnen fremde Personen zu nahe kommen (vgl. [Hel-1995, S. 4283]). Für ein Kommissioniersystem kann jedoch die Annahme getroffen werden, dass ein Mensch zu allen anderen Menschen in einem Kommissioniersystem ein kollegiales Verhältnis hat, welches vertrauenswürdiger ist als das zu fremden Menschen. Daher ist davon

---

<sup>18</sup> *Helbing und Molnar* beschreiben hier die Situation eines Straßenmusikers, der zunächst von vorbeilauenden Passanten eine gewisse Aufmerksamkeit bekommt, bevor diese Personen üblicherweise nach einer gewissen Zeit ihre Bewegung fortsetzen. Eine solche Art der Ablenkung ist im Umfeld der Kommissionierung nicht zu erwarten. Allerdings zeigt das Modell, dass aus psychologischer Sicht gewisse Neuerungen im Arbeitsumfeld des Menschen, bspw. ein Roboter, nach einer gewissen Zeit an Reiz und Aufmerksamkeit verlieren.

auszugehen, dass die zu modellierenden Abstände zwischen zwei Personen in einem Kommissioniersystem kleiner sein können als im SFM vorgegeben (vgl. [Hel-1995, S. 4283]). Im gleichen Maße kann die definierte Zone jedoch dazu dienen, dass der Mensch im Untersuchungsmodell Hindernisse wahrnimmt und auf Basis seines Umfelds eine Entscheidung zur Interaktion trifft. Einen vergleichbaren Ansatz verfolgen *Campanella et al.* In ihrer Erweiterung des SFM sehen sie die Zone als eine Ellipse, die sich vornehmlich in der Bewegungsrichtung des Menschen aufspannt (vgl. Abb. 4-4).

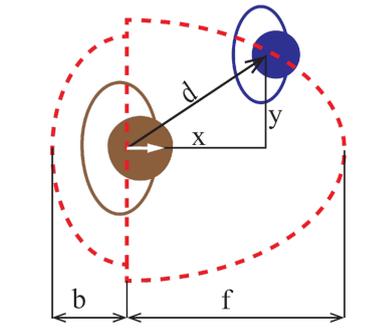


Abbildung 4-4: Darstellung der Sicherheitszone des Menschen [Cam-2014, S. 466]

$\vec{d}_f$  und  $\vec{d}_b$  sind die vom Menschen wahrgenommenen Entfernungen zu einem Objekt, je nachdem, ob sich das Objekt vor oder hinter dem Menschen befindet.  $\vec{d}_x_f$  und  $\vec{d}_x_b$  sind die tatsächlichen Entfernungen, die jeweils mit einem Faktor  $c_0^+$  bzw.  $c_0^-$  multipliziert werden, welcher kleiner als 1 ist. Daraus ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang (vgl. [Cam-2014, S. 466]):

$$\vec{d}_f = \sqrt{(\vec{d}_x_f \cdot c_0^+)^2 + (\vec{d}_y_f)^2} \quad \text{und} \quad \vec{d}_b = \sqrt{(\vec{d}_x_b \cdot c_0^-)^2 + (\vec{d}_y_b)^2} \quad (4-1)$$

Dieser Ansatz soll vereinfacht für das hier zu entwerfende Untersuchungsmodell übernommen werden. Grundsätzlich kann für die Kommissionierung ebenfalls angenommen werden, dass sich der relevante Bereich eines Kommissionierers in Bewegungsrichtung befindet. Da es sich hierbei um ein kontrolliertes Arbeitsumfeld handelt, ist davon auszugehen, dass keine der Personen sich auf so kurze Distanz nähert, wie es ggf. bei einer Evakuierung, in überfüllten Einkaufszentren o. Ä., der Fall sein könnte. Daher soll der hintere Bereich der Sicherheitszone vernachlässigt werden. Des Weiteren wird im Untersuchungsmodell von konstanten Geschwindigkeiten und objektiven Wahrnehmungen in Bezug auf Hindernisse ausgegangen. Das bedeutet, dass für alle Menschen im Untersuchungsmodell eine gleich große Sicherheitszone definiert wird. Diese setzt sich aus der Länge  $L_{SZ}$  und der Breite  $W_{SZ}$  zusammen und ist entsprechend parametrierbar. Eine für das Untersuchungsmodell skizzierte Sicherheitszone für den Menschen kann der Abbildung 4-5 entnommen werden.

Neben den umfänglich beschriebenen Bewegungsabläufen und -einflüssen spielen im

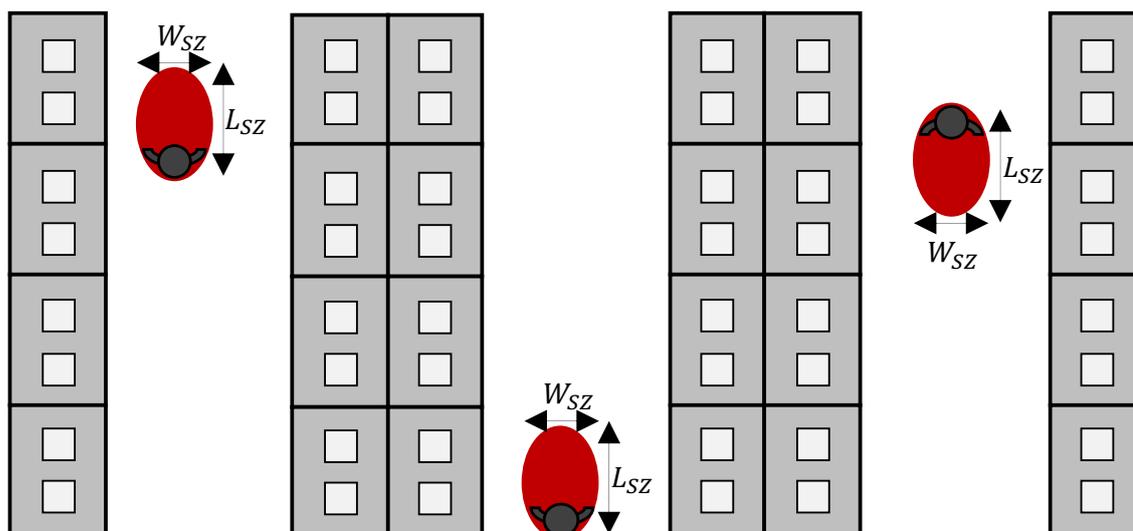


Abbildung 4-5: Gestaltung der Sicherheitszone des Menschen ohne Berücksichtigung von unterstützenden Kommissioniertechniken

Kommissionierprozess weitere Parameter entscheidende Rollen. Dazu gehört zum einen der Zeitbedarf eines Picks in Sekunden. Der entsprechende Zeitbedarf soll jedoch abhängig vom Lagerort und der Artikeleigenschaft individuell bestimmt werden (eine Herleitung der Greifzeit wird in Anhang A beschrieben). Des Weiteren soll für den Menschen eine Wartezeit berücksichtigt werden, die einsetzt, wenn er ein Hindernis in der eigenen Sicherheitszone erkennt<sup>19</sup>. Tabelle 4-2 fasst die parametrierbaren Eigenschaften des Menschen zusammen.

Tabelle 4-2: Gestaltungsparameter des Menschen

Parameter	Bezeichnung
$a_m$	Beschleunigung des Menschen
$C_{T,m}$	Kapazität des Menschen
$L_{SZ}$	Länge der Sicherheitszone
$t_{greif,m}$	Greifzeit Mensch
$t_{W,m}$	Wartezeit Mensch
$v_m$	Bewegungsgeschwindigkeit Mensch
$W_{SZ}$	Breite der Sicherheitszone

<sup>19</sup>Wann ein Mensch sich dazu entscheidet zu warten, wird in Unterabschnitt 4.5.3 definiert.

### 4.5.2 Beschreibung des Roboters

Der Roboter stellt im Untersuchungsmodell die zweite Klasse an Agenten dar. Der Einsatz von mobilen Robotern, die selbstständig Aufgaben übernehmen, in diesem Fall das Kommissionieren von Artikeln, unterliegt wegen ihrer Begegnung mit Menschen hohen Sicherheitsanforderungen. Gleichzeitig ist man in der Wissenschaft davon überzeugt, dass Mensch und Roboter effizienter zusammenarbeiten, wenn sich der Roboter ähnlich wie ein Mensch verhält, wobei es bereits erste Forschungsansätze gibt, die versuchen, das SFM auf das Verhalten von Robotern zu übertragen (vgl. [Rat-2013a; Rat-2013b]). Diese Arbeiten beruhen jedoch auf der Prämisse, dass der Roboter, wie im ursprünglichen SFM, das Hindernis wahrnimmt und dessen Verhalten antizipieren kann. Dies erfordert komplexe Sensorik und Software, die bei industriellen Robotiklösungen nicht vorausgesetzt werden kann. Daher orientiert sich die hier vorgenommene Modellierung des Roboters am heutigen Stand der Technik.

Elementar ist dabei der Personenschutz, der vorsieht, dass der Roboter bei Erkennung einer Person rechtzeitig anhalten muss. Dabei darf es zu keinem Kontakt zwischen dem Menschen und einem festen Teil des Roboters oder der Last kommen (vgl. [DIN-3691, S. 24]). Üblicherweise werden dazu *berührungslos wirkende Sensoren* (bspw. Laser-Scanner) eingesetzt. Selten werden noch bei sehr langsam fahrenden Geräten *taktil wirkende Sensoren* (bspw. Bumper oder Schaltbügel) eingesetzt. Bumper oder Schaltbügel lösen erst nach Berührung mit dem Menschen einen Halt aus, während Laserscanner ein virtuelles Schutzfeld errichten und reagieren können, sobald ein Hindernis in Sichtweite kommt, ohne dass eine Berührung mit dem Roboter erfolgen darf (vgl. [VDI-4451, S. 24 ff.]). Für das Untersuchungsmodell sollen vor allem die Möglichkeiten von *berührungslos wirkenden Sensoren* berücksichtigt werden. Damit lässt sich wie beim Menschen eine Sicherheitszone für den Roboter generieren, die mit dem Betreten eines Hindernisses eine Aktion des Roboters auslöst. Darüber hinaus wird für das Untersuchungsmodell, wie schon beim Menschen, eine statische Sicherheitszone angenommen, die für alle Roboter im Modell gleich modelliert ist. Im Gegensatz zu der des Menschen unterteilt sich diese Sicherheitszone in zwei Bereiche. Der Bereich unmittelbar um den Roboter stellt das Schutzfeld des Roboters dar (vgl. [VDI-4451, S. 28]). Das bedeutet, dass der Roboter bei Erkennen eines Hindernisses (in Fahrtrichtung) unmittelbar anhalten muss. Die Dimensionierung dieser Zone ist u. a. abhängig von Bremsleistung und Geschwindigkeit des Roboters und bedarf im Rahmen der Risikoanalyse einer spezifischen Berechnung. Im Untersuchungsmodell soll davon ausgegangen werden, dass der Roboter immer zum Stehen kommt, sobald ein Hindernis im Schutzfeld detektiert wird. Des Weiteren verfügt der Roboter über ein Warnfeld, welches lediglich in Fahrtrichtung aktiviert ist (vgl. [VDI-4451, S. 28]). Der Roboter erkennt ein Hindernis frühzeitig und kann die eigene Geschwindigkeit anpassen. Dies dient einerseits zur Steigerung der Sicherheit, andererseits kann die Reduktion der Geschwindigkeit einen Stopp vermeiden. Die Sicherheitszone des Roboters lässt sich anhand der Variablen  $L_{SF}$

und  $W_{SF}$  für die Länge und Breite des Schutzfeldes sowie durch die Länge des Warnfeldes ( $L_{WF}$ ) beschreiben. Die Gestaltung der Sicherheitszone sieht damit aus wie in Abbildung 4-6 dargestellt.

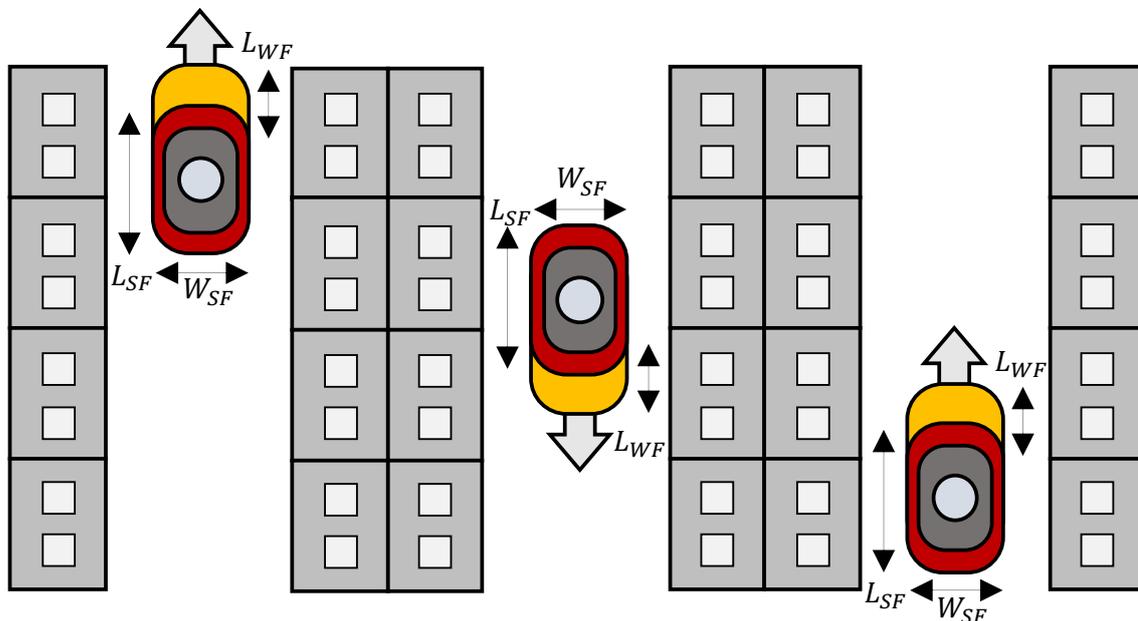


Abbildung 4-6: Gestaltung der Sicherheitszone des Roboters

Des Weiteren soll das Untersuchungsmodell in der Lage sein, verschiedene Ausprägungen des Schutzfeldes abzubilden. So wäre neben einer 360-Grad-Variante, wie sie in Abbildung 4-6 dargestellt ist, auch eine Einschränkung der Sicherheitszone möglich, sodass nur Hindernisse in direkter Fahrtrichtung berücksichtigt werden müssen.

Eine weitere Sicherheitsanforderung ist, dass der Roboter nach einem durch ein Hindernis im Schutzfeld erzwungenen Stopp mindestens zwei Sekunden warten muss und erst im Anschluss die Fahrt wiederaufnehmen darf (vgl. [DIN-3691, S. 25]). Hinzu kommen weitere Parameter, die wie schon beim Menschen den Kommissionierprozess beeinflussen. So sind sowohl die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters als auch die Zeit zum Picken eines Artikels relevant. Wie auch beim Menschen wird beim Roboter davon ausgegangen, dass er je Pick einen Artikel entnehmen kann<sup>20</sup>.

Im Zuge des Kommissionierprozesses entscheidend ist zudem die Aufgabe der Leitsteuerung der mobilen Roboter. Diese umfasst die Auftragszuweisung, die im Rahmen des Untersuchungsmodells zentral für Mensch und Roboter abläuft (vgl. Abschn. 4.8). Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist der Umgang mit Interaktionen und den daraus resultierenden Entscheidungen, die ein Roboter treffen muss. Diese können zentral durch eine Leitsteuerung entschieden werden oder dezentral durch den jeweiligen Roboter selbst. Im Untersuchungsmodell soll von einer dezentralen Entscheidungsfindung ausgegangen werden.

<sup>20</sup> Eine detaillierte Herleitung der Pickzeit wird in Anhang A beschrieben.

Dies lässt sich mit dem Zielbild von autonomen Logistikrobotern begründen, die selbstständig Entscheidungen treffen sollen. Der Input an Informationen kann dabei über die eigene Wahrnehmung des näheren Umfelds erfolgen oder aber durch die Kommunikation mit anderen Robotern im System. Den letzteren Fall bildet das Untersuchungsmodell zwar noch nicht ab, er stellt aber durchaus ein Potenzial zukünftiger Forschungen dar. Die Tabelle 4-3 fasst die parametrierbaren Eigenschaften des Roboters zusammen.

Tabelle 4-3: *Gestaltungsparameter des Menschen*

Parameter	Bezeichnung
$a_r$	Beschleunigung des Roboters
$C_{T,r}$	Kapazität des Roboters
$L_{SF}$	Länge des Schutzfelds
$L_{WF}$	Länge des Warnfelds
$t_{greif,r}$	Greifzeit des Roboters
$t_{W,r}$	Wartezeit des Roboters
$v_r$	Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters
$W_{SF}$	Breite des Schutzfelds

### 4.5.3 Interaktionsverhalten

Der Duden definiert Interaktion als ein

*„aufeinander bezogenes Handeln zweier oder mehrerer Personen“* [Dud-o.J.].

Sobald mehr als ein Agent in einem Kommissioniersystem arbeitet, können die Agenten im Zuge des Kommissionierprozesses aufeinandertreffen, was in ein individuelles Handeln mündet. Das Handeln ist in der Realität ein stetig wiederkehrendes Ereignis, das nicht zwingend Konsequenzen für die Leistung des Kommissioniersystems zur Folge haben muss. Ist beispielsweise die Kommissioniergasse so breit, dass sich beide Personen aneinander vorbei bewegen können, resultiert aus der Interaktion zwar möglicherweise eine Handlung in Form eines Gespräches oder einer kurzen Geste, was jedoch keine Auswirkungen auf den Kommissionierprozess hat. Anders ist es, wenn zum Zeitpunkt der Interaktion ein direktes Ausweichen einer Person notwendig ist. Doch aufgrund der Flexibilität und Dynamik des Menschen hätte auch dies keinen großen Einfluss auf den Kommissionierprozess und die -leistung. Ein dritter Fall wäre, wenn zum Zeitpunkt der Interaktion beide Personen an der gleichen Stelle einen Artikel entnehmen wollen, sodass einer der beiden warten müsste. Zudem kann eine Interaktion zwischen einem Menschen und einem Roboter auftreten,

bei der der Roboter zum Ausweichen gezwungen ist. Da der Roboter im Vergleich zum Menschen weniger flexibel und dynamisch agieren kann, können Umfahrungen und Ausweichbewegungen des Roboters einen negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Kommissioniersystems haben. Zudem kann es vorkommen, dass der Mensch durch das Umfahren des Roboters in seiner Tätigkeit gestört wird.

Demnach lässt sich festhalten, dass in einem Kommissioniersystem zwei unterschiedliche Arten von Interaktionen auftreten können. Die einen haben keinen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Kommissioniersystems, die anderen jedoch schon. Für eine Berücksichtigung im Untersuchungsmodell sollen daher die Interaktionen abgebildet werden, die die Performance des Systems beeinflussen. Eine Interaktion kann sich dabei in zwei Handlungen widerspiegeln: zum einen im Warten und zum anderen im Ausweichen. Beide Handlungen sollen eine mögliche Kollision mit einem Hindernis vermeiden. Der Mensch verfügt durch seine intuitive Wahrnehmung über die Fähigkeit, Hindernisse zu erkennen und autonom zu entscheiden, ob Warten oder Ausweichen die richtige Reaktion darstellt. Gleiches versucht man in der Entwicklung von Robotern zu erreichen, um ihnen ebenfalls diesen Entscheidungsspielraum zu geben.

Eine mögliche Kollision ist damit ein allgegenwärtiges Ereignis im Zuge eines Kommissionierprozesses, auf das die Agenten entsprechend reagieren müssen. Die Abbildung 4-7 zeigt die drei möglichen Ausprägungen einer Kollision zwischen zwei individuellen Agenten<sup>21</sup>.

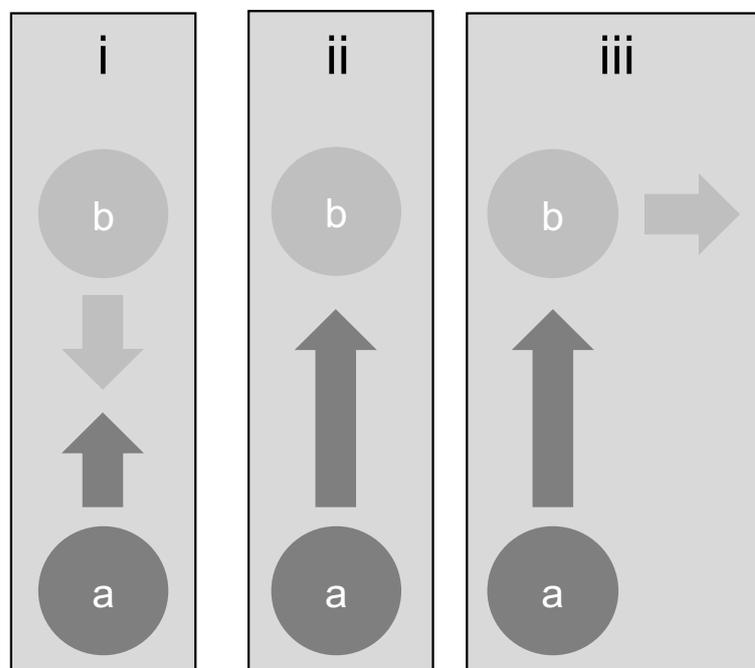


Abbildung 4-7: Drei Arten einer möglichen Kollision. Eigene Darstellung in Anlehnung an [fml-2020]

<sup>21</sup> Es können natürlich auch Kollisionen mit mehr als zwei Agenten entstehen. Diese gilt es durch eine geeignete Verkettung von Abläufen aufzulösen

Die erste Art einer möglichen Kollision resultiert aus der entgegengesetzten Bewegung zweier Agenten. In diesem Fall ist ein Ausweichvorgang von einem der beiden zwingend erforderlich, da es sonst entweder zu einem Zusammenstoß kommt oder die Agenten nach einem Halt ihre Bewegung nicht fortsetzen können. Ob und wie die beiden Agenten mit dieser Situation im Modell umgehen, wird im weiteren Verlauf näher beschrieben. Im zweiten Fall steht eine Kollision bevor, da sich Agent (a) bewegt, Agent (b) jedoch steht<sup>22</sup>. Der Hintergrund des Stillstands ist zunächst irrelevant. Dies kann sein, weil Agent (b) sich selbst in der Situation einer frontalen Kollision (i) befindet oder gerade einen Pickvorgang ausführt. Die Reaktion des sich bewegenden Agenten (a) wäre damit, auf die Fortbewegung des Agenten (b) zu warten oder auszuweichen. Der letzte Fall unterstellt abermals eine Fortbewegung beider Agenten. Allerdings erfolgt die Bewegung des zweiten Agenten (b) in eine andere Richtung, sodass eine kontinuierliche Bewegung von (a) nicht möglich ist, aber Agent (b) sich zeitnah aus dem Bewegungsfeld von Agent (a) entfernt. Auch hier sind das Warten oder das Ausweichen von Agent (a) zwei mögliche Reaktionen. (vgl. [fml-2020])

Aus diesen drei möglichen Kollisionsoptionen lässt sich der Ablaufprozess zur Einordnung der Kollision ableiten (vgl. Abb. 4-8).

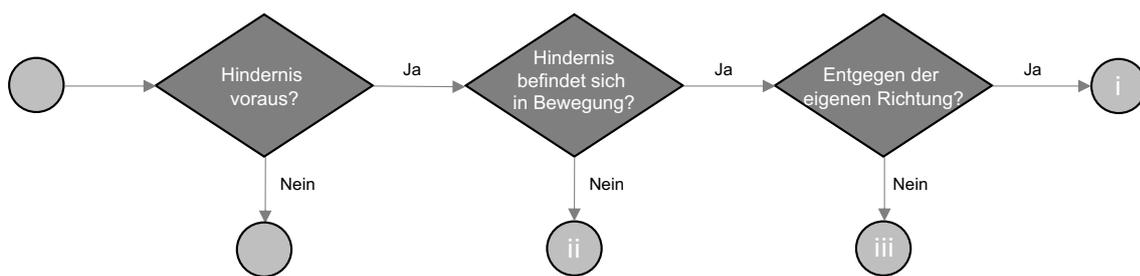


Abbildung 4-8: Ablaufdiagramm zur Bestimmung der Kollision

Da es sich bei dem Menschen und dem Roboter um Agenten handelt, die unterschiedlich konzipiert sind, muss auch der Umgang der beiden Agenten mit den drei Kollisionstypen unterschiedlich gestaltet sein. Nachfolgend soll näher auf die spezifische Gestaltung eingegangen werden.

### Mensch-Roboter-Begegnung

Das Verhalten von Mensch und Roboter im Rahmen einer bevorstehenden Kollision wird maßgeblich von den jeweiligen Charakteristika bestimmt. Dem Menschen kann, wie oben beschrieben, eine hohe Flexibilität und Dynamik unterstellt werden. Der Roboter hingegen unterliegt höheren Sicherheitsanforderungen, sodass die implementierte Sicherheitstechnik bei bevorstehenden Hindernissen ein passives Verhalten hervorruft. Dies soll im Unter-

<sup>22</sup>Der zweite Fall tritt auch ein, wenn Agent (b) sich mit einer geringeren Geschwindigkeit in die gleiche Richtung wie Agent (a) bewegt.

suchungsmodell abgebildet werden, indem die drei Grundarten der Kollision aus Abbildung 4-7 um zwei zusätzliche Kollisionen ergänzt werden (vgl. Abb. 4-9).

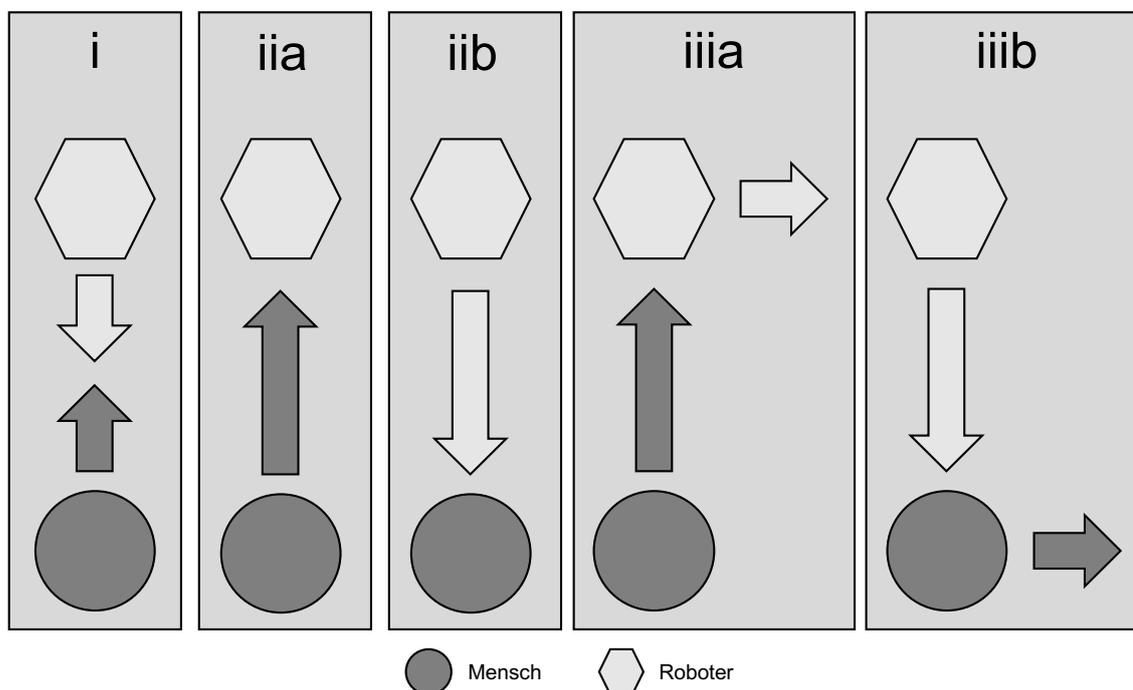


Abbildung 4-9: Alle Konstellationen einer bevorstehenden Kollision zwischen Mensch und Roboter

Unter Berücksichtigung von *Fall (i)* würden beide Agenten ihre Bewegung entsprechend ihrer Sicherheitszonen für einen Moment unterbrechen. Der Roboter würde beim Eintreten des Menschen in sein Schutzfeld stoppen. Der Mensch erkennt, dass der Roboter sich weiter in seine Richtung bewegen möchte, sodass er umgehend zu einem Ausweichvorgang ansetzt. Während der Mensch sich bereits im Ausweichvorgang befindet, würde der Roboter seine Umgebung erneut auf Hindernisse überprüfen. Da der Mensch sich in der Zwischenzeit nicht mehr in Fahrrichtung des Roboters befindet, kann dieser seine Fahrt fortsetzen. Beide Agenten haben demnach eine Kollision im *Fall (i)* vermieden (vgl. Abb. 4-10).

Im *Fall (iia)* nähert sich der Mensch einem stehenden Roboter. In den meisten Fällen beruht der Stillstand darauf, dass der Roboter gerade einen Pickvorgang durchführt. Alternativ ist jedoch auch denkbar, dass der Roboter vor einem besetzten Depot wartet oder aufgrund einer anderen Interaktion bereits zum Stillstand gekommen ist. Unabhängig davon nähert sich der Mensch dem Roboter und im Gegensatz zu *Fall (i)* pausiert der Mensch nicht, sondern setzt unmittelbar zum Ausweichvorgang an, da er annimmt, dass eine Fortsetzung der Bewegung des Roboters nicht zeitnah erfolgen wird. Damit vermeidet der Mensch eine Kollision mit dem stehenden Roboter (vgl. Abb. 4-11).

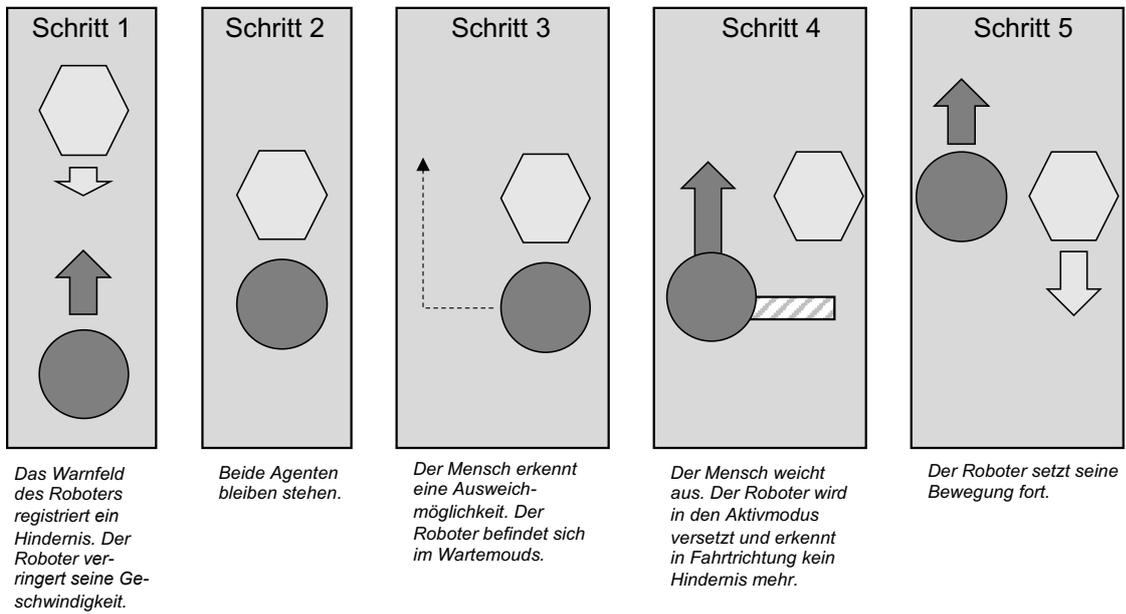


Abbildung 4-10: Grundverhalten beider Agenten bei einer Kollision des Typs i

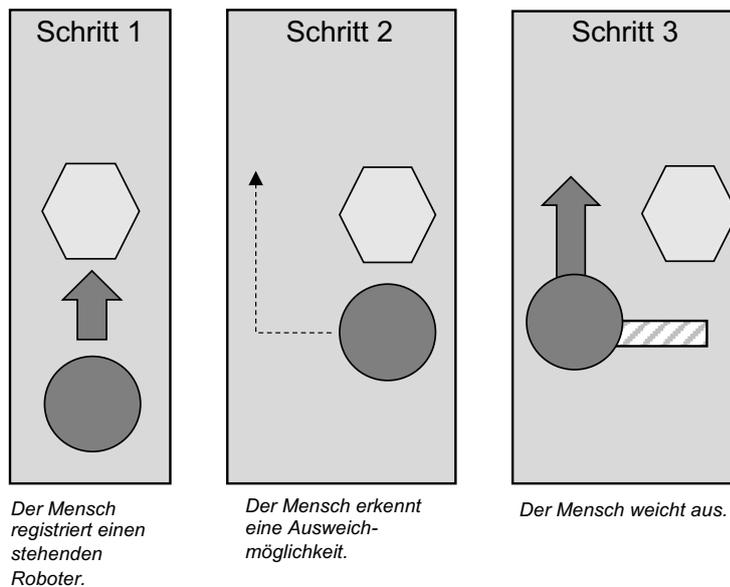


Abbildung 4-11: Grundverhalten beider Agenten bei einer Kollision des Typs iia

Der Fall (iib) beschreibt ein dem Fall (iia) entgegengesetztes Szenario, indem sich nun der Roboter dem stehenden Menschen nähert. Die ersten Schritte verlaufen analog zu Fall (i), indem der Roboter ebenfalls zum Stehen kommt. Sollte der Mensch nach Ablauf der benötigten Zeit zur Verarbeitung der Informationen des Roboters nach wie vor an der gleichen Stelle stehen, wird der Roboter dem Menschen ausweichen. Dieses Handeln lässt sich damit begründen, dass der Roboter nicht in der Lage ist, Hindernisse zu unterscheiden. Demnach kann er nicht beurteilen, ob es sich um ein dynamisches Hindernis (einen Agenten) oder um ein statisches Hindernis (bspw. einen Ladungsträger) handelt. Da bei einem statischen Hindernis die Möglichkeit besteht, dass dieses längere Zeit an einem Standort verbleibt, muss der Roboter ausweichen (vgl. Abb. 4-12).

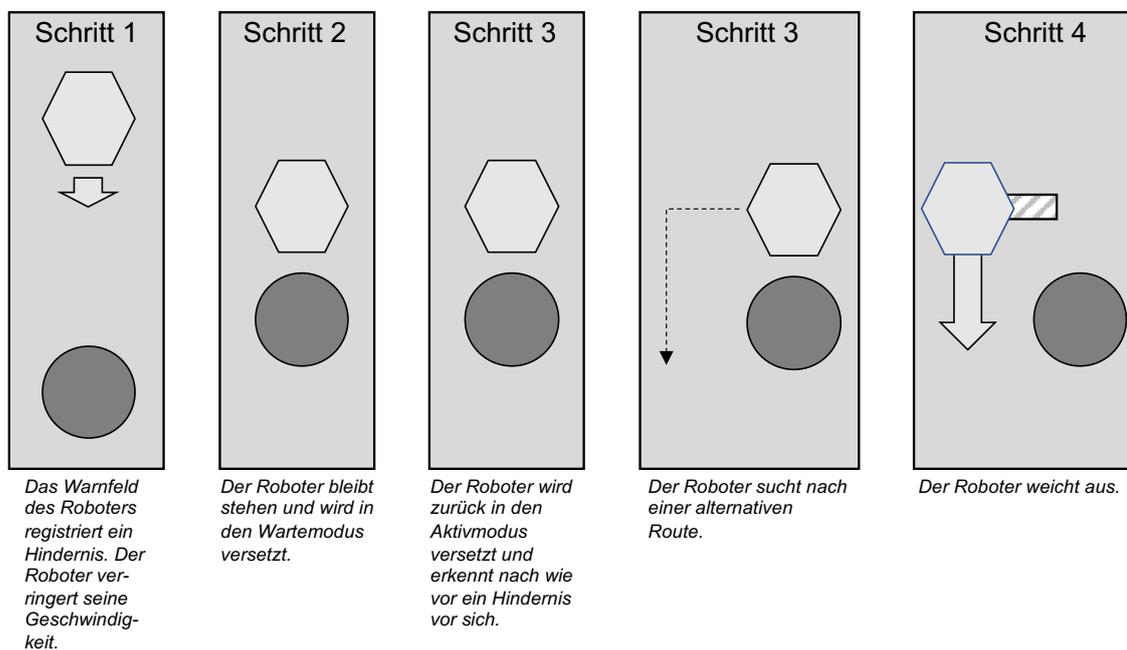


Abbildung 4-12: Grundverhalten beider Agenten bei einer Kollision des Typs iib

Der dritte Fall unterteilt sich, wie Fall (ii), in die Varianten a und b. Dieser zeigt die Interaktion bei einem Kreuzungsverkehr. Im Fall (iiia) kreuzt der Mensch die Bewegungsrichtung des Roboters und steht kurz vor einer seitlichen Kollision mit diesem. Daher bleibt der Mensch analog zu Fall (i) kurz stehen. Der Unterschied zu Fall (i) ist hier jedoch, dass der Mensch erkennt, dass der Roboter seine Bewegungsrichtung nur kreuzt und demnach in Kürze eine Fortbewegung möglich sein sollte. Daher wartet der Mensch, bis der Weg frei ist und setzt anschließend seine Bewegung fort (vgl. Abb. 4-13). Fall (iiib) verläuft ähnlich. Da der Roboter jedoch die Bewegung des Menschen nicht antizipieren kann, erkennt er lediglich, dass ein Hindernis im Weg ist. Im praktischen Betrieb würden jedoch der Stopp und die Schaltzeit des Roboters dazu führen, dass sich der Mensch in der Zwischenzeit aus dem Umfeld des Roboters entfernt, sodass dieser seine Fahrt fortsetzen kann (vgl. Abb. 4-14).

Mit den dargestellten Szenarien lassen sich alle denkbaren Kollisionsereignisse zwischen Mensch und Roboter abbilden. Die einzelnen Schritte, die die Agenten durchlaufen, um eine

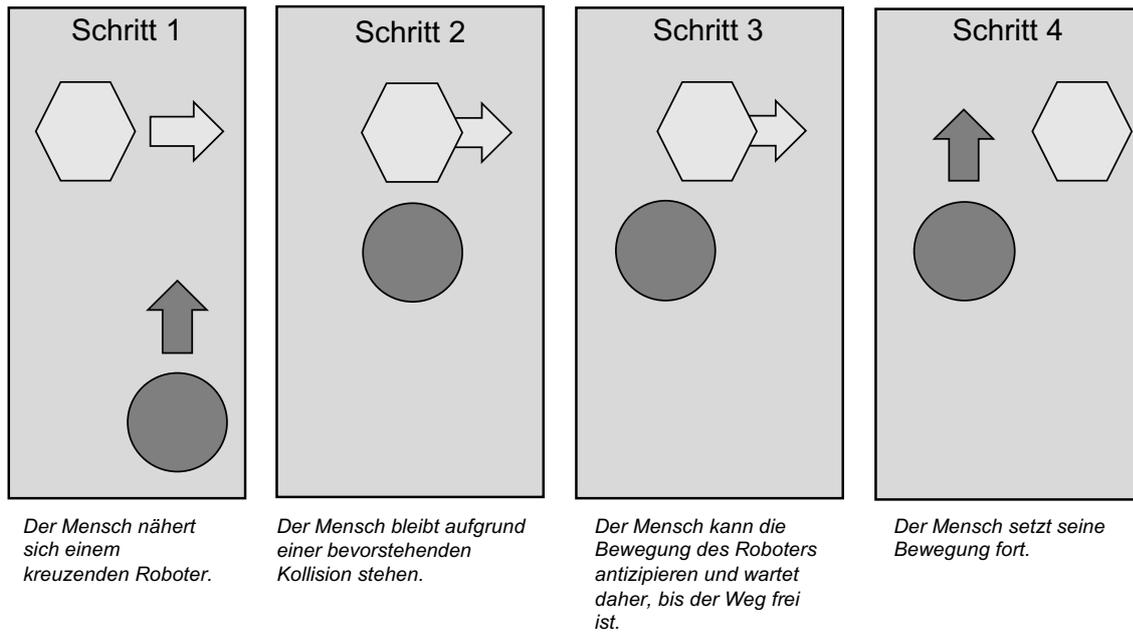


Abbildung 4-13: Grundverhalten beider Agenten bei einer Kollision des Typs iia

Kollision zu verhindern, sind an die individuellen Eigenschaften von Mensch und Roboter angepasst und entsprechen damit dem in der Realität zu erwartenden Verhalten. Allerdings sind in der Praxis Interaktionen mit mehr als zwei Beteiligten zu erwarten. Da in diesem Fall vielfältige Kombinationsmöglichkeiten entstehen können, ist eine Beschreibung aller Möglichkeiten nicht zielführend. Deshalb gilt es, zur Umsetzung dieser Verhaltensmuster in einem ausführbaren Modell sicherzustellen, dass die Interaktionen auch mit mehr als zwei Agenten realisierbar sind.

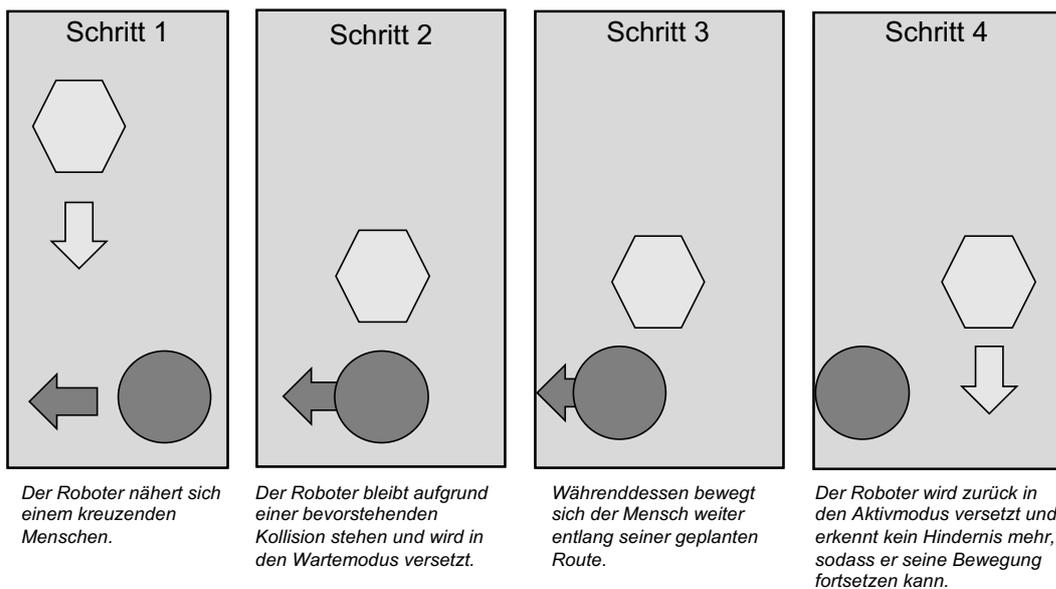


Abbildung 4-14: Grundverhalten beider Agenten bei einer Kollision des Typs iib

Darüber hinaus kommt es neben Interaktionen zwischen einem Menschen und einem Roboter auch dazu, dass jeweils zwei Menschen oder zwei Roboter aufeinandertreffen. Wie in diesen Fällen Kollisionen vermieden werden, wird im Folgenden näher beschrieben.

### **Mensch-Mensch-Begegnungen**

Sobald mehr als eine Person in einem hybriden System parallel arbeitet, kann es zu Kollisionen zwischen ihnen kommen. Das individuelle Verhalten in *Fall (ii)* und *Fall (iii)* läuft analog zu den zuvor beschriebenen Szenarien ab. Lediglich *Fall (i)* stellt eine Besonderheit dar. In diesem Fall bewegen sich zwei Menschen aufeinander zu. Der Mensch ist in der Lage so zu handeln, dass eine solche Kollision in irgendeiner Form verhindert wird. Dies geschieht in erster Linie dadurch, dass die beteiligten Personen versuchen, das Verhalten und die Bewegungsrichtung des anderen zu prognostizieren. Sollte mindestens eine der Personen erkennen, dass es auf Basis der zu erwartenden Bewegungsrichtungen zu einer Kollision kommen kann, erfolgt ein Ausweichvorgang (vgl. [Hoo-2003, S. 156; Cam-2014, S. 465]). In dem ausführbaren Modells sollte daher sichergestellt sein, dass mindestens einer der Menschen die bevorstehende Kollision wahrnimmt und dementsprechend einen Ausweichvorgang einleitet.

### **Roboter-Roboter-Begegnungen**

Ähnlich wie bei Interaktionen zwischen zwei Menschen, bedarf es bei Begegnungen zwischen zwei Robotern einer gesonderten Betrachtung des *Falls (i)* (vgl. Abb. 4-9). Es konnte gezeigt werden, dass Menschen in der Lage sind, das Verhalten einer sich ihnen gegenüber befindlichen Personen zu antizipieren und dies als Grundlage des eigenen Handelns zu nutzen. Diese Fähigkeit kann bei einem Roboter nicht vorausgesetzt werden. Daher erfolgt der Prozessablauf ähnlich dem zwischen einem Menschen und einem Roboter. Beide Roboter unterbrechen zunächst ihre Bewegung. Da davon auszugehen ist, dass beide nicht zeitgleich ihre Bewegung unterbrechen, reagiert einer der beiden zuerst und kann daher mit dem Ausweichvorgang beginnen. Im ausführbaren Modell ist sicherzustellen, dass genügend Zeit zwischen dem Beginn des Ausweichvorgangs des ersten Roboters und dem Beginn weiterer Aktionen des zweiten Roboters liegt. Damit kann vermieden werden, dass beide Roboter mehrfach versuchen, sich gegenseitig auszuweichen. Die Tabelle 4-4 fasst alle hierbei relevanten Verhaltensmuster zusammen.

In diesem Unterabschnitt wurde umfassend die Modellierung der beiden Agenten beschrieben. Für den Menschen konnte ein Konzept zur Abbildung einer realen Verhaltensweise identifiziert und erweitert werden, dessen Ursprünge in der menschlichen Bewegung im öffentlichen Raum liegen. Es konnte gezeigt werden, dass die beschriebenen Ansätze auf die

Tabelle 4-4: Zusammenfassung der Interaktionsvarianten

Szenario	Bewegungsunterbrechung	Wartevorgang	Ausweichen
<i>Fall i (M/R)</i>	Beide	Beide	Mensch
<i>Fall i (M1/M2)</i>	Beide	Keiner	Einer
<i>Fall i (R1/R2)</i>	Beide	Beide	Einer
<i>Fall iia (M/R)</i>	Mensch	Keiner	Mensch
<i>Fall iia (M1/M2)</i>	Mensch 1	Keiner	Mensch 1
<i>Fall iib (R/M)</i>	Roboter	Roboter	Roboter
<i>Fall iib (R1/R2)</i>	Roboter 1	Roboter 1	Roboter 1
<i>Fall iia (M/R)</i>	Mensch	Mensch	Keiner
<i>Fall iia (M1/M2)</i>	Mensch 1	Mensch 1	Keiner
<i>Fall iib (R/M)</i>	Roboter	Roboter	Keiner
<i>Fall iib (R1/R2)</i>	Roboter 1	Roboter 1	Keiner

Kommissionierung anwendbar sind. Der Roboter wurde so konzipiert, dass mit einer entsprechenden Parametrierung eine Vielzahl an unterschiedlichen Varianten modelliert und untersucht werden kann. Die notwendigen Charakteristika zum Interaktionsverhalten wurden zudem den relevanten Richtlinien und Normen entnommen sowie erweitert (vgl. Unterabschnitt 4.5.2). Es wurden dabei alle möglichen Begegnungsformen berücksichtigt und ein individuelles Verhalten für beide Agenten entwickelt. Diese Verhaltensweisen müssen schließlich in ein ausführbares Modell überführt werden. Zuvor wird jedoch in den nächsten Abschnitten näher auf das Layout und die Lagertechnik sowie die Sortimentsgestaltung und das Auftragsmanagement eingegangen.

## 4.6 Layout und Lagertechnik

### 4.6.1 Layoutvariation

Das Layout eines Kommissioniersystems nimmt auf dessen Prozesse und Abläufe maßgeblich Einfluss. Wie häufig in der Literatur wird in dieser Arbeit ein Blocklayout vorausgesetzt. Ein Block besteht dabei aus einer definierten Menge an Lagergassen, die alle die gleichen Abmessungen hinsichtlich Breite und Länge haben. Ein Kommissioniersystem kann zudem aus einem oder mehreren Blöcken bestehen, wobei zwei Blöcke stets durch eine Quergasse getrennt sind (vgl. Abb. 4-15).

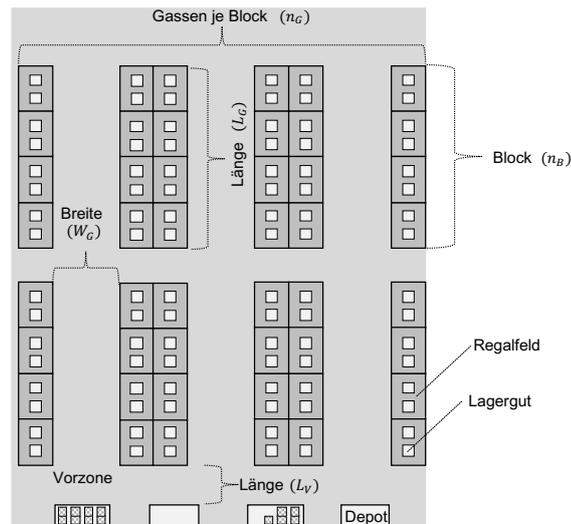


Abbildung 4-15: Exemplarische Darstellung eines Layouts mit den relevanten Gestaltungsparametern

Die Breite einer Kommissioniergasse ist in dem hier zugrunde gelegten Modell, wie in der Realität, flexibel definierbar. Ähnlich flexibel ist die Gestaltung der Vorzone, die die Verkehrsfläche zwischen Depot und Kommissioniergassen darstellt. Zwar ist die Breite durch die Breite des Gesamtsystems vorgeschrieben, allerdings ist der Abstand zwischen Gasenende und Depot flexibel anpassbar. Die Tabelle 4-5 fasst die relevanten Parameter für die generelle Layoutgestaltung zusammen.

Tabelle 4-5: Gestaltungsparameter des Layouts

Parameter	Bezeichnung
$L_G$	Länge der Kommissioniergasse
$L_V$	Länge der Vorzone
$n_B$	Anzahl an Lagerblöcken
$n_G$	Anzahl an Gassen je Block
$W_G$	Breite der Kommissioniergasse

#### 4.6.2 Depot

Am Depot beginnt und endet die jeweilige Kommissioniertour mit einem Rüstvorgang. Für das Untersuchungsmodell werden zwei Positionen des Depots berücksichtigt. Entweder befindet sich das Depot am unteren Ende des Layouts<sup>23</sup> oder, bei einem Multi-Block-System, am linken Rand auf Höhe einer Quergasse (vgl. Abb. 4-16).

<sup>23</sup>In der Regel befindet sich das Depot am unteren linken Rand. Manche Untersuchungen definieren seine Position auch zentral unten. Häufig spielt dabei die Artikelbelegung eine Rolle.

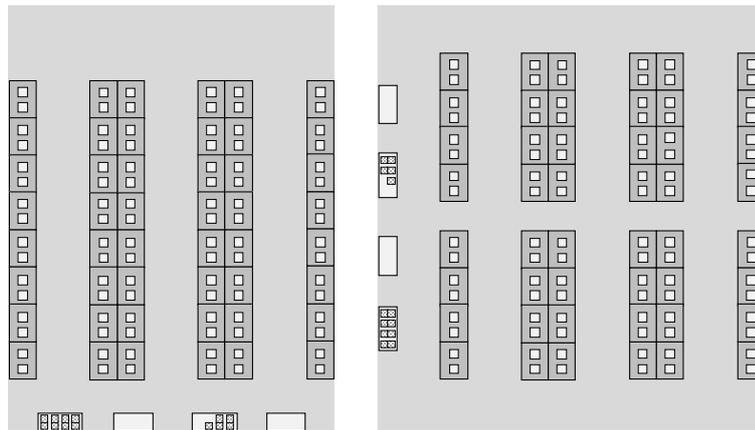


Abbildung 4-16: Anordnungsmöglichkeiten eines Depots

In bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen wurde die notwendige Anzahl an Depots und deren Kapazität vernachlässigt. Da jedoch davon auszugehen ist, dass die Verfügbarkeit der Depots Einfluss auf die Systemleistung haben wird, soll diese Frage im Untersuchungsmodell aufgegriffen werden. Dies gelingt durch die Variation der Anzahl der Agenten. Allerdings besteht eine über die gesamte Schicht fixe Zuordnung zwischen einem Agenten und einem Depot. Ein flexibles Wechseln zwischen einzelnen Depots, ggf. sogar zwischen Start und Ende einer Tour, wird aus zwei Gründen vernachlässigt. Zum einen erhöht es merklich die Modellkomplexität und den Aufwand der Rechenzeit, wodurch ein Zielkonflikt zur *Anforderung 5* besteht (vgl. Abschn. 4.1). Zum anderen ist ein solcher Wechsel von Start- und End-Depot in der Praxis eher unüblich, wodurch eventuelle Erkenntnisse aus dem Untersuchungsmodell keine Relevanz für die Praxis liefern. Durch den unmittelbaren Start- und Endpunkt einer Kommissioniertour ist das Depot ebenfalls direkt mit der Systemgrenze des Kommissioniersystems verbunden. Daher sei an dieser Stelle noch einmal auf den Abschnitt 4.3 verwiesen, in dem die Systemgrenzen näher beschrieben werden. Nachgelagerte Handhabungsschritte (bspw. Verpackung, Umlagern auf Fördertechnik oder Transportsysteme) sind nicht Bestandteil des Systemelements Depot und werden daher nicht berücksichtigt. Zeitliche Unterschiede in der Handhabung nachgelagerter Prozesse lassen sich jedoch mittels der variablen Rüstzeit nachbilden. Tabelle 4-6 greift die zu variierenden Parameter nochmals auf.

### 4.6.3 Lagertechnik

Die in Kommissioniersystemen einzusetzende Lagertechnik ist sehr vielseitig und hängt von vielen Faktoren ab. Neben den Anforderungen der zu lagernden Artikel hinsichtlich Abmessung, Gewicht oder Durchsatz spielen auch Faktoren wie die Kommissionierart (bspw. Pick-by-Light) oder die Art der Bereitstellung von Nachschub eine entscheidende Rolle bei der Wahl der Lagertechnik. *Ten Hompel et al.* haben die Vielzahl an Gestaltungsmöglichkeiten beschrieben und miteinander verglichen (vgl. [Hom-2011, S. 65 ff.]. Aktuelle Ansätze

Tabelle 4-6: *Gestaltungsparameter des Depots*

Parameter	Bezeichnung
$n_D$	Anzahl an Depots im Layout
$P_D$	Position des Depots
$t_{RE,m}$	Rüstzeit des Menschen zum Ende der Kommissioniertour
$t_{RE,r}$	Rüstzeit des Roboters zum Ende der Kommissioniertour
$t_{RS,m}$	Rüstzeit des Menschen zu Beginn der Kommissioniertour
$t_{RS,r}$	Rüstzeit des Roboters zu Beginn der Kommissioniertour

der mobilen Robotik werden vornehmlich in Systemen mit Fachboden-Regalanlagen eingesetzt. Dies liegt vornehmlich daran, dass der Roboter bei einem Fachboden abgrenzbare und ähnliche Positionen des Lagerguts vorfinden kann. Bei einer Entnahme direkt von Europaletten, befindet sich der nächste Artikel stets an einer anderen Position. Fachbodenregale variieren sowohl in Länge, Breite und Höhe als auch in der Anordnung einzelner Fachböden. Beispielhaft wird im Rahmen dieser Untersuchung lediglich die Höhe der einzelnen Regalebenen variierbar sein. Dies wird vor allem bei der Berechnung der jeweiligen Pickzeiten berücksichtigt. Die Länge und Breite einzelner Regalfelder wird aus den Abmessungen des Gesamtlayouts abgeleitet. Darüber hinaus wird angenommen, dass alle Regale innerhalb eines Systems hinsichtlich ihrer Abmessungen und der Aufteilung ihrer Fachböden identisch sind. Die Gestaltungsparameter zur Lagertechnik sind in Tabelle 4-7 zusammengefasst.

Tabelle 4-7: *Gestaltungsparameter der Lagertechnik*

Parameter	Bezeichnung
$n_{FB}$	Anzahl an Fachböden je Regalelement
$H_{FB,i}$	Lichte Höhe von Fachboden $i$

## 4.7 Sortimentsgestaltung

Das Sortiment kann je nach Branche und Unternehmensgröße aus einer Vielzahl an Klassen mit einer nahezu unbegrenzten Menge an Artikeln bestehen. Um im Rahmen weiterer Untersuchungen das Sortiment nicht auf der Einzelartikel-Ebene zu betrachten, gilt es auch in diesem Kontext geeignete Vereinfachungen zu treffen. Dafür wird das Sortiment hinsichtlich des Durchsatzes in A-, B- und C-Artikel geclustert. Darüber hinaus werden die Masse

und das Volumen der Artikel berücksichtigt. Dies spielt insbesondere bei der Berechnung der Pickzeit für den Menschen eine Rolle (vgl. Anhang A).

Für den Roboter spielt der Anteil an kommissionierbaren Artikeln ebenfalls eine wesentliche Rolle, denn es ist nicht zwingend der Fall, dass er das gesamte Sortiment greifen kann. Daher gilt auch hier, im Rahmen der Modellentwicklung sicherzustellen, dass der Anteil an greifbaren Artikeln variiert werden kann.

Sonstige Charakteristika, wie beispielsweise ein Mindesthaltbarkeitsdatum o. Ä., welche eine gesonderte Auslagerungsstrategie einzelner Artikelgruppen erfordern, werden nicht näher berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass dies durch das WMS oder eine andere Leitsteuerung im operativen Betrieb gewährleistet wird und damit ebenfalls außerhalb der relevanten Systemgrenzen liegt. Tabelle 4-8 fasst die Gestaltungsparameter zusammen.

Tabelle 4-8: Gestaltungparameter des Sortiments

Parameter	Bezeichnung
$S_{A,b}$	Anteil an A-Artikeln im Sortiment
$S_{A,b}$	Anteil an B-Artikeln im Sortiment
$S_{A,c}$	Anteil an C-Artikeln im Sortiment
$S_{A,r}$	Anteil an Artikeln im Sortiment, die der Roboter greifen kann
$\mu_M$	Erwartungswert für die durchschnittliche Masse der Artikel
$\sigma_M$	Standardabweichung der durchschnittlichen Masse der Artikel
$\mu_V$	Erwartungswert für das durchschnittliche Volumen der Artikel
$\sigma_V$	Standardabweichung des durchschnittlichen Volumens der Artikel

## 4.8 Auftragsmanagement

Die Kommissionieraufträge bilden den Auslöser eines Kommissionierprozesses und sind somit der wesentliche Input eines Kommissioniersystems. Um ein reales System abzubilden, durchlaufen die Aufträge in einem theoretischen Untersuchungsmodell zwei wesentliche Stufen:

1. den Auftragseingang und
2. die Tourenbildung.

Beim Auftragseingang gilt es festzulegen, wie Aufträge generiert werden, wie diese in das System eingelastet werden und anhand welcher Charakteristika einzelne Aufträge unterschieden werden können. Die Tourenbildung beschäftigt sich im Anschluss mit einer optimalen Zusammenstellung der zur Verfügung stehenden Aufträge und leitet diese an die jeweils zuständigen Agenten weiter. Diese beiden Stufen werden in den folgenden Unterabschnitten detailliert beschrieben.

#### 4.8.1 Auftragseingang

Zur Darstellung des Eingangs eines Kommissionierauftrages sollen die relevanten Bestandteile einer Auftragsposition sowie die zwei Ereignisse, die einen Auftragseingang auslösen können, beschrieben werden. Eine Auftragsposition enthält als Mindestmaß an Informationen die Angabe des Artikels und dessen Pickmenge. Kombiniert mit dem Lagerort liegen dann alle relevanten Informationen vor, um einen Kommissionierprozess durchzuführen. Zusätzlich können Prioritätsklassen berücksichtigt werden, um Eilaufträge abbilden zu können.

Der Auftragseingang selbst kann von zwei wesentlichen Ereignissen ausgelöst werden. Diese beiden spiegeln auch die zwei Richtungen wider, die das Untersuchungsmodell vereinen soll. Zum einen soll das Untersuchungsmodell in der Lage sein, der Realität entsprechende Auftragseingänge darzustellen. Das bedeutet, dass über verschiedene Zeitabschnitte (bspw. Woche oder Tag) unterschiedlich viele Aufträge in das System eingehen können. Zum anderen soll das Modell flexibel genug sein, um ohne festgelegte Verteilungen Aufträge in das System einzulasten. Dies kann in einer frühen Planungsphase notwendig sein, wenn die Datenstruktur noch unklar ist. Des Weiteren ist dies notwendig, wenn theoretische Untersuchungen erforderlich sind<sup>24</sup>.

Die Berücksichtigung eines zeitlich volatilen Auftragseingangs wird im Rahmen des Untersuchungsmodells als *Push-Prinzip* bezeichnet. Dabei werden, unabhängig von den vorhandenen Kapazitäten (Anzahl an Agenten) in definierten Abständen Aufträge in das System eingelastet. Damit lassen sich insbesondere die Auslastung der Agenten sowie Auftragsrückstände zu bestimmten Tagen und Zeiten detailliert ermitteln. Zusätzlich soll ein *Pull-Prinzip* implementiert werden, bei dem die Agenten selbst, sobald diese im Depot einen Kommissionierauftrag abgeschlossen haben, einen neuen Auftragseingang anstoßen. Für dieses Verfahren werden deutlich weniger Parameter benötigt, sodass es sich insbesondere in der frühen Planungsphase oder für theoretische Untersuchungen eignet. Die Gestaltungsparameter des Auftragseingangs sind in Tabelle 4-9 zusammengefasst.

---

<sup>24</sup>Zwar gibt es Studien, die versuchen den Auftragseingang von Unternehmen aus dem E-Commerce zu generalisieren, allerdings weichen die Ergebnisse zu stark voneinander ab, als dass sie als Grundlage von theoretischen Untersuchungen genutzt werden könnten (vgl. [Kla-2019; Bun-2017]).

Tabelle 4-9: Gestaltungparameter des Auftragseingangs

Parameter	Bezeichnung
$K_A$	Gestaltung des Auftragseingangs
$n_{PK}$	Anzahl an Prioritätsklassen
$S_{FS}$	Auftragsverteilung für die Frühschicht
$S_{NS}$	Auftragsverteilung für die Nachtschicht
$S_{PK,j}$	Anteil Prioritätsklasse $j$ am Auftragseingang
$S_{S,a}$	Anteil an A-Artikeln am Auftragseingang
$S_{S,b}$	Anteil an B-Artikeln am Auftragseingang
$S_{S,c}$	Anteil an C-Artikeln am Auftragseingang
$S_{TS}$	Auftragsverteilung für die Tagschicht
$S_{WT,i}$	Auftragsverteilung über den Wochentag $i$
$t_{PK,j}$	Maximale Durchlaufzeit für die Prioritätsklasse $j$

#### 4.8.2 Tourenbildung

Die Bildung von einzelnen Touren ist eines der Kernelemente des Untersuchungsmodells. Damit die zur Verfügung stehenden Aufträge möglichst effizient bearbeitet werden können, bedarf es einer geeigneten Auswahl relevanter Aufträge. Das begrenzende Element stellt dabei zunächst die verfügbare Kapazität des Agenten dar. Das bedeutet, dass aus einer Gesamtmenge  $N$  (alle Aufträge im Auftragspool) eine Teilmenge  $n$  ausgewählt werden muss, um die Kommissioniertour optimal zu gestalten<sup>25</sup>. Eine sinnvolle Zielgröße soll erreicht werden, indem die Aufträge so kombiniert werden, dass der Abstand zwischen zwei Haltepunkten möglichst gering ist. Dies entspricht im Wesentlichen dem Ansatz des VRP, der in Unterabschnitt 2.4.5 beschrieben wurde.

Für das Untersuchungsmodell sollen Heuristiken herangezogen werden, um das VRP zu lösen. Um der Diskrepanz zur optimalen Lösung eines exakten Lösungsverfahrens entgegenzuwirken, soll ebenfalls zu Beginn eine Konstruktionsheuristik angewandt werden, die im Anschluss durch die Anwendung einer Metaheuristik optimiert werden soll. Zu Beginn der Tourenbildung soll daher die Nearest-Neighbour-Heuristik herangezogen werden. Die vorgestellten Seed-Verfahren aus Unterabschnitt 2.4.5 eignen sich weniger gut, da dort von Aufträgen mit mehreren Positionen ausgegangen wird, was im Rahmen des Untersuchungsmodells ausgeschlossen wird. Die Nearest-Neighbour-Heuristik ermöglicht diese

<sup>25</sup>Hier wird die grundsätzliche Annahme getroffen, dass die Anzahl an Aufträgen im Auftragspool größer als die eigene Kapazität des Agenten ist. In der Praxis kann es natürlich vorkommen, dass die Anzahl an Aufträgen im Auftragspool kleiner ist.

positionsweise Betrachtung. Dabei besteht die Möglichkeit, dass zunächst die Position gewählt wird, die am nächsten zum aktuellen Standort oder Depot des Agenten liegt, oder eine Position mit der höchsten Priorität. Anschließend wird die Position gewählt, deren Artikel am nächsten zur aktuellen Position liegt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die Kapazität des Agenten erschöpft ist. Für den Roboter gilt zudem die Einschränkung, dass nur Positionen in die Tour aufgenommen werden, deren Artikel für den Roboter greifbar sind. Die Umsetzung der Nearest-Neighbour-Heuristik ist in Abbildung 4-17 dargestellt.

<b>Input</b>	$C :=$ Capacity of Agent; $W :=$ Current Order List; $w :=$ Number of Ordes
<b>Output</b>	Order Picking Tour created by NHH

```

00.   begin
01.   select  $j \in W = \{1,2,\dots,n\}$  as first Stop on Tour
02.   while Capacity  $C \neq 0$  repeat
04.       for  $k := 1$  to  $w$  do
05.           select  $k \in W = \{1,2,\dots,n\} \setminus \{j\}$  as possible Nearest Neighbour
06.            $D_{jk}$  : Distance between Nodes  $j$  and  $k$ 
07.           if  $D_{jk} > D_{jk+1}$  then
08.               select  $k+1$  as Nearest Neighbour
09.                $j := k + 1$ 
10.           exitloop
11.       end
12.       end for
12.   end

```

Abbildung 4-17: Pseudocode für die Nearest-Neighbour-Heuristik

Nachdem eine Tour erstellt wurde, gilt es, die erste Lösung mittels einer Metaheuristik zu verbessern. Hierzu wird das 2-Opt-Verfahren angewandt, eine simple und robuste Heuristik, die sich gut in die bestehende Systemlandschaft des Untersuchungsmodells integrieren lässt. Wie in Abschnitt 2.4.5 beschrieben wurde, werden im Zuge des 2-Opt-Verfahrens zwei Kanten gegeneinander vertauscht und es wird überprüft, ob dadurch eine bessere Lösung generiert werden kann. Dies wird so lange wiederholt, bis keine weitere Verbesserung mehr eintritt. Die Umsetzung des 2-Opt-Verfahrens kann der Abbildung 4-18 entnommen werden.

Input	n := Number of Stopps on Tour
Output	Order Picking Tour optimized by 2-opt-heuristic
00.	<b>begin</b>
01.	<b>repeat</b>
02.	$\Delta = \emptyset$
03.	<b>For</b> i:= 1 to n-2 <b>do</b>
04.	<b>For</b> j:= i+2 to n <b>do</b>
05.	$\Delta :=$
06.	<b>If</b> $\Delta < \emptyset$
07.	<i>Swap Nodes and repeat from beginning</i>
08.	<b>end</b>
09.	<b>end for</b>
10.	<b>end for</b>
11.	<b>until</b> $\Delta = \emptyset$

Abbildung 4-18: Pseudocode für das 2-Opt-Verfahren

## 4.9 Fazit zur Konzeption des Untersuchungsmodells

Das Ziel dieses Kapitels war die Entwicklung eines Untersuchungsmodells unter Berücksichtigung aller relevanten Bestandteile eines hybriden Kommissioniersystems. Das Untersuchungsmodell selbst soll in der Lage sein, hybride Kommissioniersysteme sowohl in einem theoretischen als auch in einem praktischen Umfeld abzubilden, sie zu untersuchen und Ergebnisse hervorzubringen, die es ermöglichen, daraus allgemeingültige Betriebsstrategien abzuleiten. Dazu werden zu Beginn dieses Kapitels Anforderungen an das Untersuchungsmodell formuliert, die hier nochmals aufgegriffen werden sollen. Die erste Anforderung sieht vor, dass die jeweiligen Charakteristika von Mensch und Roboter berücksichtigt werden. Für den Menschen wird das *SFM* herangezogen. Es kann gezeigt werden, dass es durchaus Gemeinsamkeiten zwischen der Bewegung eines Menschen im öffentlichen Raum und seiner Bewegung in einem Kommissioniersystem gibt. Daher sind die wesentlichen Aspekte des *SFM* auf dessen Anwendung in der Kommissionierung adaptiert und ein Framework zur Verhaltensweise des Menschen im Untersuchungsmodell geschaffen. Die Bewegungsansätze des Roboters wiederum beruhen auf diversen gültigen Normen und Richtlinien der Industrie. Diese sind auf die Anwendung in einem Kommissioniersystem und dem Untersuchungsmodell hin erweitert. Die wesentlichen Verhaltensweisen beider Agenten bilden im Anschluss die Grundlage zur Entwicklung des Interaktionsverhaltens zwischen Mensch und Roboter. In diesem Zuge ist ein mögliches Interaktionsverhalten zwischen Mensch und Roboter sowie des gleichen Agententyps untereinander berücksichtigt. Damit ist die erste Anforderung an das Untersuchungsmodell erfüllt.

Die zweite Anforderung verlangt, dass das Untersuchungsmodell unterschiedliche Systemvarianten abbilden kann. Dies ist durch die generische Entwicklung des Layouts und der Lagertechnik erreicht. Dabei berücksichtigt das Modell alle gängigen Variationen des Layouts und der Depotanordnung. Des Weiteren ist auf Basis von relevanten Charakteristika eine umfassende Sortimentsgestaltung realisiert. Abgerundet sind die Systemvarianten durch einen flexiblen Einsatz der Agenten, sodass das Untersuchungsmodell auch die zweite Anforderung erfüllt.

Die dritte Anforderung liegt in einer geeigneten Abstraktion der relevanten Auftragsdaten. Dazu sind im Untersuchungsmodell zwei generelle Ansätze zur Auftragsgestaltung entwickelt. Die *Push-Variante* entspricht dabei dem Ansatz, dass durch ein übergeordnetes System kontinuierlich in definierbaren Zeitabständen Aufträge in das Kommissioniersystem eingelastet werden, wodurch sich vor allem individuelle Systeme detailliert untersuchen lassen. So ist es bspw. möglich festzustellen, wie die Auslastung der einzelnen Agenten über den Tag verteilt ist. Die *Pull-Variante* sieht im Prozessablauf vor, dass der jeweilige Agent selbst durch das Beenden einer Kommissioniertour neue Aufträge in das System einlastet. Damit lassen sich zwar Auslastungen über einen längeren Zeitraum weniger gut untersuchen. Allerdings ermöglicht dieser Ansatz im Zuge von Experimenten und damit sich verändernden Parametergrößen wie dem Layout oder der Anzahl an Agenten eine hinreichend genaue Berücksichtigung der Auftragslage, sodass das Untersuchungsmodell auch die dritte Anforderung erfüllt.

Die vierte Anforderung betrifft die differenzierte Analyse beider Agenten im Untersuchungsmodell. Dies ist möglich durch die unterschiedliche Modellierung und Parametrierung beider Agenten. Darüber hinaus sind die relevanten Leistungskennzahlen für das Untersuchungsmodell bestimmt. Diese Kombination ermöglicht im weiteren Untersuchungsverlauf eine differenzierte Betrachtung beider Agenten und der Einflüsse auf deren Leistungsfähigkeit. Damit ist auch die vierte Anforderung erfüllt.

Die letzte Anforderung sieht vor, dass das Untersuchungsmodell nachvollziehbare und deterministische Ergebnisse liefert. Bei der Entwicklung des Untersuchungsmodells ist insbesondere Wert darauf gelegt worden, nur die wesentlichen und notwendigen Bestandteile eines hybriden Kommissioniersystems in das Untersuchungsmodell zu implementieren und an geeigneten Stellen sinnvolle Systemgrenzen zu definieren. Da die Auswahl der Bestandteile sowie das Vorgehen in diesem Kapitel umfassend beschrieben sind, kann zudem die vorausgesetzte Nachvollziehbarkeit bestätigt werden, sodass auch die fünfte Anforderung erfüllt ist. Das deterministische Verhalten kann erst mit der Überführung in ein ausführbares Modell, welches im nachfolgenden Kapitel näher beschrieben wird, vollends bestätigt werden.



## 5 Umsetzung des Untersuchungsmodells in einer Simulationsumgebung

---

In diesem Kapitel wird die Umsetzung des Untersuchungsmodells in einer Simulationsumgebung beschrieben. Dazu wird im ersten Abschnitt die Simulation von weiteren Untersuchungsmethoden abgegrenzt und erläutert, warum sie als die für das Untersuchungsmodell am besten geeignete Methode ausgewählt wurde. Darauf wird in Abschnitt 5.2 auf einige Besonderheiten bei der Implementierung des Modells eingegangen, was vor allem die Agenten sowie die Gestaltung der Verkehrswege betrifft. In Abschnitt 5.3 werden abschließend umfassende Tests zur Verifikation und Validierung des Simulationsmodells vorgenommen.

### 5.1 Ablaufsimulation als Untersuchungsmethode

Die Lösung von logistischen Fragestellungen kann anhand verschiedener Methoden verfolgt werden. *Gutenschwager et al.* nennen neben der Ablaufsimulation noch die mathematische Optimierung, Heuristiken und warteschlangentheoretische Ansätze<sup>26</sup> (vgl. [Gut-2017, S. 27 ff.]). *Ten Hompel et al.* wiederum zeigen, dass zur Leistungsberechnung von Kommissioniersystemen auch analytische Ansätze verwendet werden können (vgl. [Hom-2011, S. 127 f.]).

Um eine geeignete Untersuchungsmethode festzulegen, empfehlen *Gutenschwager et al.* die Zerlegung der Aufgabe in einzelne Teilprobleme (vgl. [Gut-2017, S. 27]). Dazu eignet sich der definierte Referenzprozess aus Abbildung 4-3 mit den Teilschritten *Rüstvorgang*, *Bewegung zur Entnahme*, *Artikelentnahme* und *Bewegung zum Depot*. Auch hier finden sich zunächst Analogien zu den einzelnen Berechnungsbestandteilen nach *ten Hompel et al.*, die bereits in den Formeln 2-2 bis 2-5 aufgeführt worden sind, sodass in diesem Fall das Untersuchungsmodell auch als analytisches Modell konzipiert werden könnte. Zu beachten ist jedoch, dass in den Berechnungsansätzen zur Wegzeit von *ten Hompel et al.* die Interaktion mit anderen Agenten im System vernachlässigt wird (vgl. [Hom-2011, S. 140 ff.]). Die Modelle unterstellen, dass der Kommissionierer auf seiner Wegstrecke auf keine anderen Personen trifft, sodass Wartezeiten oder Ausweichvorgänge nicht berücksichtigt werden müssen. Damit zeigen sich die Grenzen einer analytischen Berechnungsmethode. Die Berechnung von Zeitanteilen im Depot sowie für die Weg- und Pickzeit wäre

---

<sup>26</sup>Für eine ausführliche Beschreibung der jeweiligen Unterschiede und Potenziale sei auf [Gut-2017] und die dort genannten weiterführenden Quellen verwiesen.

möglich, jedoch würden die Interaktionen zwischen den Agenten und der daraus resultierende Zeitverbrauch nicht adäquat berücksichtigt. Der Einsatz von warteschlangentheoretischen Ansätzen könnte zwar zu genaueren Ergebnissen im Hinblick auf die Wartezeit an einzelnen Entnahmeorten oder am Depot führen, aber auch hier wären einzelne Interaktionen nicht darstellbar. Darüber hinaus gilt es zu berücksichtigen, dass die Interaktionen nicht ausschließlich zufallsverteilt auftreten, sondern die Gestaltung und der Betrieb des Kommissioniersystems, im Hinblick auf die in Abschnitt 2.4 definierten Planungsprobleme, einen maßgeblichen Einfluss haben werden. Unter Berücksichtigung dieser Umstände stellen *Gutenschwager et al.* fest:

„Sind Abhängigkeiten zwischen den Teilproblemen aber vielfältig und wird ihr jeweiliger Einfluss als stark eingeschätzt, so steigt die Notwendigkeit, Modelle zu entwickeln, die diese Abhängigkeiten explizit abbilden. [...]. Simulationsmodelle erlauben die explizite Abbildung derartiger Abhängigkeiten [...]“ [Gut-2017, S. 37 f.].

Daher kann ausschließlich ein Simulationsmodell die Interaktionen zwischen den Agenten adäquat abbilden, was eine wesentliche Anforderung an das Untersuchungsmodell darstellt (vgl. Abschn. 4.1). Die übrigen Anforderungen wie die *Variation von unterschiedlichen Systemvarianten*, die *Abstraktion von Auftragsdaten*, die *differenzierte Analyse der Einflüsse beider Agenten* sowie die *nachvollziehbare und schlanke Handhabung* können durch den Einsatz eines Simulationsmodells ebenfalls erfüllt werden. Im nachfolgenden Abschnitt soll auf einige Besonderheiten der Implementierung eingegangen werden.

## 5.2 Besonderheiten bei der Implementierung

Das Simulationsmodell wurde mit der Software *Tecnomatix Plant Simulation* in der Produktversion 14 entwickelt. Diese Software bietet eine Vielzahl an vordefinierten Bausteinen, die für den individuellen Einsatz parametrisiert werden können. So gibt es den Baustein *Fahrzeug*, bei dem man Abmessungen, Kapazitäten und Geschwindigkeit individuell anpassen kann. Ein weiterer relevanter Baustein ist die *Methode*, mit dem man Abläufe oder Regeln programmieren kann. In komplexeren Simulationsmodellen übernehmen Methoden die Steuerung und Überwachung der definierten Prozesse. Die zur Verfügung stehenden Bausteine sind jedoch in ihrer Funktionalität begrenzt. Daher bedarf es der Entwicklung eigener Systemelemente. Diese individuellen Bestandteile des Modells sollen in den nachfolgenden Unterabschnitten näher beleuchtet werden.

## Agenten

Die beiden Agenten Mensch und Roboter bilden den Mittelpunkt des Untersuchungsmodells. Ohne sie kann der Kommissionierprozess nicht durchgeführt werden. *Tecnomatix Plant Simulation* bietet in der Version 14 unter der Kategorie *Bewegliche Elemente* lediglich das *Fahrzeug*. Dieses besitzt jedoch eine Vielzahl an Parametrierungen und kann entsprechend gestaltet werden. Des Weiteren gibt es den *Werker*. Dieser gehört der Kategorie *Ressourcen* an und ist vornehmlich für die Handhabung von Maschinen entwickelt worden. Der *Werker* hat seinen eigenen Weg-Baustein und kann sich daher nicht mit einem Fahrzeug gemeinsam auf dessen Wegstück bewegen. Darüber hinaus ist der *Werker* in seinen Konfigurationsmöglichkeiten deutlich beschränkter als das *Fahrzeug*.

Ausgehend davon gibt es in *Tecnomatix Plant Simulation* weder einen geeigneten, bereits entwickelten Baustein für den Roboter, noch lässt sich der Baustein *Werker* dazu einsetzen, die Interaktionen zwischen Roboter und Mensch adäquat abzubilden. Damit fällt die Wahl für beide Agenten auf den Baustein *Fahrzeug*, welcher entsprechend unterschiedlich parametrisiert wird. Im Rahmen der Parametrierung muss zwischen numerischen Werten und Funktionsweisen, die eigenständig entwickelt werden müssen, unterschieden werden. Numerische Parameter sind u. a. die Geschwindigkeit  $v_M$  bzw.  $v_R$ , die Beschleunigung  $a_M$  bzw.  $a_R$ , die Wartezeit vor einem Ausweichmanöver  $t_{WZ,m}$  bzw.  $t_{WZ,r}$  oder die erforderliche Zeit für eine 90-Grad-Drehung  $t_{DZ,m}$  bzw.  $t_{DZ,r}$ . Des Weiteren können sich die Agenten in ihren Einsatz- bzw. Schichtzeiten sowie den notwendigen Pausen unterscheiden.

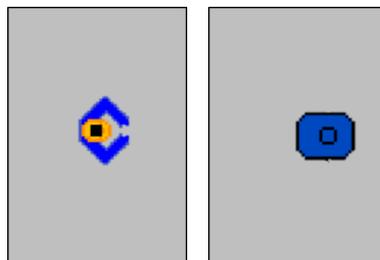


Abbildung 5-1: Grafische Darstellung der Agenten: links Mensch, rechts Roboter

## Verkehrsflächen und Bewegung in der Fläche

Nachdem die Agenten entsprechend modelliert wurden und beide in ihrer Basisfunktion ein Fahrzeug darstellen, bedarf es eines Bausteins, auf dem sich die Agenten durch das System bewegen können. Die Software verfügt dazu über den Baustein *Wegstück*. In der Grundform stellt das *Wegstück* eine klassische Kante aus der Graphentheorie dar, sodass, unabhängig von der Breite des Weges und der Agenten, sich keine zwei Agenten nebeneinander auf einem *Wegstück* befinden können. Zwar ließe sich durch das Platzieren mehrerer *Wegstücke* nebeneinander diesem Problem entgegenwirken, allerdings wären bei dieser Vereinfachung die Bewegungen und Interaktionen beider Agenten nur bedingt steuerbar.

Daher muss ein Implementierungsansatz entwickelt werden, der eine möglichst realitätsnahe Bewegung beider Agenten ermöglicht und dabei die Implementierung von individuellen Sicherheitszonen und Abständen berücksichtigt sowie notwendige Ausweichvorgänge realisieren kann. Hierzu wurde der Ansatz von *Lienert* herangezogen und für die oben beschriebenen Anforderungen weiterentwickelt (vgl. [Lie-2021]).

Wie bereits bei *Lienert* werden jeweils zwei Wegstück-Elemente zu einem Flächenelement gekapselt. Jeweils eines davon ermöglicht die Bewegung in x-Richtung, das andere in die y-Richtung. Zusätzlich ist ein weiterer Baustein integriert, der den individuellen Zeitbedarf einer Drehung der Agenten auf dem Flächenelement berücksichtigt. Das Layout setzt sich daher aus einer Menge aneinandergereihter Flächenelementen zusammen. Abbildung 5-2 zeigt ein Raster von 3 x 3 und den Aufbau eines Flächenelementes.

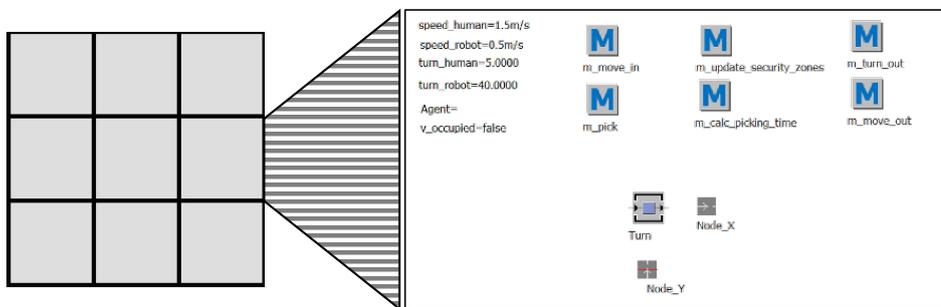


Abbildung 5-2: Implementierung des Bausteins Flächenelement: links als Fläche von neun Flächenelementen, rechts im Detail

Die Bewegung der Agenten kann nur horizontal und vertikal erfolgen. Eine diagonale Bewegung über mehrere Bausteine hinweg ist nicht möglich. Durch diese Implementierung lassen sich daher unterschiedlich große Layoutkonfigurationen realisieren.

## Sicherheitszonen der Agenten

Die Sicherheitszonen beider Agenten bilden die Grundlage ihres Interaktionsverhaltens. Das Auftreten von Hindernissen in der Zone eines Agenten führt zu einem definierten Handeln. Die dem zugrunde liegenden Logiken und Verhaltensmuster beider Agenten wurden bereits in den Unterabschnitten 4.5.1 und 4.5.2 näher beschrieben. Im Simulationsmodell gilt es nun, im dynamischen Ablauf die jeweiligen Sicherheitszonen abzubilden, anzupassen und, wenn nötig, Prozesse einzuleiten, die ein Anhalten oder Ausweichen der Agenten erfordern. Wie bereits beschrieben, verfügt der Mensch lediglich in der Bewegungsrichtung über eine Sicherheitszone. Seitliche oder hinter ihm befindliche Begegnungen werden nicht von ihm berücksichtigt. Der Roboter hingegen verfügt über eine Warnzone (gelb) und eine Personenschutzzone (rot). Die Warnzone befindet sich in Bewegungsrichtung und überwacht das Auftreten von Hindernissen in weiterer Entfernung. Sollte ein anderer Agent in dieser Zone identifiziert werden, verringert der Roboter zunächst seine Geschwindigkeit.

Mit dem Eintritt des Agenten in die rote Zone des Roboters wird ein vollständiger Halt veranlasst. Eine weitere Besonderheit des Roboters ist, dass seine seitlichen und hinteren Sicherheitszonen individuell zu- und abgeschaltet werden können. Lediglich die beiden Zonen in Fahrtrichtung sind stets aktiv. Die Abbildung 5-3 illustriert die jeweiligen Sicherheitszonen.

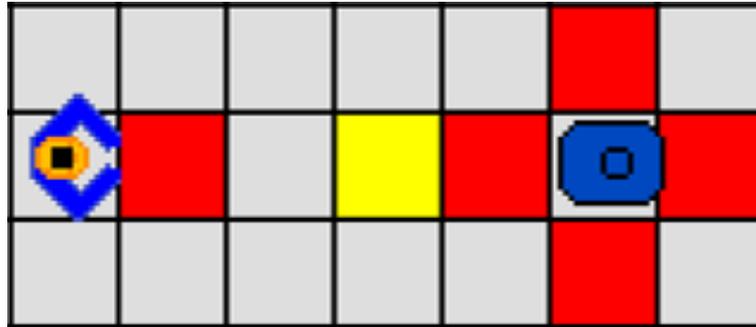


Abbildung 5-3: Darstellung der Sicherheitszonen beider Agenten im Simulationsmodell

Kommt es innerhalb des Kommissionierprozesses zu Interaktionen, bestimmen die in Unterabschnitt 4.5.3 entwickelten Strategien das jeweilige Verhalten der Agenten. Diese werden aus dem Konzeptmodell in eine ausführbare Programmierumgebung überführt und im Prozessablauf durch das Simulationsmodell abgefragt. Ein exemplarisches Ausweichverhalten ist in Abbildung 5-4 dargestellt

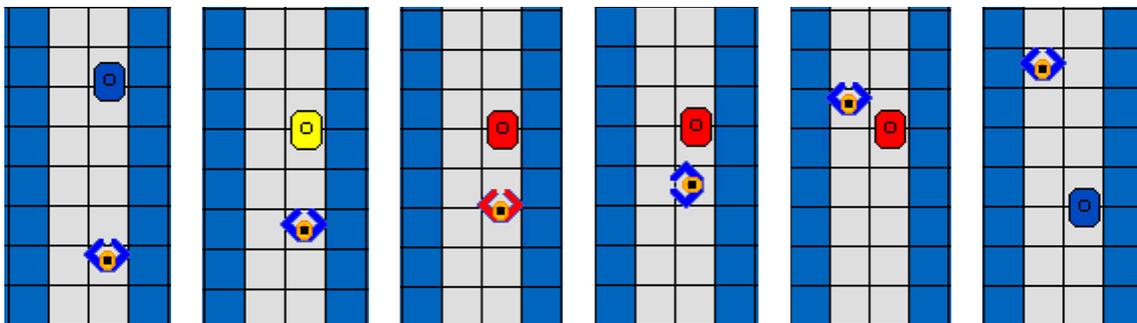


Abbildung 5-4: Darstellung einer exemplarischen Interaktion zwischen Mensch und Roboter innerhalb einer Kommissioniergasse im Simulationsmodell

### 5.3 Verifikation und Validierung des Modells

Verifikation und Validierung sollen die Zuverlässigkeit und die Glaubwürdigkeit des entwickelten Modells sicherstellen. Dazu ist einerseits die Angemessenheit des Modells im Hinblick auf die geforderte Aufgabe zu diskutieren (Validierung) und andererseits soll das Modell auf Vollständigkeit und Konsistenz geprüft werden (Verifikation) (vgl. [Rab-2008, S. 11]). Üblicherweise wird unter einer Verifikation die korrekte Überführung von einem Konzeptmodell in ein Simulationsmodell verstanden (vgl. [Dav-1992, S. 4; Rab-2008, S. 14;

Sch-1979, S. 104]). Die Verifikation beantwortet die Frage (vgl. [Bal-2003, S. 150; Rab-2008, S. 14]):

*„Ist das Modell richtig?“*

Die Validierung wird genutzt, um zu überprüfen, ob das entwickelte Modell zur Erreichung des Untersuchungsziels hinreichend genau ist (vgl. [Rab-2008, S. 16]). Daher beantwortet die Validierung die Frage (vgl. [Bal-2003, S. 150; Rab-2008, S. 16]):

*„Ist es das richtige Modell?“*

Zur Überprüfung der Verifikation und der Validierung werden Tests mit definierten Techniken verwendet. Wichtig ist hier, dass ein Test allein keine belastbare Aussage zur Verifikation und Validierung machen kann. Allerdings kann durch eine geeignete Auswahl verschiedener Tests die Gültigkeit von Verifikation und Validierung wahrscheinlicher gemacht werden (vgl. [Rab-2008, S. 17]).

*Rabe et al.* widmen den Verifikations- und Validierungstechniken ein umfangreiches Kapitel und führen dort auch weiterführende Literatur an. In dieser Arbeit soll auf eine vollständige Darstellung verzichtet werden und es sollen stattdessen die für das hier entwickelte Simulationsmodell relevanten Techniken hervorgehoben werden. Diese werden in den nachfolgenden Unterabschnitten näher beschrieben.

### **5.3.1 Schreibtischtest und strukturiertes Durchgehen**

Der Schreibtischtest und das strukturierte Durchgehen sind zwei theorieorientierte Verifikations- und Validierungstechniken, die häufig auch kombiniert werden (vgl. [Rab-2008, S. 102]). Der Schreibtischtest ist die sorgfältige Überprüfung der eigenen Arbeit auf Vollständigkeit, Konsistenz und Eindeutigkeit (vgl. [Bal-2007, S. 356; Rab-2008, S. 102]).

Das strukturierte Durchgehen kommt aus der Softwareentwicklung (vgl. [Bal-2005, S. 550]). Dabei gehen die Verantwortlichen gemeinsam Teile des Programms durch, um deren Richtigkeit zu gewährleisten. In Simulationsprojekten arbeiten die Simulationsexperten mit den Fachleuten des Auftraggebers zusammen, um Fehler oder Missverständnisse zu beseitigen. Durch die gemeinsame Abstimmung kann sowohl die Richtigkeit als auch die Validität der Arbeit gesteigert werden (vgl. [Rab-2008, S. 104 f.]).

Während der Entstehungszeit dieser Arbeit wurden die einzelnen Modellbestandteile vielfach durch den Autor auf Konsistenz und Korrektheit geprüft, wobei Fehler im Programmcode gefunden und Optimierungspotenziale in Funktionsumfang und -ablauf identifiziert wurden.

Zudem wurden einzelne Bestandteile mit Experten aus der industriellen Praxis diskutiert. Dabei wurden der Schreibtischtest, das strukturierte Durchgehen und die Validierung im

Dialog kombiniert. Die Validierung im Dialog soll in Unterabschnitt 5.3.3 näher beschrieben werden.

### 5.3.2 Grenzwerttest und Sensitivitätsanalyse

Die Grenzwerttests sowie die Sensitivitätsanalysen untersuchen vor allem das ausführbare Simulationsmodell und die daraus resultierenden Ergebnisse. Ein Grenzwerttest nutzt Extremwerte, um das Verhalten des Modells besser vorherzusagen (vgl. [Rab-2008, S. 100; Sar-1994, S. 80; Sar-2010, S. 171]). Dazu werden extreme Eingangsparameter gewählt, um zu überprüfen, ob das Modell auch außerhalb eines realistischen Parametersets einem nachvollziehbaren Verhalten unterliegt und valide Ergebnisse liefert. Ein ähnliches Vorgehen sieht die Sensitivitätsanalyse vor. Hier werden ebenfalls Eingangsgrößen variiert und deren Auswirkungen auf die Ausgangsgrößen geprüft. Die Ausgangsgrößen des Modells sollen sich dabei ähnlich zur Realität verhalten (vgl. [Rab-2008, S. 102]). Das primäre Ziel dabei ist herauszufinden, wie stark einzelne Parametervariationen auf die Outputgrößen wirken. Besonders kritisch sind die Eingangsparameter, die die Ausgangsgrößen in besonderem Maße beeinflussen (vgl. [Bal-1989, S. 68; Rab-2008, S. 103]). Darüber hinaus kann es vorkommen, dass einzelne Parameter erst in Kombination mit anderen Input-Variablen zu starken Schwankungen der Ausgangsgrößen führen (vgl. [Law-2005, S. 28 f.; Rab-2008, S. 103]). Die Identifikation und Untersuchung solcher Abhängigkeiten ist der wesentliche inhaltliche Bestandteil des Kapitels 6.

In diesem Unterabschnitt soll der Fokus auf der Untersuchung einzelner Eingabegrößen liegen, um deren Verhalten mit der Realität und einem zu erwartenden Verhalten zu vergleichen. Dazu sollen verschiedene Eingangsgrößen betrachtet und variiert werden. Zusätzlich sollen das zu erwartende Verhalten sowie die Outputgrößen in Form von Hypothesen formuliert werden (vgl. Tab. 5-1).

*Tabelle 5-1: Übersicht der Grenzwerttests*

Parameter	Annahme
Batchgröße	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mit steigender Batchgröße steigen sowohl die Durchlaufzeit als auch die Gesamtleistung.</li> <li>2. Mit sinkender Anzahl an Positionen je Batch sinkt sowohl die Durchlaufzeit als auch die Gesamtleistung.</li> </ol>
Geschwindigkeit	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sinkt die Geschwindigkeit der Agenten, steigt die Durchlaufzeit und die Gesamtleistung nimmt ab.</li> <li>2. Steigt die Geschwindigkeit der Agenten, sinkt die Durchlaufzeit und die Gesamtleistung nimmt zu.</li> </ol>
Auftragseingang	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Steigt der Auftragseingang, nimmt die Durchlaufzeit ab und die Wartevorgänge innerhalb einer Tour nehmen zu.</li> <li>2. Sinkt der Auftragseingang, nimmt die Durchlaufzeit zu und die Wartevorgänge innerhalb einer Tour nehmen ab.</li> </ol>

Die in Tabelle 5-1 dargestellten Grenzwerttests werden auf Grundlage von identischen Layouts und Parametersets durchgeführt. Lediglich die aufgeführten Parameter werden entsprechend variiert. Dazu wird ein Layout mit vier Kommissioniergassen mit einer Länge von jeweils 25 m betrachtet. Dieses wird von jeweils zwei Menschen und zwei Robotern parallel

betrieben. Beide Agenten verfügen über eine Kapazität von jeweils zehn Positionen. Jeder Simulationslauf wird zehn Mal wiederholt, um stochastische Einflüsse auszugleichen.

Die Abbildung 5-5 zeigt die Ergebnisse der Grenzwerttests zur Batchgröße. Insgesamt wurden sechs Batchgrößen untersucht. Der kleinste Batch besteht lediglich aus einer Position, der größte aus 100 Positionen. Die vorangegangenen Hypothesen prognostizieren, dass kleinere Batches zu kürzeren Durchlaufzeiten, aber auch zu geringeren Systemleistungen führen und dass sich diese Entwicklung mit Zunahme der Batchgröße konträr verhält. Dies können die Untersuchungen bestätigen. Allerdings ist zu beobachten, dass die Gesamtleistung mit steigender Batchgröße nicht kontinuierlich steigt, sondern im betrachteten Intervall von 15 bis 100 Positionen ein lokales Maximum vorliegen muss. Dieses Verhalten ist nachvollziehbar und lässt sich wie folgt erklären: Der Weg vom Depot zum gewünschten Entnahmeort und zurück fällt bei kleineren Batches stärker ins Gewicht als bei größeren. In einem System mit einer freien Lagerbelegung sinkt zudem die mittlere Entfernung zwischen zwei Entnahmeorten, wenn der Batch größer wird. Ab einer gewissen Batchgröße, in diesem Fall zwischen 15 und 100 Positionen, relativiert sich der Effekt jedoch, da immer mehr Gassen in dem System durchfahren werden müssen, damit der Batch vollständig abgeschlossen ist. Damit wird die Wegstrecke immer länger und wirkt sich negativ auf die Leistungsfähigkeit aus. So kann festgehalten werden, dass die Annahmen zur Batchgröße durch das vorliegende Modell gestützt und bestätigt werden. Deshalb bildet das Modell die Auswirkungen der Batchgröße valide ab.

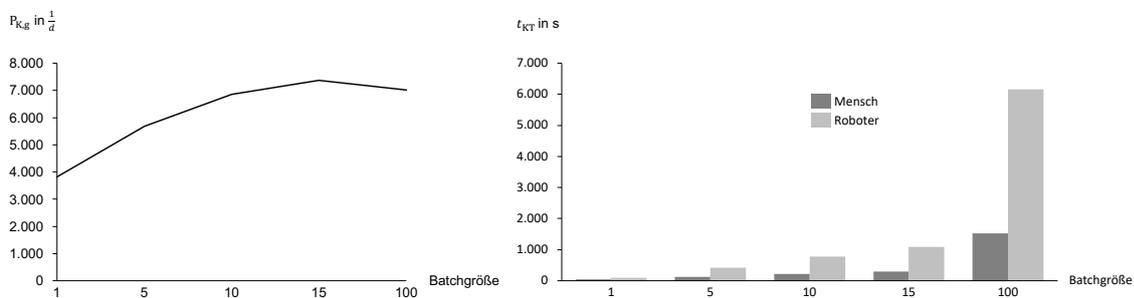


Abbildung 5-5: Auswirkungen der Batchgröße auf die Systemleistung (links) und die Durchlaufzeit (rechts)

Der zweite Teil der Grenzwerttests soll das Modellverhalten bei unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten der Agenten betrachten. Davon ausgenommen sind Drehgeschwindigkeiten, die im Modell eigenständig betrachtet werden und nicht Untersuchungsgegenstand dieser Validierung sein sollen. Zudem soll in diesem Umfeld die Beschleunigung beider Agenten vernachlässigt werden.

Die Abbildung 5-6 visualisiert das Modellverhalten bei variierten Geschwindigkeiten beider Agenten. Hier wird deutlich, dass die Geschwindigkeiten der Agenten die Leistung des Systems unmittelbar beeinflussen. Dieser Umstand ist wenig überraschend, da in einem PzW-System die Bewegungszeit neben der Pickzeit ein wesentlicher Bestandteil der Durchlaufzeit ist. Interessant sind auch hier die Extremwerte<sup>27</sup>. In diesem Fall 0,1 m/s und 100 m/s, und die Entwicklung der Leistung zu den vor- bzw. nachgelagerten Geschwindigkeiten. Die Leistungsentwicklung von 0,1 m/s auf 1 m/s ist von ca. 1.500 Positionen zu 5.000 Positionen deutlich, wohingegen eine Verzehnfachung von 10 m/s auf 100 m/s nur einen marginalen Leistungszuwachs hervorbringen kann. Auch dieses Verhalten ist nachvollziehbar und lässt sich vor allem durch die Layoutgröße erläutern. Eine Maximalgeschwindigkeit von 10 m/s oder sogar 100 m/s kann bei den kurzen Lagergassen von 25 Metern kaum ausgenutzt werden. Es können bei solch hohen Geschwindigkeiten nur Zehntelsekunden eingespart werden. Zusätzlich kommt es innerhalb einer Gasse zu einzelnen Stopps, einerseits an den verschiedenen Entnahmeorten und andererseits durch Interaktionen mit anderen Agenten, wodurch die Grenzwerte in der Maximalgeschwindigkeit zu keinen merklichen Einsparungen in der Durchlaufzeit führen. Damit kann bestätigt werden, dass das Modell die Geschwindigkeiten der Agenten valide abbildet.

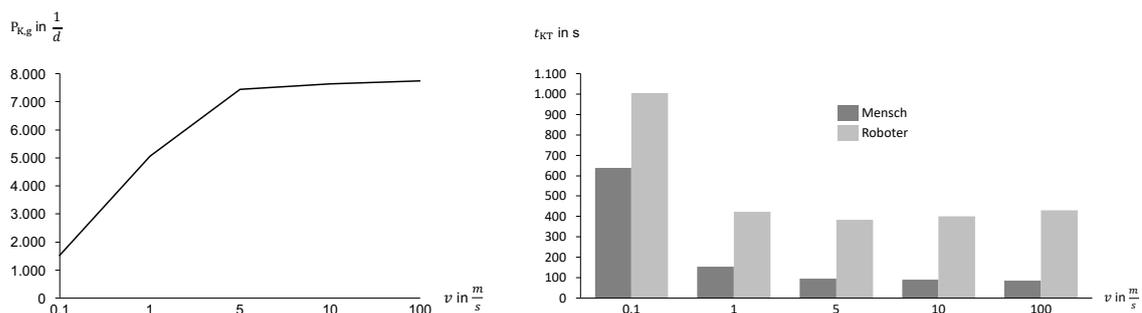


Abbildung 5-6: Auswirkungen der Geschwindigkeit auf die Systemleistung pro Tour (links) und die Durchlaufzeit (rechts)

Der dritte und letzte Parameter, der im Rahmen der Grenzwerttests untersucht wird, ist der Auftragseingang. Dieser wird in Auftragspositionen pro Woche gemessen. Das bedeutet, dass der jeweilige Wert auf eine Woche gleichmäßig verteilt wird, unabhängig davon, ob das System an sieben Tagen oder weniger in der Woche betrieben wird. Am Beispiel von 1.000 Auftragspositionen bedeutet dies, dass pro Stunde ca. sechs Auftragspositionen freigegeben werden. Für insgesamt vier Agenten ist diese Menge nicht auslastend, wobei dies bewusst hervorgerufen werden soll, um das Modellverhalten und die entsprechenden Output-Werte für diesen Grenzfall zu untersuchen.

Abbildung 5-7 illustriert die durchschnittliche Anzahl an Wartevorgängen eines Agenten. Hierbei ist ein deutlicher Unterschied zwischen Mensch und Roboter in den Absolutwerten

<sup>27</sup> An dieser Stelle sei nochmals zu betonen, dass die Extremwerte insbesondere die Geschwindigkeiten in der Realität nicht erreicht werden können. Allerdings dient der Grenzwerttest dazu, um zu überprüfen, ob das Modell auch außerhalb realistischer Parameter einem nachvollziehbaren Verhalten unterliegt.

zu erkennen. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Roboter deutlich höheren Durchlaufzeiten unterliegt und somit potenziell auf seiner Tour mit mehr Interaktionen konfrontiert wird. Des Weiteren ist auffällig, dass bei 1.000 Positionen weder der Mensch noch der Roboter während seiner Tour warten muss. Dies lässt sich mit der Zwischenankunftszeit an Auftragspositionen (hier: 6 Positionen pro Stunde) begründen. Die beiden Agenten verfügen jedoch über eine Kapazität von zehn Positionen. Das bedeutet, dass ein Agent seine eigene Tour bereits abgeschlossen hat, bevor ein zweiter genügend Aufträge aus dem System erhalten hat. Das hat zur Folge, dass in diesem System keine Wartezeiten während der Tour auftreten, da stets nur ein Agent aktiv ist<sup>28</sup>.

Die Untersuchungen zeigen ein Maximum an Wartevorgängen bei 50.000 Positionen (ca. 300 Positionen pro Stunde). Das lässt sich damit begründen, dass einerseits nun deutlich häufiger alle vier Agenten im System gleichzeitig arbeiten, sodass auch die Interaktionen steigen. Andererseits, und dies verstärkt die Interaktionen, sind offensichtlich 300 Positionen pro Stunde noch nicht ausreichend, um ein effizientes Batching und damit kürzere Touren zu erzielen.

Ein ähnliches Verhalten spiegeln auch die Durchlaufzeiten wider. Dort sind in den drei Fällen bis 50.000 Positionen keine merklichen Veränderungen erkennbar. Erst darüber sinkt die Durchlaufzeit, wobei wiederum von 100.000 auf 500.000 Positionen keine Reduzierung mehr zu erreichen ist. Dies lässt sich mit der betrachteten Layoutgröße begründen. Da das betrachtete System wenige Entnahmeorte aufweist, verläuft der Zugewinn an potenziellen Optimierungen der Durchlaufzeit durch einen größeren Auftragspool nicht linear. Bei größeren Systemen kann ein optimiertes Batching einen noch stärkeren Einfluss auf die Durchlaufzeit erreichen. Abschließend kann festgehalten werden, dass das Verhalten, welches in Tabelle 5-1 prognostiziert wurde, vom Simulationsmodell abgebildet wird.

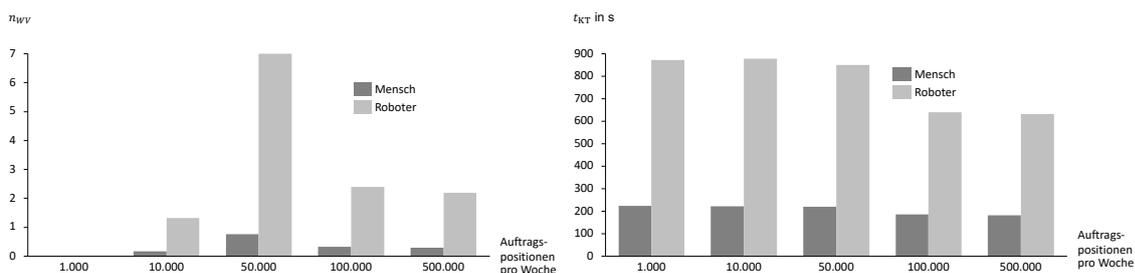


Abbildung 5-7: Auswirkungen der Orderpositionen auf die Wartevorgänge pro Tour (links) und die Durchlaufzeit (rechts)

### 5.3.3 Validierung im Dialog

Im Zuge der Validierung im Dialog werden das Modell oder einzelne Bestandteile Fachexperten vorgelegt, die mit dem existierenden System oder, im Fall dieser Untersuchung, mit

<sup>28</sup> In diesem Kontext wurde bewusst die Wartezeit für neue Aufträge am Depot nicht berücksichtigt.

der Planung und der Steuerung von mobilen Robotern in der manuellen Kommissionierung vertraut sind. Die jeweiligen Experten schätzen mit ihrem Wissen die Genauigkeit einzelner Ergebnisse ein, sodass Abweichungen frühzeitig erkannt werden können (vgl. [Rab-2008, S. 109]).

Als Gesprächspartner für verschiedene Validierungsprozesse stand das Unternehmen Magazino GmbH beratend zur Seite. Dessen Portfolio an Robotiksystemen hat mit den untersuchten Varianten im Simulationsmodell einige Überschneidungen. Dadurch war es möglich, mit einer Vielzahl an unterschiedlichen Mitarbeitern des Unternehmens die jeweiligen Bestandteile des Modells zu validieren. Das Hauptaugenmerk bei der Validierung lag auf den Bewegungen der Agenten im System sowie einer ganzheitlichen Validierung durch die Nachbildung eines realen Robotiksystems, welches bereits durch die Firma Magazino betrieben wird.

Eine realitätsnahe Abbildung der Bewegungsmuster von Mensch und Roboter war eines der primären Ziele. Diese wurde in einer Vielzahl an Gesprächen validiert. Dabei sollte herausgefunden werden, ob die Bewegungen des Menschen und des Roboters der Realität entsprechen. Die Simulation kann stets nur ein Abbild der Realität widerspiegeln und muss auf Annahmen und Vereinfachung zurückgreifen. Im vorliegenden Fall betrifft dies vor allem das intuitive und individuelle Verhalten von Menschen. Trotzdem konnten die Experten von Magazino sowohl das Verhalten der Kommissionierer als auch das der Roboter als realitätsnah und hinreichend genau für die Simulation bestätigen.

Das Untersuchungsmodell wurde darüber hinaus für die Akquise eines Großprojektes (bis zu 20 Roboter) herangezogen. Dabei stand weniger ein Leistungsnachweis im Vordergrund, sondern es sollte demonstriert werden, wie bei der Nachbildung des Lagersystems und einer prognostizierten Anzahl an Menschen und Robotern die Agenten im System arbeiten und wie mögliche Interaktionen aussehen könnten. Das dem Modell entgegengebrachte Vertrauen bestätigt ebenfalls dessen Validität.



## 6 Einflussanalyse der Planungsprobleme

---

Nachdem das Untersuchungsmodell konzipiert und in eine Simulationsumgebung überführt worden ist, erfolgt in diesem Kapitel die Einflussanalyse der Planungsprobleme und deren Freiheitsgrade. Dazu wird im ersten Abschnitt noch einmal die Zielstellung aufgegriffen und erläutert. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 6.2 zunächst die zum Verständnis notwendigen Grundlagen zur Versuchsplanung hervorgehoben, die dann in die Auswahl und Konzeptionierung zweier Versuchspläne münden. Im Anschluss erfolgt eine erste Grobana-lyse der Ergebnisse, die in Abschnitt 6.4 mit ersten statistischen Methoden ausgewertet werden. Diese werden in Abschnitt 6.5 um die Entwicklung eines Regressionsmodells er-gänzt, dessen Ergebnisse in Abschnitt 6.6 anhand eines Referenzlayouts umfassend unter-sucht werden. Das Kapitel schließt mit einer Generalisierung der Ergebnisse, die letztlich in allgemeingültige Betriebsstrategien für den Einsatz von hybriden Kommissioniersystemen überführt werden.

### 6.1 Zielstellung

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist zu untersuchen, inwieweit die Planungsprobleme der Kommissionierung die Leistungsfähigkeit von Mensch und Roboter beeinflussen. Um dies bestimmen zu können, ist es notwendig, die Einflüsse einzelner Freiheitsgrade auf die relevanten Zielgrößen zu kennen. Im Anschluss soll es möglich sein, die einzelnen Planungsprobleme nach ihrer Einflussstärke zu kategorisieren. Darauf aufbauend können Aussagen getroffen werden, ob sich die Veränderung eines Planungsproblems positiv oder negativ und in welcher Höhe auf die Zielgrößen auswirkt. Diese Erkenntnisse ermöglichen eine vorherige Einschränkung der relevanten Planungsprobleme und deren Freiheitsgrade, sodass die Planungskomplexität deutlich reduziert werden kann. Zeigt sich beispielsweise, dass eine bestimmte Lagerbelegungsstrategie einen deutlichen Einfluss auf die Leistung hat, so lässt sich ableiten, dass bei der Planung von hybriden Kommissioniersystemen diese Strategie vorrangig angestrebt werden sollte.

Darüber hinaus soll ermittelt werden, ob die einzelnen Planungsprobleme in verschiedenen Layoutkonfigurationen einen unterschiedlichen Effekt erzielen. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich geeignete Betriebsstrategien entwickeln, die eine leistungsorientierte Ausle-gung der einzelnen Planungsprobleme berücksichtigen. Bevor im weiteren Verlauf dieses Kapitels die Untersuchungsergebnisse näher beleuchtet werden, wird im folgenden Ab-schnitt zunächst die Versuchsplanung beschrieben.

## 6.2 Design of Experiments

Das Design of Experiments, oder die statistische Versuchsplanung, beschreibt die Methode zur Planung und Auswertung von Versuchsreihen. Insbesondere bei großen und aufwändigen Untersuchungen, wie im Rahmen dieser Arbeit, ist es erforderlich, dass der Versuchsaufbau, aber auch die Auswertung der Ergebnisdaten auf fundierten und wissenschaftlichen Ansätzen beruht. (vgl. [Sie-2017, S. 1 f.] )

Die Notwendigkeit einer statistischen Versuchsplanung wird deutlich, wenn traditionelle Verfahren, wie der vollfaktorielle Versuchsplan, als Versuchsdesign gewählt werden. In diesem Design werden alle Kombinationsmöglichkeiten geprüft, wodurch sich der Versuchsaufwand  $n_r$  aus der Zahl der Inputparameter  $n_f$  und der Zahl der jeweiligen Ausprägungen  $n_l$  ergibt (vgl. [Kle-2016b, S. 113]).

$$n_r = n_l^{n_f} \quad (6-1)$$

Dies hat zur Folge, dass bei zehn Parametern, die jeweils fünf Ausprägungen annehmen können, fast 10.000.000 Versuchsläufe notwendig sind. Dieser Zusammenhang macht deutlich, dass der Einsatz von statistischen Versuchsplänen schon in kleineren Testumgebungen sinnvoll erscheint. In der Literatur gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren, die den Untersuchungsaufwand reduzieren und dennoch signifikante Erkenntnisse liefern. Eine detaillierte Beschreibung und Herleitung der ausgewählten Verfahren würde den Betrachtungsfokus dieser Arbeit jedoch überschreiten. Zur Auswahl geeigneter Verfahren wurde die einschlägige Fachliteratur<sup>29</sup> herangezogen. Das entwickelte Konzept wurde zudem mit Fachexperten diskutiert (vgl. [Hau-2020; Hau-2021a; Hau-2021b]).

Einen wesentlichen Einfluss auf die Wahl der Methodik zur statistischen Versuchsplanung haben die Faktoren und die jeweiligen Stufen. Der folgende Unterabschnitt soll dazu dienen, ein einheitliches Verständnis für die dabei verwendeten Begriffe zu schaffen sowie die für die Untersuchung relevanten Merkmale zu definieren.

### 6.2.1 Faktoren, Stufen und Qualitätsmerkmale

Im Umfeld der Versuchsplanung wird häufig von Parametern und Faktoren gesprochen. Parameter sind die Gesamtmenge aller Eingangsgrößen eines betrachteten Modells. Faktoren stellen dabei die Teilmenge dar, die im Rahmen des Versuchsplans systematisch variiert wird ([Kle-2016b, S. 14; Sie-2017, S. 5]). Damit die Faktoren untersucht werden können, müssen diese im betrachteten System mindestens zwei mögliche Ausprägungen annehmen können, wobei die Ausprägung in diesem Zusammenhang als Stufe bezeichnet

---

<sup>29</sup>Für detaillierte Beschreibungen diverser Methodiken zur Versuchsplanung sei auf [Kle-2016b] und [Sie-2017] verwiesen.

wird. Dabei ist vor allem der Abstand zwischen den Stufen entscheidend, der den Effekt eines Faktors bestimmt. Je kleiner der Abstand ist, desto geringer ist der zu erwartende Effekt<sup>30</sup> (vgl. [Kle-2016b, S. 13 f.; Sie-2017, S. 6]).

Die nachfolgende Tabelle 6-1 zeigt die für das hier zu konzipierende Untersuchungsmodell zu berücksichtigenden Faktoren. Bei der Auswahl wurde auf die Planungsprobleme von [Gil-2018] zurückgegriffen, die um selbst entwickelte Faktoren ergänzt wurden.

Tabelle 6-1: *Betrachtete Faktoren für das konzipierte Untersuchungsmodell*

	Anzahl an Kommissionierblöcken
Strategisch	Anzahl an Kommissioniergassen
	Länge der Kommissioniergassen
	Anzahl an Depots
	Position des Depots
	Anzahl an Agenten
Taktisch	Verteilung der Agenten
	Lagerbelegungsstrategie
	Anzahl an Positionen je Batch
Operativ	Auslastungsorientierte Auftragsvergabe
	Größe des Auftragspools
	Übergabe des Batches
	Sicherheitszonen der Roboter
Sonstiges	Anzahl an Artikeln je Auftragsposition

Innerhalb der strategischen Parameter werden verschiedene Layoutvarianten untersucht. Dazu werden die Anzahl an Kommissionierblöcken sowie die Anzahl an Kommissioniergassen und deren Länge entsprechend variiert. Bei den taktischen Planungsprobleme fließt die Anzahl an Agenten und deren prozentuale Verteilung auf die beiden Typen Mensch und Roboter ein. Zusätzlich werden unterschiedliche Lagerbelegungsstrategien betrachtet. Die operativen Faktoren umfassen u. a. die Positionen je Batch. Dies sagt aus, wie viele Positionen ein Agent auf einer Kommissioniertour bearbeitet. Bei der Auftragsvergabe wird zudem zwischen einer freien und einer auslastungsorientierten Vergabe unterschieden. Auslastungsorientiert bedeutet, dass berücksichtigt wird, wie viele Positionen in jeder Kommissioniergasse aktuell bearbeitet werden. Beim Erstellen einer neuen Kommissioniertour wird dann die Gasse gewählt, in der aktuell die wenigsten Positionen zu kommissionieren sind. Damit wird das Ziel verfolgt, eine möglichst ausgeglichene Verteilung von Aufträgen und Kommissioniertouren im System zu erreichen. Darüber hinaus werden die

<sup>30</sup>Der Effekt wird beispielsweise im Rahmen der Verifikation des Modells in Unterabschnitt 5.3.2 deutlich. Kleine Veränderungen haben bei der Geschwindigkeit der Agenten nur geringe Auswirkungen (vgl. Abb. 5-6). Dies trifft allerdings nur auf linear abhängige, numerische Faktoren zu (vgl. [Sie-2017, S. 6]). Kategorische Faktoren (True/False) können auch mit nur zwei Stufen einen hohen Effekt erzielen.

Größe und die Anzahl der zur Verfügung stehenden Aufträge im Auftragspool variiert. So kann untersucht werden, inwieweit eine größere Auswahl an verfügbaren Aufträgen positive Effekte auf die Pickleistung hat. Zwei zusätzliche Faktoren, die keiner der zuvor genannten Gruppen zugeordnet werden können, sind die Sicherheitszonen der Roboter sowie die Anzahl an Artikeln je Auftragsposition. Im Rahmen dieser Studie soll untersucht werden, inwieweit unterschiedliche Formen der Sicherheitszone des Roboters einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit haben. Unabhängig von geltenden Sicherheitsanforderungen, soll durch diese Variation unterschiedliches Dominanzverhalten berücksichtigt werden, da der Roboter bei weniger Sicherheitszonen seltener halten muss. Dies soll erste Erkenntnisse zur Entwicklung unterschiedlicher Dominanzverhalten von Robotern erbringen. Als letzter Faktor wird die Anzahl an Artikeln je Auftragsposition untersucht. Dadurch soll festgestellt werden, inwieweit eine höhere Anzahl an Artikeln je Position den Kommissionierablauf beeinflusst. Grundsätzlich bedeutet dies, dass sich der Agent entsprechend länger an einem definierten Entnahmeort aufhält, da für eine Auftragsposition mehrere Artikel entnommen werden müssen.

Bei näherer Betrachtung wird deutlich, dass es sowohl numerische Faktoren (bspw. Anzahl Lagergassen) als auch kategorische Faktoren (bspw. Lagerbelegung) gibt, die zudem unterschiedlich vielen Stufen unterliegen. Dies sind Herausforderungen, denen ein Versuchsplan allein nicht gerecht werden kann. Die Auswahl geeigneter Versuchspläne wird im folgenden Unterabschnitt näher beschrieben.

### **6.2.2 Methoden zur statistischen Versuchsplanung**

Die im vorangegangenen Unterabschnitt 6.2.1 vorgestellten Faktoren unterliegen weder einem einheitlichen Datentyp, noch kann allen Faktoren eine einheitliche Anzahl an Stufen zugewiesen werden. Einerseits sollen die Faktoren mit umfassenden Wertebereichen untersucht werden. Andererseits bedarf es eines Versuchsaufbaus, der mit möglichst wenigen Versuchsläufen alle weiteren Faktoren berücksichtigt und die Ergebnisse statistisch valide auswertet. Weder durch eigene Literaturrecherche noch in Diskussionen mit Fachexperten konnte ein Verfahren gefunden werden, das beide Ziele ausreichend erfüllen kann.

Daher erfolgt der Versuchsaufbau zweigeteilt mit jeweils unterschiedlichen Verfahren. Für die Entwicklung der Layoutkonfigurationen wird das Latin-Hypercube-Verfahren (LHC) genutzt. Für den Versuchsplan der übrigen Faktoren wird auf das Morris-Screening zurückgegriffen. Im Folgenden sollen die beiden Verfahren erläutert werden.

Das LHC ist eine Methode zur Entwicklung von Testfeldern von Simulationsmodellen, um einen möglichst hohen Informationsgehalt aus den durchzuführenden Versuchen zu erzielen. Dabei wird versucht, die Schwächen eines Vollfaktorplans zu minimieren. Bei einem Vollfaktorplan kann es dazu kommen, dass einzelne Stufen insignifikant sind und somit Pseudowiederholungen durchgeführt werden, die keinen Erkenntnisgewinn liefern. Das

LHC berücksichtigt den gesamten Faktorraum und stellt sicher, dass jede Faktorstufe nur einmal vorkommt und der Faktorraum möglichst gleichmäßig ausgefüllt wird (vgl. Abb. 6-1). Dadurch ist der innere Bereich im Vergleich zum Vollfaktorplan besser ausgefüllt, wodurch genauere Aussagen über den Einfluss der Faktoren auf die definierten Ausgangsvariablen getroffen werden können. (vgl. [Sie-2017, S. 183 ff.]

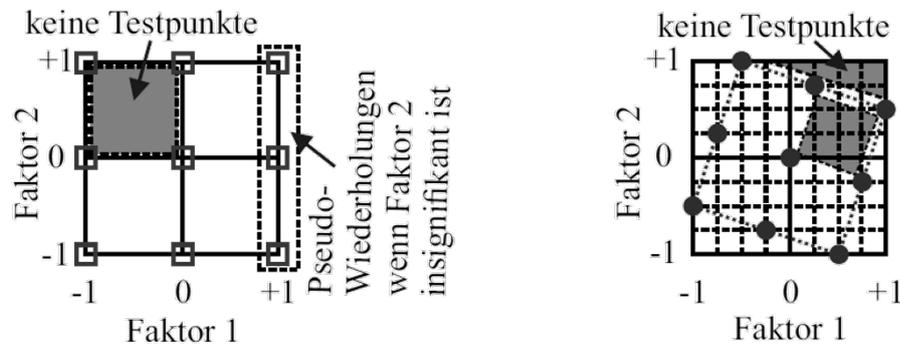


Abbildung 6-1: Vergleich Vollfaktorplan (links) und LHC-Verfahren (rechts) [Sie-2017, S. 183]

Eine wesentliche Prämisse für den Einsatz eines LHC ist, dass die Auswahl an Stufen innerhalb eines definierten Wertebereichs vollumfänglich möglich ist. Dies funktioniert bei numerischen Faktoren (bspw. Länge der Lagergassen). Schwierig wird es beim Einsatz von kategorischen Variablen, wie der Lagerbelegung, die einem kategorischen Wertebereich unterliegen. Dafür bietet das Morris-Screening einen geeigneten Ansatz.

Das Morris-Screening, benannt nach Max D. Morris, ist ein Verfahren zum Faktor-Screening und zur Sensitivitätsanalyse (vgl. [Mor-1991, S. 161]). Wie bei Sensitivitätsanalysen üblich, sollen Input-Faktoren mit einem hohen Einfluss auf den Output identifiziert werden (vgl. [Mor-1991, S. 161; Sie-2017, S. 415]). Dazu wird ein sogenanntes *One-Factor-at-a-Time-Design* genutzt, bei dem je Simulationslauf nur ein Inputfaktor verändert wird. Die übrigen bleiben konstant, sodass der Effekt des jeweiligen Inputfaktors auf das definierte Qualitätsmerkmal genau gemessen werden kann. Das Morris-Screening ermöglicht es, dabei die Inputfaktoren in drei Kategorien zu unterteilen (vgl. [loo-2015, S. 4 f.]):

- Inputfaktoren mit geringem oder keinem Effekt
- Inputfaktoren mit einem linearen Effekt ohne Abhängigkeiten von anderen Inputfaktoren
- Inputfaktoren mit einem hohen Effekt und/oder hohen Abhängigkeiten von anderen Inputfaktoren

Um zu diesen Erkenntnissen zu gelangen, gilt es zunächst, die relevanten Inputfaktoren mit den individuellen Stufen festzulegen.  $r$  beschreibt die Anzahl an gewünschten Effekten (Elementary Effects), die berechnet werden sollen. Empfehlenswert ist laut Literatur ein Wert zwischen 10 und 50, wobei unter Hinzunahme von Software wie *R-Studio* auch Optimierungsansätze zur Findung eines geeigneten Wertes für  $r$  genutzt werden können

(vgl. [Cam-2007, S. 1510]). Bestimmt wird der jeweilige Elementary Effect ( $E_j^{(i)}$ ) der  $j$ -ten Variablen im  $i$ -ten Versuch als (vgl. [loo-2015, S. 5]):

$$E_j^{(i)} = \frac{f(X^{(i)} + \Delta e_j) - f(X^{(i)})}{\Delta} \quad (6-2)$$

Dabei ist  $\Delta$  ein Vielfaches von  $\frac{1}{n-1}$  und beschreibt damit den normierten Abstand zwischen zwei Stufen.  $e_j$  ist ein Vektor bestehend aus Nullen mit Ausnahme an der  $j$ -ten Stelle (vgl. [Cam-2007, S. 1510]). Daraus lassen sich anschließend der Erwartungswert  $\mu_{E,j}$

$$\mu_{E,j} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r |E_j^{(i)}| \quad (6-3)$$

und  $\sigma_{E,j}$  als Standardabweichung

$$\sigma_{E,j} = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (E_j^{(i)} - \mu_{E,j})^2} \quad (6-4)$$

bestimmen (vgl. [loo-2015, S. 5]). Aus dem Erwartungswert und der Standardabweichung lassen sich letztlich die drei oben aufgeführten Kategorien berechnen. Je größer  $\mu_{E,j}$  ist, desto stärker ist dessen Einfluss auf die Streuung des definierten Outputwertes.  $\sigma_{E,j}$  gibt Auskunft über die Linearität<sup>31</sup> einer Inputvariable und mögliche Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Faktoren. Je kleiner das Sigma ist, umso stärker kann von einer Linearität ausgegangen werden und desto geringer ist der Effekt durch weitere Inputvariablen. Andererseits kann bei einer Variablen mit hohem Sigma keine Linearität angenommen werden und es muss davon ausgegangen werden, dass die beobachteten Effekte von mindestens einem weiteren Faktor abhängig sind. Durch das Abbilden von  $\mu_{E,j}$  und  $\sigma_{E,j}$  in einem Koordinatensystem werden die drei Gruppen deutlich (vgl. Abb. 6-2).

Die Buchstaben stehen für fiktive Inputfaktoren. Der Inputfaktor  $g$  hat in beiden Diagrammen einen geringen Effekt. Der Inputfaktor  $f$  hingegen hat im linken Diagramm einen hohen linearen Effekt ohne Abhängigkeiten zu anderen Inputfaktoren. Im rechten Diagramm hingegen kann zwar ebenfalls ein hoher Effekt identifiziert werden, jedoch mit einer hohen Abhängigkeit zu anderen Faktoren.

<sup>31</sup> Der Effekt der Linearität unterliegt der Annahme, dass die Inputfaktoren numerisch sind und mit steigendem oder sinkendem Wert ein entsprechender positiver oder negativer Effekt auf das numerische Qualitätsmerkmal deutlich wird. Bei kategorischen Variablen ist diese Linearität nicht gegeben. Trotzdem lässt sich ein hohes Sigma auch bei kategorischen Variablen nutzen, wobei deutlich wird, dass zusätzliche Inputfaktoren eine Rolle spielen.

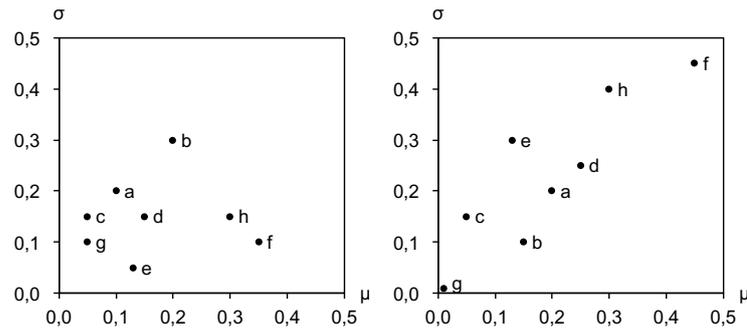


Abbildung 6-2: Zwei mögliche Ausprägungen des Morris-Screenings

In den beiden folgenden Unterabschnitten wird für die Entwicklung der Layoutkonfiguration das LHC-Verfahren und für den Versuchsplan der weiteren Faktoren das Morris-Screening angewandt.

### 6.2.3 Entwicklung der Layoutkonfigurationen

Im Rahmen des hier entwickelten Simulationsmodells ist die Erstellung des Layouts ein Prozess, der vor dem eigentlichen Beginn der Simulation abgeschlossen sein muss. Daher ist es sinnvoll, dass ein eigenständiger Versuchsplan für die Layoutfaktoren entwickelt wird. Zwischen zwei Simulationsläufen kann ohne Weiteres die Lagerbelegungsstrategie oder die Anzahl an Agenten angepasst werden. Eine Änderung des Layouts würde jedoch eine Unterbrechung der Experimente und einen Aufbau des Modells erfordern, was sich mit der zur Verfügung stehenden Software technisch nicht realisieren lässt.

Wie bereits in Tabelle 6-1 aufgeführt, lassen sich jegliche Layoutvarianten mittels fünf Faktoren beschreiben: der Anzahl an Kommissionierblöcken, der Anzahl an Kommissioniergassen, der Länge der Kommissioniergassen sowie der Anzahl und der Position der Depots. Durch mehr als zwei Kommissionierblöcke und der daraus entstehenden Quergasse sowie die Positionierung der Depots lassen sich als Grundstruktur unterschiedliche Layoutkonfiguration erstellen. Daher werden für die Untersuchung zwei Basiskonfigurationen definiert. Die Basiskonfiguration 1 besteht ausschließlich aus einem Lagerblock und dem Depot am unteren Ende des Layouts. Die zweite Konfiguration sieht hingegen zwei Blöcke und die Depots auf der linken Seite des Layouts vor.

Um ein möglichst breites Spektrum an Layoutvarianten zu untersuchen, sollen beide Basiskonfigurationen mit jeweils fünf Varianten untersucht werden. Innerhalb einer Basiskonfiguration variieren die Anzahl und die Länge der Lagergassen. Für beide Inputfaktoren wurden sinnvolle Minimal- und Maximalwerte definiert, die das Spektrum an industriellen Systemgrößen hinreichend repräsentieren sollen (vgl. Tab. 6-2).

Tabelle 6-2: Layoutfaktoren im LHC-Verfahren.

	<b>Basiskonfiguration 1</b>		<b>Basiskonfiguration 2</b>	
	Anzahl an Kommissionierblöcken: 1		Anzahl an Kommissionierblöcken: 2	
	Depot: unten		Depot: links	
	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>
Gassenlänge [m]	10	60	10	30
Anzahl an Gassen	3	20	3	20

Zur Durchführung des LHC-Verfahrens wurden die Software *R-Studio* und das Paket „lhc“ verwendet. Die zehn Layoutvarianten können der Tabelle 6-3 entnommen werden.

Tabelle 6-3: Zu untersuchende Layoutvarianten

	Gassenlänge [m]	Anzahl an Gassen
Layout 1a	12	15
Layout 1b	39	19
Layout 1c	25	3
Layout 1d	48	11
Layout 1e	56	9
Layout 2a	15	13
Layout 2b	12	8
Layout 2c	24	18
Layout 2d	20	3
Layout 2e	30	14

Der letzte Inputfaktor ist die Anzahl an Depots. Diese lässt sich im entwickelten Modell beliebig variieren und ist lediglich von der Breite (Depot unten) oder der Höhe (Depot links) des Gesamtsystems begrenzt. Die Anzahl an verfügbaren Depots und die Auswirkungen des Faktors auf die Gesamtleistung muss grundsätzlich im Verhältnis zur Anzahl an Agenten im System betrachtet werden. Ist die Anzahl an Depots größer, nehmen die Depots keinen großen Einfluss auf die Gesamtleistung. Anders ist es im umgekehrten Fall (Anzahl Depots < Anzahl Agenten). Je größer die Differenz, desto länger sind die Wartezeiten vor dem Depot, die sich auf die Leistung auswirken. Um im Rahmen dieser Studie unterschiedliche Szenarien, soll von acht Depots ausgegangen werden. Wie unter anderem die Verteilung der Agenten auf die zur Verfügung stehenden Depots gestaltet wird, soll im folgenden Unterabschnitt näher beschrieben werden.

## 6.2.4 Entwicklung des Versuchsplans

Wie in Unterabschnitt 6.2.2 beschrieben wurde, wird für die übrigen Inputfaktoren ein Versuchsplan nach dem Morris-Screening genutzt. Ziel des Morris-Screenings ist es, den Einfluss einzelner Faktoren auf die definierten Leistungsparameter zu bestimmen. Dazu wird zwischen zwei Versuchsläufen lediglich ein Inputfaktor um eine Stufe variiert. Die berücksichtigten Faktoren und die jeweiligen Stufen sind in Tabelle 6-4 dargestellt.

Tabelle 6-4: Versuchsplan des Morris-Screenings

Inputfaktor	Stufen				
Anzahl an Agenten	4	8	12	16	
Verteilung der Agenten (Mensch/Roboter)	0/1	0,25/0,75	0,5/0,5	0,75/0,25	1/0
Lagerbelegungsstrategie	Frei		ABC		Zonierung
Positionen je Batch	5	10	15	20	
Größe des Auftragspools	Positionen je Batch		Position je Batch * Anzahl an Agenten		
Übergabe des Batches	Single			Multiple	
Auslastungsorientierte Auftragsvergabe	Ja			Nein	
Anzahl an Artikel je Auftragsposition	1	2	3	4	
Sicherheitszonen der Roboter	360 Grad		Vorne und Seite		Vorne

Für die *Anzahl an Agenten* wurden vier Stufen ausgewählt. Die kleinste Stufe beinhaltet vier Agenten, die größte 16. Die Stufenschritte ermöglichen es, in geeigneter Form kleinere Systeme bis hin zu sehr großen<sup>32</sup> mit 16 Agenten zu betrachten.

Für die prozentuale *Verteilung der Agenten* wurden insgesamt fünf Stufen mit einem Abstand von 25 Prozent gewählt. Der Vorteil dabei ist, dass alle denkbaren Verteilungen abgebildet werden können, sowohl homogene Systeme mit Agenten eines Typs als auch eine Gleichverteilung von Menschen und Robotern. Dadurch sollen Erkenntnisgewinne dazu erzielt werden, ob die untersuchten Strategien für alle Verteilungstypen gleich wirken oder ob je nach Konstellation der Agenten merkliche Unterschiede festzustellen sind.

Die *Lagerbelegungsstrategie* wird mit drei Freiheitsgraden untersucht. Ausgangssituation ist eine freie Belegung. Alternativ wird eine ABC-Belegung angewandt, die die Artikel nach ihrer Umschlagshäufigkeit gassenweise gruppiert. Hierbei kommissionieren beide Agenten alle drei Klassen. Die dritte Strategie beinhaltet eine zonenweise Lagerbelegung. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass ein gewisser Teil des Kommissioniersystems und des Artikelsortiments dem Roboter und der andere Teil dem Menschen zugeordnet werden. Innerhalb der Zone wird jedoch wieder eine freie Belegung angewandt. Mit der ABC-Belegung soll untersucht werden, ob in hybriden Kommissioniersystemen, in denen

<sup>32</sup>In Distributionszentren großer Versandhändler arbeiten parallel auch deutlich mehr als 16 Personen. Allerdings werden solche Zentren üblicherweise in mehrere übergeordnete Zonen unterteilt, wodurch jedes Kommissioniersystem wieder als eigenständiges System betrachtet werden kann.

die Interaktion zwischen den Agenten stärker als üblich berücksichtigt wird, eine ebenso große Leistungssteigerung hervorgerufen wird, wie es für klassische Kommissioniersysteme beschrieben wird. Die Zonierung soll zeigen, ob Unterschiede festzustellen sind, wenn Agenten ihren Arbeitsbereich vornehmlich mit anderen Agenten des gleichen Typs teilen.

Die Anzahl an *Positionen je Batch* wird mit vier Stufen mit jeweils einem Abstand von fünf Positionen untersucht. Zusätzlich wird zwischen zwei Zuständen des *Auftragspools* unterschieden. Entweder beinhaltet dieser stets nur die Anzahl an Positionen, die ein Agent anfordert, oder aber es stehen stets für alle im System arbeitenden Agenten genügend Positionen bereit<sup>33</sup>. Für die Versuchsdurchführung bedeutet dies, dass bei 5 Agenten und einer Batchgröße von 10 Positionen der Auftragspool stets über 50 Positionen verfügt, sodass die Agenten auf Grundlage des Batching die zehn besten<sup>34</sup> Positionen für ihre Tour zugewiesen bekommen.

Der dritte Aspekt beim Auftragsbatching betrifft die *Übergabe des Batches*. Diese erfolgt entweder einzeln, sodass aus dem Auftragspool jeweils eine Position gewählt wird, der Agent sich zu dieser Position bewegt, den entsprechenden Artikel entnimmt und erst dann die nächste Position ausgewählt und an den Agenten übermittelt wird. Bei der zweiten Variante wird hingegen der gesamte Batch (bspw. 10 Positionen) zu Beginn der Tour definiert und an den Agenten übergeben. Zusätzlich kann eine *auslastungsorientierte Auftragsvergabe* erfolgen. Dabei werden die aktuell im System zu kommissionierenden Positionen je Lagergasse überwacht und Positionen mit Artikeln bevorzugt, deren Lagergasse zum aktuellen Zeitpunkt weniger stark frequentiert ist. Dabei kann es vorkommen, dass von der übergeordneten Batchingstrategie, nämlich der Wahl des kürzesten Weges, abgewichen wird. Im Gegenzug sollen Interaktionen vermieden werden, die sonst Warte- und Ausweichvorgänge hervorrufen könnten. Der letzte Aspekt im Rahmen des Auftragsmanagements betrifft die *Anzahl an Artikeln je Auftragsposition*. Dieser gibt an, wie viele Artikel für eine Auftragsposition entnommen werden müssen.

Die Variation der *Sicherheitszonen der Roboter* komplettiert den Versuchsaufbau. Wie in Unterabschnitt 4.5.2 beschrieben, besitzt der Roboter in der Ausgangssituation eine 360-Grad-Sicherheitszone, die ihn zum Stopp auffordert, sobald ein Hindernis in diese eintritt. Die stufenweise Reduzierung der umliegenden Sicherheitszonen soll aufzeigen, inwieweit die Sicherheitszonen und die daraus resultierenden Warte- und Ausweichvorgänge die Leistungsfähigkeit des Roboters beeinflussen.

---

<sup>33</sup>In beiden Fällen wird gemäß Unterabschnitt 4.8.1 ein *Pull-Prinzip* zu Grunde gelegt. Diverse Voruntersuchungen haben gezeigt, dass bei komplexeren Versuchsdesign und einem *Push-Prinzip* die Leistung des Untersuchungsmodells deutlich abnimmt. Das *Push-Prinzip* ist jedoch nach wie vor für die Untersuchung einzelner Systemkonfigurationen zu empfehlen.

<sup>34</sup>Die Aufträge können entweder nach dem First in–First out Prinzip, nach dem Earliest-Deadline-First-Prinzip oder nach dem kürzesten Weg ausgewählt werden. Im Rahmen der Simulationsstudie wird jedoch ausschließlich der kürzeste Weg untersucht.

Das Morris-Screening wurde mit der Software *R-Studio* und dem Paket „sensitive“ durchgeführt. Für den beschriebenen Versuchsaufbau wurden 400 Experimentenläufe definiert, die jeweils für jede Layoutvariante aus Tabelle 6-3 umgesetzt wurden. Jeder Lauf wurde fünf Mal wiederholt, um stochastische Einflussfaktoren zu berücksichtigen, sodass insgesamt 20.000 Experimente simuliert wurden. Der folgende Unterabschnitt beschreibt die ersten Erkenntnisse aus den Ergebnisdaten.

### 6.3 Analyse der Ergebnisdaten

In der Ergebnisanalyse soll, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, die Pickleistung als Maßkennzahl herangezogen werden. Diese soll zunächst differenziert für den Menschen und den Roboter untersucht werden. Im ersten Schritt dieser Untersuchung soll ein Überblick über die dafür durchgeführten Versuche aus dem Morris-Screening für alle zehn Layoutvarianten geschaffen werden. Dazu dient Abbildung 6-3, die die Entwicklung der Pickleistung des Menschen innerhalb der Layoutgruppen darstellt.

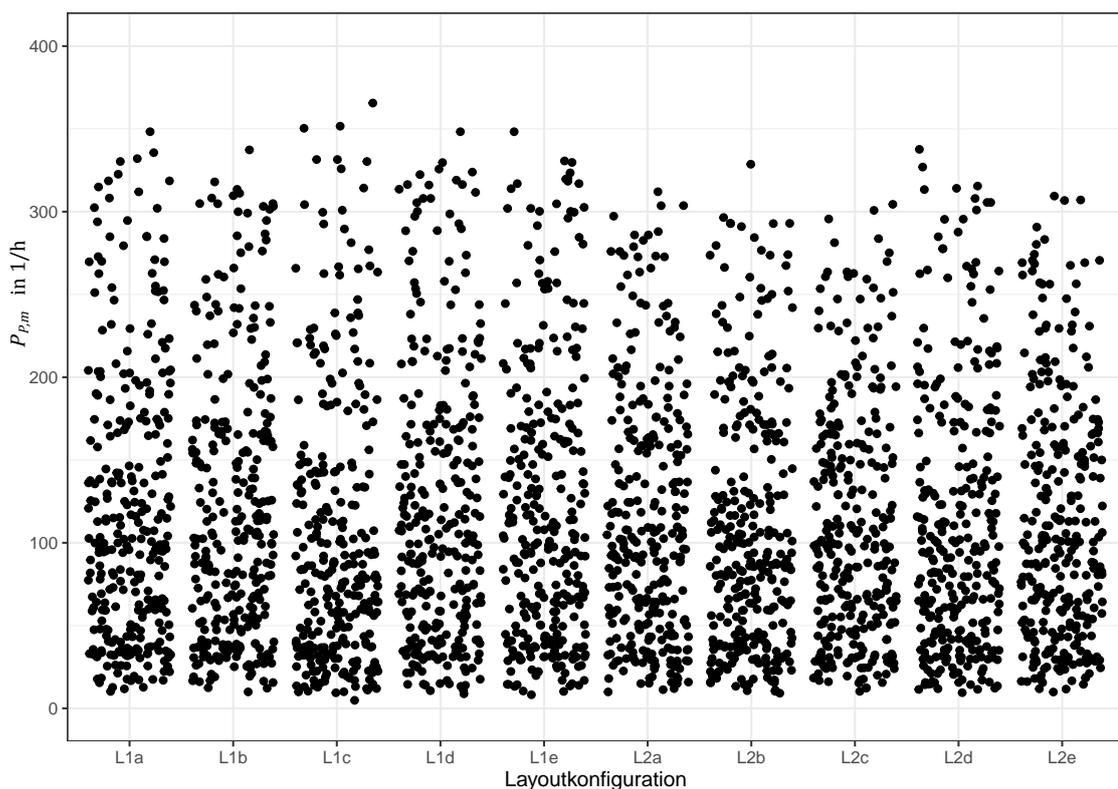


Abbildung 6-3: Verteilung der Pickleistung des Menschen über alle Layoutkonfigurationen hinweg

Ein Punkt in der Grafik entspricht dem Ergebnis an Picks pro Stunde innerhalb einer Konfiguration des Morris-Screenings. Das bedeutet, dass pro Layout 400 Ergebniswerte abgebildet sind. In der Abbildung ist lediglich die Streuung der Punkte innerhalb der vertikalen

Achse entscheidend. Die Verteilung innerhalb der Säule eines Layouts auf der X-Achse hat keine weitere Bedeutung für den hier untersuchten Zusammenhang.

Bei näherer Betrachtung der Abbildung wird deutlich, dass die Ergebniswerte in allen Layoutvarianten einer ähnlichen Streuung unterliegen. Viele der Ergebniswerte liegen im Bereich von bis zu 150 Picks pro Stunde. Darüber hinaus können einzelne Konfigurationen Werte über 200 Picks pro Stunde erreichen. Daher stellt sich die Frage: *Welche Inputfaktoren haben einen erheblich positiven und welche einen negativen Einfluss auf die Picks pro Stunde?*

Betrachtet man zunächst die Konfigurationen mit der geringsten Pickleistung, kann festgestellt werden, dass die Mehrzahl an Konfigurationen bei zwei Faktoren stets den gleichen Ausprägungen unterliegt. Die auslastungsorientierte Auftragsvergabe ist aktiv und der Batch wird einzeln je Position an den Menschen übergeben. Im Rahmen der Auftragsvergabe werden bewusst die Positionen bevorzugt, die in Gassen liegen, die zum Betrachtungszeitpunkt einer geringen Auftragslast unterliegen. Bei der positionsweisen Übergabe des Batches wird angenommen, dass durch die zeitversetzte Übergabe der Positionen kürzere Touren generiert werden können, da seit Beginn der Tour weitere Aufträge in den Auftragspool aufgenommen wurden. Die Kombination beider Ausprägungen führt jedoch dazu, dass der Algorithmus bei Übergabe einer weiteren Position eine komplett leere Gasse, in der sich kein Agent befindet, bevorzugt. Dies kann zu längeren Wegen führen. Wenn zusätzlich eine hohe Gesamtanzahl an Agenten im System ist, steigt zudem die Wahrscheinlichkeit von Interaktionen. Daher sollen für die weiteren Analysen Konfigurationen mit den beiden Ausprägungen vernachlässigt werden.

Berücksichtigt man die übrigen Ergebniswerte, sind nach wie vor Läufe mit einer Leistung von unter 50 Picks pro Stunde zu erkennen. Auch dort gibt es für alle Layoutvarianten wiederkehrende Konfigurationen mit gleichen Faktorstufen. Zunächst ist auffällig, dass bei allen der Batch aus lediglich fünf Positionen besteht. Hinzu kommt, dass jede Position nur einen Pick erfordert. Dies führt im Vergleich zu anderen Konfigurationsmöglichkeiten zu sehr kurzen Kommissioniertouren mit nur wenigen Picks. Dieser Umstand wird nochmals durch die Lagerbelegungsstrategien Zonierung oder ABC verstärkt, die den Großteil der Faktorstufen ausmachen. Dies liegt daran, dass in beiden Fällen die räumliche Nähe der Positionen eines Batches entweder statistisch durch die ABC-Verteilung oder durch die getrennten Zonen reduziert wird. Interessanterweise findet sich unter den Experimenten mit den geringsten Picks pro Stunde nur eine Konfiguration mit einer freien Lagerbelegung. Darüber hinaus sind bei allen Experimenten mindestens zwölf Agenten im System. Hervorzuheben ist hier, dass nicht nur bei den kleineren Layoutkonfigurationen die hohe Anzahl an Agenten die Leistung mindert, sondern auch bei den größeren. Damit liegt die Vermutung nahe, dass nicht ausschließlich die Interaktionen innerhalb der Kommissioniergassen einen entscheidenden Einfluss haben, sondern zudem auch die Interaktionen in der Vorzone um das Depot herum.

Die Kombination dieser Faktorstufen führt gesamtheitlich zu diesen schlechten Leistungswerten, woraus sich die grundsätzliche These ableiten lässt: Je kleiner der Batch einer Kommissioniertour, desto häufiger kommen die Agenten zum Depot und müssen dort einen Rüstvorgang vornehmen. Gibt es dann auch noch mehr Agenten als Abgabepplätze, können Wartezeiten entstehen, die die Leistung weiter mindern. Dies kann sich durch eine umschlagsorientierte Lagerbelegungen verstärken, da sich die Interaktionen innerhalb einiger weniger Kommissioniergassen erhöhen. Daher sollte bei einer begrenzten Kapazität der Depots möglichst eine längere Kommissioniertour gewählt werden, entweder in Form einer freien Lagerbelegung oder durch eine größere Anzahl an Positionen je Batch, sodass die Wegstrecken länger werden und die Ankunftszeiten am Depot weiter auseinanderliegen. Für den Roboter lässt sich eine ähnliche Leistungsverteilung feststellen (vgl. Abb. 6-4).

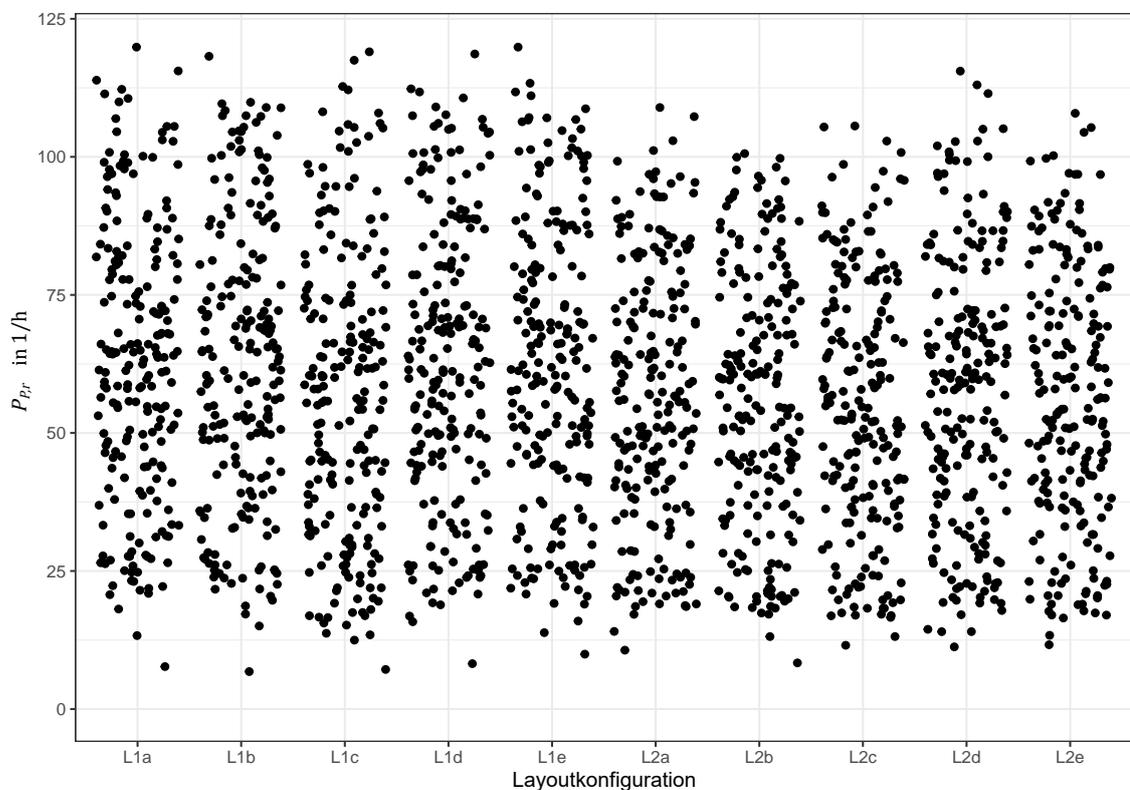


Abbildung 6-4: Verteilung Pickleistung des Roboters über alle Layoutkonfigurationen hinweg

Wie zuvor bei den Menschen, ist die Verteilung der Ergebniswerte über die einzelnen Layoutvarianten hier sehr ähnlich. Allerdings ist die Spanne zwischen dem maximalen und dem minimalen Wert deutlich geringer. Dies liegt vor allem an der reduzierten Leistungsfähigkeit der Roboter, die nur in Einzelfällen Leistungswerte von über 100 Picks pro Stunde erreicht. Wie beim Menschen sind die positiven Ausreißer in der Regel auf die erhöhte Anzahl der Picks pro Position zurückzuführen. Bei näherer Betrachtung der negativen Ausreißer fallen auch hier in den Experimenten gemeinsame Faktorstufen auf. Hierbei handelt es sich meist um eine zonierte Lagerbelegung, bei der jedoch ausschließlich Roboter und keine

Menschen eingesetzt werden<sup>35</sup>. Es lassen sich jedoch auch vereinzelt Versuche mit einem zonierten homogenen Robotersystem mit einer Leistung oberhalb von 50 Picks pro Stunde feststellen. In den negativen Fällen liegt die Anzahl an Positionen bei lediglich fünf je Batch, bei den positiven abermals bei 20 Positionen. Auch hier kann demnach angenommen werden, dass nicht ausschließlich die auftretenden Interaktionen innerhalb der Kommissioniergassen die Leistungsfähigkeit bremsen, sondern zudem die begrenzten Depotplätze und die auftretenden Wartezeiten und die kürzeren Ankunftszeiten der Roboter.

Die ersten Analysen haben gezeigt, dass insbesondere bei den Picks pro Stunde für alle Layoutvarianten eine ähnliche Verteilung der Ergebnisse auftritt. Zudem wurde deutlich, dass vor allem die negativen Ausreißer bei allen Varianten auf gleiche Experimente mit ähnlichen Faktorstufen zurückzuführen sind. Damit konnten erste Rückschlüsse auf die Leistungsentwicklung beider Agenten gezogen werden. Allerdings beruhen diese Thesen auf einer subjektiven Wahrnehmung davon, wie ein solches hybrides System funktioniert und welche Faktoren einen entsprechend großen Einfluss haben müssten. Um diese Vermutungen wissenschaftlich zu überprüfen, sollen im nächsten Abschnitt die *Effective Elements* aufgezeigt werden, also die Faktoren, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Systems haben.

## 6.4 Effective Elements des Morris-Screenings

Effective Elements ermöglichen eine Kategorisierung der Inputfaktoren. Wie in Unterabschnitt 6.2.2 und in den Gleichungen 6-2 bis 6-4 näher beschrieben, lassen sich die Faktoren in solche mit geringem oder solche mit keinem Effekt ( $\mu_j$  und  $\sigma_j$  gering) unterteilen. Des Weiteren lassen sich Faktoren identifizieren, die einem linearen Effekt ohne Abhängigkeiten zu anderen Inputfaktoren unterliegen ( $\mu_j$  gering,  $\sigma_j$  hoch). Die dritte Gruppe sind Faktoren mit einem hohen Effekt und einer starken Abhängigkeit zu anderen Faktoren ( $\mu_j$  hoch und  $\sigma_j$  hoch). Die Abbildung 6-5 zeigt die Anordnung der betrachteten Inputfaktoren für die Layoutvarianten 1a und 1c für die Pickleistung beider Agenten.

Zunächst sei darauf hingewiesen, dass die Absolutwerte für  $\mu_j$  und  $\sigma_j$  für die Beurteilung der Faktoren vernachlässigt werden können. Entscheidend ist die Positionierung der einzelnen Inputfaktoren innerhalb des Diagramms. Betrachtet man die Diagramme je Layoutkonfiguration, kann grundsätzlich eine sehr ähnliche Anordnung der Faktoren festgestellt werden. Nahe dem Nullpunkt befindet sich der Inputfaktor Sicherheitszonen des Roboters. Hier zeigt sich, dass eine Veränderung des Faktors keinen maßgeblichen Einfluss auf die Pickleistung beider Agenten genommen hat. Dies liegt daran, dass die Sicherheitszone in Fahrtrichtung nach wie vor in allen Varianten vorhanden war. Eine frontale Begegnung ruft

---

<sup>35</sup>Im Versuchsdesign wurden bewusst keine Restriktionen berücksichtigt. Es zeigt sich jedoch, dass eine Zonierung in einem homogenen System (nur Menschen oder Roboter) keine sinnvolle Alternative darstellt. Daher wurden diese Versuche nachträglich von weiteren Analysen ausgeschlossen.

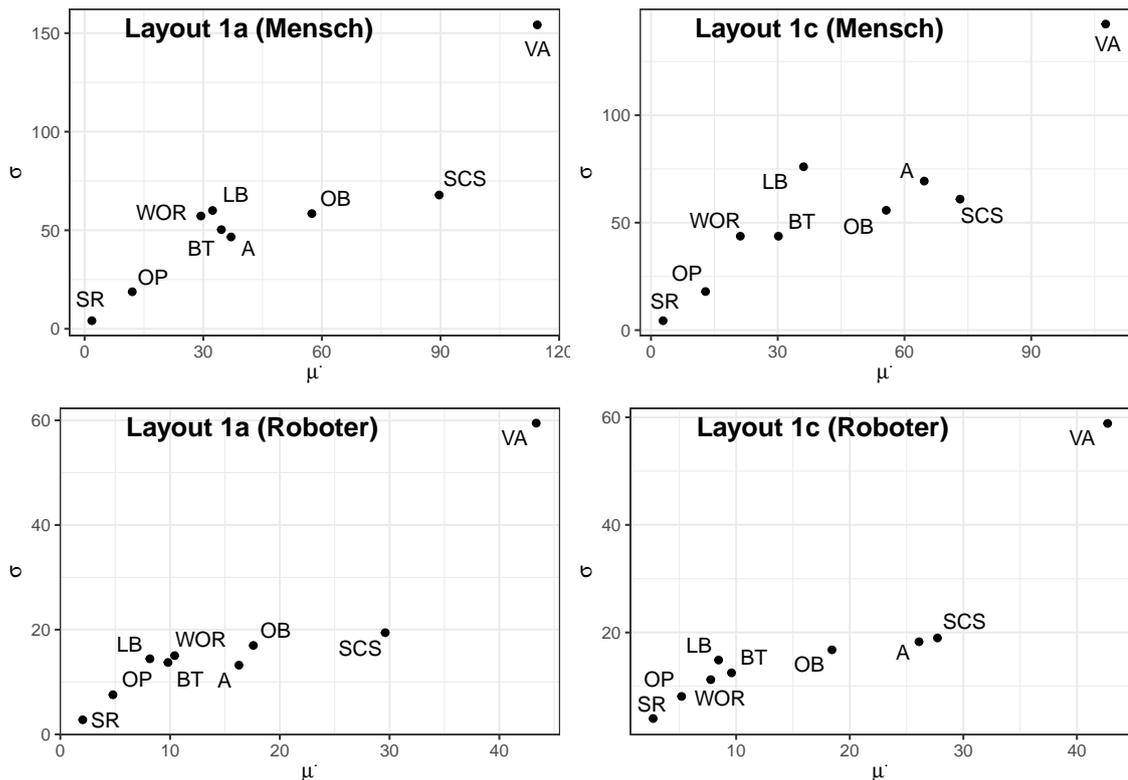


Abbildung 6-5: Effective Elements für die Pickleistung von Mensch und Roboter. **A** = Anzahl an Agenten; **BT** = Übergabe des Batches; **LB** = Lagerbelegungsstrategie; **OB** = Anzahl an Positionen je Batch; **OP** = Größe des Auftragspool; **SCS** = Anzahl an Artikeln je Auftragsposition; **SR** = Sicherheitszonen der Roboter; **VA** = Verteilung der Agenten; **WOR** = Auslastungsorientierte Auftragsvergabe

entweder eine längere Pause oder sogar das eigenständige Umfahren eines Hindernisses hervor. Kürzere Unterbrechungen aufgrund der seitlichen oder hinteren Sicherheitszone haben demnach weniger Einfluss auf die Pickleistung des Roboters.

Eine unterschiedliche Position innerhalb der beiden Layoutvarianten hat die *Variable A*, die die Gesamtanzahl an Agenten beschreibt. In beiden Diagrammen für das Layout 1a ist diese am unteren Ende angeordnet, für das Layout 1c hingegen am oberen Ende. Das kann damit begründet werden, dass, wie zuvor festgestellt, die Gesamtanzahl an Agenten in den kleineren Layoutvarianten einen stärkeren (negativen) Einfluss auf die Leistungsfähigkeit hat. Der Umstand zeigt sich somit auch in den Effective Elements.

Ebenfalls auffällig ist die *Variable VA*, die die Verteilung der Agenten im System angibt. Sie hat in allen vier Diagrammen den höchsten Wert für  $\mu$  und  $\sigma$ . Hierbei lässt sich eine Schwachstelle für die Effective Elements feststellen. Da zwischen zwei Versuchen jeweils nur ein Inputfaktor variiert wird, kann es vorkommen, dass von einem homogenen System (nur Menschen) hin zu einem hybriden System (Mensch und Roboter) gewechselt wird. Dies hat zur Folge, dass die Pickleistung von 0 auf einen Wert  $> 0$  steigt. Draus resultiert das hohe  $\mu$ . Das hohe  $\sigma$  deutet darauf hin, dass der Einfluss der *Variable VA* auf die Pickleistung

jedoch noch von weiteren Faktoren abhängt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Effective Elements einen Einblick in die Gestaltung von hybriden Kommissioniersystemen geben. Dabei können die berücksichtigten Inputfaktoren ihrem Einfluss nach differenziert werden. Allerdings bleiben bei der Untersuchung weiterhin Fragen offen, die für eine ganzheitliche Einflussanalyse beantwortet werden müssen. Zum einen werden zwar die Abhängigkeiten (hohes  $\sigma$ ) zu anderen Inputfaktoren dargestellt, allerdings sollten diese Abhängigkeiten herausgerechnet werden. Zum anderen geben die Effective Elements keine Auskunft darüber, in welche Richtung die Faktoren die Leistungsfähigkeit beeinflussen, also ob diese grundsätzlich die Leistung mindern oder erhöhen bzw. welche der Faktorstufen in welchem Maß die Leistung beeinträchtigen. Um diese Erkenntnislücke zu schließen, soll im weiteren Verlauf ein Regressionsmodell entwickelt werden.

## 6.5 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse ist ein statistisches Analyseverfahren, welches Beziehungen zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen abbilden kann (vgl. [Bac-2016, S. 64; Kle-2016b, S. 183]). Die abhängige Variable ist die Variable, die im Fokus der Analyse steht (bspw. die Pickleistung). Den unabhängigen Variablen unterstellt man einen Einfluss, der im Rahmen der Regressionsanalyse bestimmt werden soll. Demnach ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang (vgl. [Bac-2016, S. 65]):

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_J) + u \quad (6-5)$$

$u$  stellt in der Formel eine Zufallsvariable (auch Störgröße genannt) dar, mit der nicht beobachtbare Einflussgrößen erklärt werden sollen (vgl. [Bac-2016, S. 65; Kle-2016b, S. 184]). Die Regressionsanalyse hat drei wesentliche Anwendungsbereiche. Zunächst kann eine Ursachenanalyse durchgeführt werden, aus der hervorgeht, wie hoch der Einfluss einzelner unabhängiger Variablen ist. Ein weiterer Anwendungsbereich ist die Wirkungsprognose. Durch diese soll aufgezeigt werden, welche Auswirkungen die Änderungen einer unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable haben. So wäre im Rahmen dieser Untersuchung beispielsweise die Veränderung der Agentenanzahl und deren Auswirkung auf die Leistung unmittelbar quantifizierbar. Der dritte Anwendungsbereich, der jedoch in dieser Arbeit keine Anwendung findet und nur der Vollständigkeit halber aufgeführt werden soll, ist die Zeitreihenanalyse. Dadurch kann untersucht werden, inwieweit sich eine abhängige Variable im Zeitverlauf verändert, um so Prognosen für die Zukunft zu treffen. (vgl. [Bac-2016, S. 67])

### 6.5.1 Entwicklung eines Regressionsmodells

Im Fokus einer Regressionsanalyse steht die Regressionsfunktion (vgl. Gleichung 6-5), welche einen Output des Regressionsmodells darstellt. In dieser Untersuchung soll der Fokus auf die Interpretation der Regressionskoeffizienten gelegt werden. Diese beschreiben den Effekt der Änderung einer unabhängigen Variablen ( $X$ ) auf die abhängige Variable ( $Y$ ) (vgl. [Bac-2016, S. 80]). Damit lässt sich die oben beschriebene Regressionsfunktion folgendermaßen konkretisieren (vgl. [Bac-2016, S. 79]):

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_jx_j + \dots + b_Jx_J \quad (6-6)$$

Bei einem Koeffizienten  $b_1 = 0,25$  würde die Erhöhung von  $x_1$  um 100 den Output  $\hat{Y}$  um 25 erhöhen. Wie bereits bei der Entwicklung der Versuchspläne wird im Rahmen der Entwicklung des Regressionsmodells auf die Software *R-Studio* zurückgegriffen.

Bei der Entwicklung des Regressionsmodells müssen zunächst die Inputfaktoren aus Tabelle 6-4 transformiert werden. Das ist für alle kategorischen Faktoren notwendig, da die Regressionsanalyse sie nicht unmittelbar verarbeiten kann. Am Beispiel der Lagerbelegung, die über die Freiheitsgrade Frei, ABC und Zonierung verfügt, wird die freie Lagerbelegung als Bezugsgröße gesetzt. Das Regressionsmodell bestimmt dann die Höhe des Einflusses, wenn einer der anderen beiden Freiheitsgrade gewählt wird. Dieses Vorgehen erfolgt analog für alle kategorischen Inputfaktoren. Eine weitere Besonderheit entsteht bei der Verteilung der Agenten. Diese muss für beide Agenten getrennt betrachtet werden, damit das Regressionsmodell die Werte verarbeiten kann. Hier entsteht jedoch das Problem, dass die beiden Verteilungen nicht unabhängig voneinander sind, da die Erhöhung des Anteils des Menschen um 25 Prozent folglich eine Reduktion des Anteils um denselben Betrag beim Roboter zu Folge haben muss. Daraus ergeben sich folgende unabhängige Variablen (vgl. Tab 6-5).

### 6.5.2 Interpretation des Regressionsmodells

Zur Interpretation des Regressionsmodells werden die bereits beschriebenen Regressionskoeffizienten genutzt. Bevor diese näher betrachtet werden, bedarf es zunächst einer Untersuchung von zwei weiteren Qualitätsmerkmalen. Dabei ist einerseits zu untersuchen, inwieweit die Variable  $Y$  durch das Regressionsmodell hinreichend abgeschätzt wird. Andererseits gilt es zu prüfen, inwieweit die einzelnen Inputfaktoren zur Erklärung der Variablen  $Y$  beitragen (vgl. [Bac-2016, S. 81]). Zur globalen Untersuchung eignet sich vor allem das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ . Das Bestimmtheitsmaß gibt an, welcher Anteil der zugrunde liegenden Streuung in den Daten durch das Regressionsmodell erklärt werden kann. Mit

Tabelle 6-5: Unabhängige Variablen im Rahmen der Regressionsanalysen

Variable	Referenz
Anzahl an Agenten	-
Anteil an Robotern	-
Positionen je Batch	-
Anzahl an Artikeln je Auftragsposition	-
Lagerbelegung: <b>Zonierung</b>	Freie Lagerbelegung
Lagerbelegung: <b>ABC</b>	Freie Lagerbelegung
Auftragspool: <b>Leer</b>	Positionen je Batch * Anzahl an Agenten
Übergabe des Batches: <b>Single</b>	Multiple
Auslastungsorientierte Freigabe: <b>Ja</b>	Nein
Sicherheitszone Roboter hinten: <b>aktiv</b>	Sicherheitszone vorne
Sicherheitszone Roboter Seiten: <b>aktiv</b>	Sicherheitszone vorne

zunehmenden Variablen, wie sie in Gleichung 6-6 dargestellt sind, steigt auch das Bestimmtheitsmaß, allerdings muss dies nicht bedeuten, dass das Regressionsmodell bessere Ergebnisse für  $Y$  liefert. Daher empfiehlt die Literatur die Anwendung eines korrigierten Bestimmtheitsmaßes ( $R_{korrr}^2$ ), welches trotz steigender Anzahl an Variablen auch sinken kann (vgl. [Bac-2016, S. 85 f.]). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird stets das korrigierte Bestimmtheitsmaß herangezogen.

Die Qualitätskontrolle der einzelnen Variablen zur Erklärung von  $Y$  wird durch den p-Wert beschrieben. Dieser kann, wie schon  $R^2$  bzw.  $R_{korrr}^2$ , durch die Verwendung gängiger Statistiksoftware berechnet werden. Entscheidend ist die Interpretation des definierten Signifikanzniveaus ( $\alpha$ ). Der Grenzwert von  $\alpha$  liegt üblicherweise bei 0,05. Das hat zur Folge, dass alle p-Werte  $\leq 0,05$  als signifikant bezeichnet werden können und somit die jeweiligen Variablen einen Einfluss auf die abhängige Variable  $Y$  haben. (vgl. [Bac-2016, S. 90 f.])

Wenn sowohl das Regressionsmodell mittels  $R_{korrr}^2$  als auch die einzelnen p-Werte der unabhängigen Variablen im gewünschten Bereich liegen, können die Regressionskoeffizienten analysiert werden. Allerdings lässt die Höhe von  $b$  keine Rückschlüsse auf die Wichtigkeit einzelner Variablen zu. Dies liegt vor allem daran, dass der Wert  $b_j$  abhängig von der Messskala von  $x_j$  ist. Ein üblicher Weg, um dem entgegenzuwirken, besteht darin, die Koeffizienten zu standardisieren, um so die Beta-Werte zu bestimmen ( $\hat{b}_j$ ) (vgl. [Bac-2016, S. 80]). Die folgende Abbildung 6-6 fasst die Ergebnisse einer beispielhaften Regressionsanalyse zusammen.

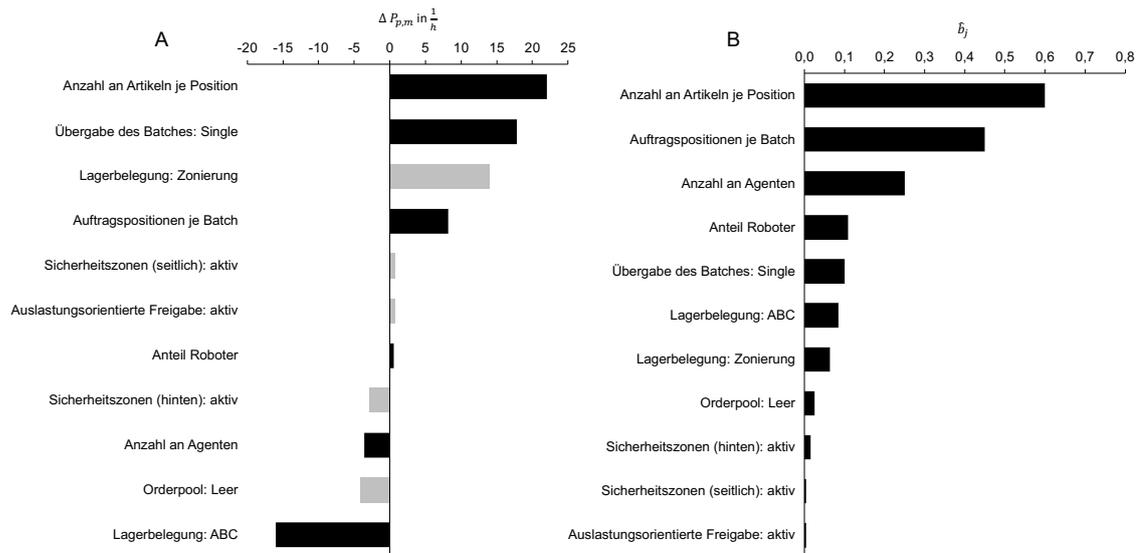


Abbildung 6-6: *Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse einer Regressionsanalyse. A: Abbildung der Regressionskoeffizienten und damit die Veränderung der Picks pro Stunde des Menschen bei der Variation einer Einheit der unabhängigen Variablen. Die grau eingefärbten Werte haben einen p-Wert  $> 0,05$ . B: Standardisierte Beta-Koeffizienten, um den Einfluss der einzelnen Inputfaktoren vergleichen zu können*

Teil A bildet die berechneten Regressionskoeffizienten ab. Diese zeigen die reale Veränderung der abhängigen Variablen, in diesem Fall die Pickleistung des Menschen, wenn der Inputfaktor, bspw. Positionen je Batch, um eine Einheit erhöht wird. Darüber hinaus zeigt die Ausrichtung der jeweiligen Balken, ob die Erhöhung um eine Einheit die Picks pro Stunde positiv oder negativ beeinflusst. Wird von einer freien Lagerbelegung auf eine ABC-Lagerbelegung umgestellt, sinkt hingegen die Pickleistung des Menschen um ca. 10 Picks pro Stunde. Zusätzlich können der Grafik die jeweiligen p-Werte entnommen werden. In diesem Kontext wären die Einflüsse des Faktors auslastungsorientierte Freigabe sowie die Sicherheitszone hinten nicht signifikant. Das bedeutet, dass eine Variation dieser Variablen keine statistisch erkennbare Wirkung auf die abhängige Variable *Pickleistung* des Menschen hat.

Die Ergebnisse der standardisierten Beta-Koeffizienten sind in Teil B der Abbildung dargestellt. In diesem exemplarischen Beispiel hat der Faktor Anzahl an Artikeln je Position den höchsten Beta-Wert und damit den größten Einfluss auf die Picks pro Stunde des Menschen. Der Faktor Anteil an Robotern, der bei einer Erhöhung um eine Einheit die Leistung des Menschen nur marginal erhöht, scheint jedoch unter Berücksichtigung des Beta-Koeffizienten den viertgrößten Einfluss zu haben.

### 6.5.3 Auswahl eines Referenzlayouts

Zur Durchführung der Einflussanalyse bedarf es für jedes Layout eines eigenen Regressionsmodells. Insgesamt werden daher zehn Regressionsmodelle entwickelt und die Einflüsse

se der einzelnen Inputfaktoren analysiert. Jedes der zehn Modelle einzeln vorzustellen und zu diskutieren, wäre jedoch nicht zielführend. Stattdessen soll bewusst ein Layout exemplarisch herausgegriffen werden, während die übrigen neun im Anhang B aufgeführt werden. Zusätzlich werden die Ergebnisse aller zehn Modelle einander in Abschnitt 6.7 gegenübergestellt.

Als Referenzlayout soll das Layout 1a dienen (vgl. Abb. 6-7). Dieses kann in Bezug auf die untersuchten Layoutvarianten als durchschnittlich groß bezeichnet werden, was vor dem Hintergrund der Erkenntnisse aus den Abschnitten 6.3 und 6.4 ermöglicht, dass alle Faktorstufen mögliche Einsatzszenarien darstellen. Außerdem verfügt das Layout 1a über keinen Quergang, sodass auch hier auf eine häufige Gestaltung in der industriellen Praxis Rücksicht genommen wird.

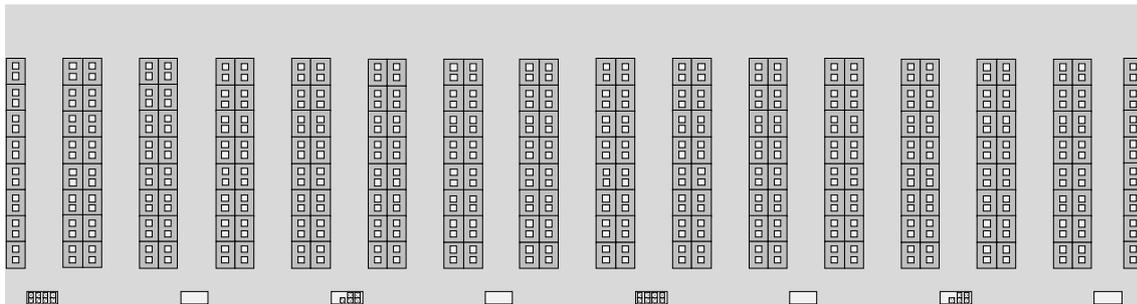


Abbildung 6-7: Referenzlayout L1a

## 6.6 Einflussanalyse der relevanten Inputfaktoren im Referenzlayout

Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Abbildung 6-8 dargestellt. In den Diagrammen A und C sind die Regressionskoeffizienten als Veränderung in Picks pro Stunde für den Menschen (A) und den Roboter (C) abgebildet. Die farbliche Gestaltung der Diagramme A und C gibt Auskunft über die Signifikanz der Inputfaktoren. Die grau eingefärbten Werte haben einen  $p$ -Wert  $< 0,05$ . Die Diagramme B und D zeigen die standardisierten Beta-Koeffizienten.

Im ersten Schritt soll der Fokus auf die Diagramme A und C gelegt werden. Dabei wird deutlich, dass für Mensch und Roboter eine Veränderung der Anzahl an Artikeln je Position die höchsten Veränderungen der Pickleistung verursacht. Können die Artikel um eine Einheit erhöht werden, ermöglicht dies eine Leistungssteigerung von ca. 45 Picks pro Stunde beim Menschen und ca. 15 Picks pro Stunde beim Roboter. Der größte Leistungsverlust entsteht bei einer Umstellung von einer freien Lagerbelegung hin zu einer ABC-Belegung. Hier reduziert sich die Leistung des Menschen um ca. 15 Picks pro Stunde und die des Roboters um ca. 5 Picks pro Stunde. Es ist jedoch zu beachten, dass die Höhe des jeweiligen Regressionskoeffizienten noch keine Aussage über die Relevanz und den Einfluss eines

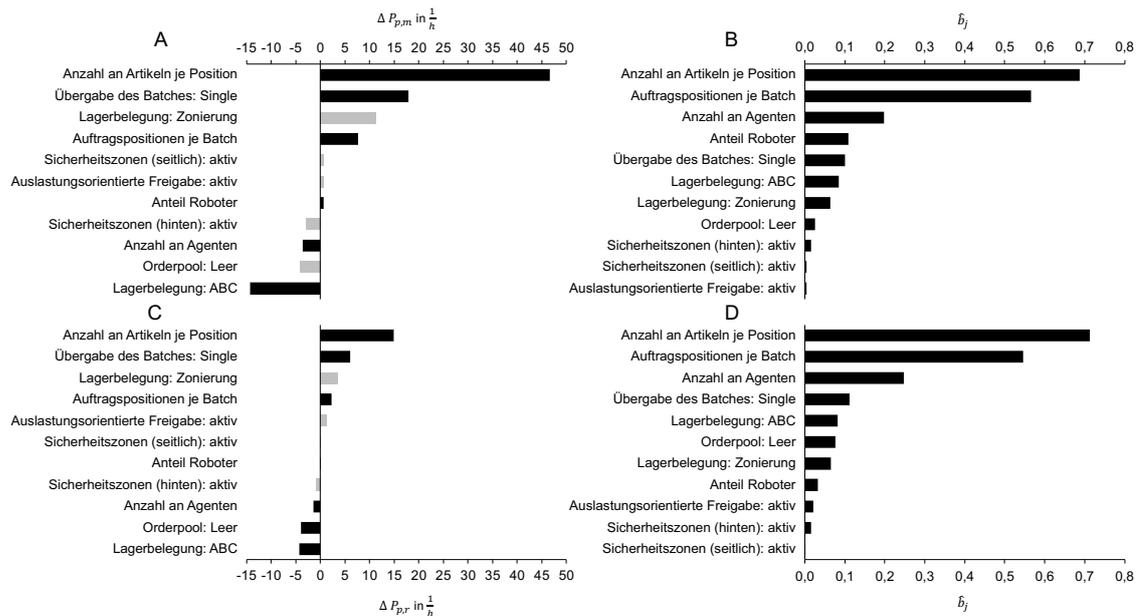


Abbildung 6-8: Ergebnis der Regressionsanalyse für das Layout L1a. A: Regressionskoeffizienten für den Menschen. B: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Menschen. C: Regressionskoeffizienten für den Roboter. D: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Roboter

Inputfaktors ermöglicht. Sowohl für den Menschen als auch für den Roboter sind die Anzahl an Artikeln je Position ebenfalls der Inputfaktor mit dem höchsten Beta-Koeffizienten. Allerdings wird auch deutlich, dass die Übergabe des Batches, obwohl sie beim Menschen die Leistung um 18 Picks pro Stunde und beim Roboter um 6 Picks pro Stunde erhöht, lediglich an fünfter Stelle in den Diagrammen B und D steht.

Der erste Eindruck zeigt, dass die wesentlichen Inputfaktoren einen ähnlichen Einfluss auf die beiden Agenten haben, auch wenn die Beträge der Regressionskoeffizienten unterschiedlich sind. In den nachfolgenden Unterabschnitten soll nochmals näher auf die einzelnen Inputfaktoren eingegangen werden.

### 6.6.1 Anzahl an Artikeln je Position

Dass die Anzahl an Artikeln je Position bei beiden Agenten sowohl den höchsten Regressionskoeffizienten als auch den größten Einfluss auf die Picks pro Stunde aufweist, wirkt nachvollziehbar. Wenn es möglich ist, bei einem Stopp innerhalb einer Kommissioniertour mehrere Artikel zu greifen, steigt folglich auch die Gesamtanzahl an Picks, die innerhalb eines Betrachtungszeitraums erreicht werden kann. Andererseits scheinen die längeren Stillstandszeiten der Agenten keine Steigerung der Interaktionen zur Folge haben. Die Anzahl an Artikeln je Position lässt sich jedoch vom Betreiber eines Kommissioniersystems nur bedingt beeinflussen und ist zudem abhängig vom Geschäftsmodell und der Branche. Im Business-to-Business-Bereich oder innerhalb eines Kommissioniersystems für Produktionssysteme ist die Wahrscheinlichkeit deutlich höher, dass ein spezifischer Artikel mehr-

fach nachgefragt wird. Handelt es sich jedoch um ein Distributionssystem, welches an Endkunden liefert, tritt dieser Umstand vermutlich weniger häufig ein. Zieht man beispielsweise die Kommissionierung von Schuhen heran, ist es deutlich wahrscheinlicher, dass ein Kunde das gleiche Modell in zwei unterschiedlichen Größen oder Farben bestellt, als mehrfach den identischen Artikel. Die Lagerung gleicher Artikel mit unterschiedlichen Eigenschaften (Größe, Farbe, etc.) in räumlicher Nähe kann somit einen ähnlichen Effekt erzielen.

Neben einer angepassten Lagerbelegung ermöglicht ein komplexeres Batchingverfahren in Form eines Multi-Order-Pickings ebenfalls, dass mit einem Stopp mehrere Artikel kommissioniert werden. Dies hat folglich denselben Effekt, nämlich dass der Abstand zwischen zwei Picks möglichst gering gehalten werden kann, was wiederum die Picks pro Stunde maßgeblich positiv beeinflusst.

### 6.6.2 Anzahl an Positionen je Batch

Die Erhöhung der Positionen je Batch ist laut dem Beta-Koeffizienten der Inputfaktor mit dem zweitgrößten Einfluss. Es kann festgestellt werden, dass mit steigender Anzahl an Positionen je Batch die Länge der Kommissioniertour zunimmt<sup>36</sup>. Damit würden auch die Abstände zwischen zwei Stopps zur Entnahme steigen, solange dem nicht durch spezifische Lagerbelegungsstrategien oder einen großen Pool an potenziellen Aufträgen entgegengewirkt wird. Mit einer längeren Kommissioniertour müsste im Gegenzug auch die Anzahl an Interaktionen je Tour steigen. Die Korrelation zwischen den Variablen Ausweichvorgänge je Tour und Anzahl an Positionen je Batch ist mit  $-0,24$  für den Menschen und  $-0,14$  für den Roboter schwach negativ korrelierend. Damit kann zwar keine Kausalität nachgewiesen werden, allerdings wird die Annahme widerlegt, dass die Interaktionen mit steigender Anzahl an Positionen je Batch zunehmen.

Verlängert sich eine Kommissioniertour, indem die Anzahl an Positionen erhöht wird, sollte sich im Gegenzug jedoch die Gesamtanzahl an absolvierten Touren innerhalb eines Betrachtungszeitraums (bspw. einer Schicht) reduzieren. Dies zeigt auch die stark negative Korrelation von  $-0,51$  zwischen Anzahl an Touren pro Tag und der Anzahl an Positionen je Batch. Durch die Minimierung der Touren reduziert sich folglich auch die Anzahl an Rüstvorgängen vor und nach jeder Tour. Dieser Zeitaufwand kann eingespart werden und ermöglicht, die Zeit zur eigentlichen Kommissionierung zu nutzen. Des Weiteren ermöglichen längere Kommissioniertouren bei Systemen mit einer höheren Anzahl an Agenten eine Entlastung der Vorzone, da die Wahrscheinlichkeit steigt, dass der Agent einen größeren Bereich des Systems befahren muss. Bei kleineren Kommissionieraufträgen ist die Frequenz der Depotbesuche höher und es können Wartezeiten und Interaktionen am De-

---

<sup>36</sup>Dies zeigt auch die Korrelation (Pearson) zwischen der Länge der Kommissioniertour (in Sekunden) und Anzahl an Positionen je Batch. Die Korrelation liegt für den Menschen bei  $0,66$  und bei  $0,77$  für den Roboter.

pot entstehen, die die Leistung minimieren. Man sollte daher die Anzahl an Positionen je Batch so hoch wie möglich auslegen.

### 6.6.3 Anzahl und Verteilung der Agenten

Mit Blick auf die Rangfolge der relevantesten Inputfaktoren aus Abbildung 6-8 ist die Variable Anzahl an Agenten die erste, die bei einer Erhöhung die Picks pro Stunde beider Agenten reduziert. Dass die Leistungsentwicklung bei kontinuierlicher Zunahme an Personen oder auch an Fahrzeugen nicht linear steigt, sondern ab einem bestimmten Punkt abflacht oder ggf. sogar abnimmt, haben bereits andere Arbeiten zeigen können (vgl. [Hab-2020, S. 143; Lie-2021, S. 137]).

Anders wirkt die Verteilung der Agenten auf die Entwicklung der Leistungsfähigkeit beider Agenten. In Hinblick auf die Rangfolge der Beta-Koeffizienten liegt der Einfluss des Anteils der Roboter bei Betrachtung der menschlichen Pickleistung auf dem vierten Platz, wohingegen es für den Roboter eine untergeordnete Rolle spielt, ob er vermehrt mit Menschen oder mit Robotern zusammenarbeitet (vgl. Abb. 6-8). Die Pickleistung des Menschen steigt um ca. 6 Picks pro Stunde, wenn der Anteil an Robotern um 10 Prozent im System erhöht wird. Einen Einfluss der Verteilung der Agenten auf die Leistungsfähigkeit des Roboters konnte aufgrund der fehlenden Signifikanz ( $p = 0,242$ ) nicht bestätigt werden. Allerdings zeigt dies auch der geringe Regressionskoeffizient von 0,5. Eine mögliche Begründung für die Leistungssteigerung des Menschen könnte sein, dass die Wahrscheinlichkeit von sich wiederholenden Interaktionen zwischen zwei Agenten abnimmt. So tritt eine Interaktion zwischen einem Menschen und einem Roboter meist nur einmal auf, da der Mensch sich durch seine Dynamik schneller vom Roboter entfernt. Bei einer Interaktion zwischen zwei Menschen kann es vorkommen, dass sie sich bspw. im weiteren Verlauf der Kommissioniergasse wieder begegnen, da der ausgewichene Mensch nun für einen Kommissioniervorgang angehalten hat. Dies zeigt die negative Korrelation zwischen dem Anteil an Robotern und den Ausweichvorgängen des Menschen je Tour von -0,22. Betrachtet man zusätzlich die Anzahl an Wartevorgängen je Tour des Menschen und den Anteil an Robotern, ist eine noch stärkere negative Korrelation von -0,42 zu erkennen. Es ist daher empfehlenswert, dass für eine möglichst hohe Pickleistung des Menschen anteilig mehr Roboter eingesetzt werden.

### 6.6.4 Batchingverfahren und Auftragspool

Bei den nun folgenden Inputfaktoren gilt es zu beachten, dass diesen stets eine Referenz gegenübergestellt wird. Im Fall des Batchingverfahrens ist die Referenz die Strategie Übergabe des Batches: Multiple. Gemäß Abbildung 6-8 erreicht der Mensch durch die sequenzielle Übergabe einzelner Positionen eine Steigerung von ca. 15 Picks pro Stunde und

der Roboter ca. 5 Picks pro Stunde. Üblicherweise stößt der fertige Agent im Depot die Erstellung neuer Aufträge an. Beim positionsweisen Batching wird dem Agenten zu Beginn der Tour jedoch nur eine Position übermittelt, während die übrigen im Auftragspool bleiben. Kommen in der Zwischenzeit, während der Agent auf dem Weg zur ersten Entnahmeposition ist, weitere Agenten im Depot an, generieren diese für ihre eigene Tour erneut neue Aufträge. Hat der Agent nun die erste Position kommissioniert, greift er nicht ausschließlich auf seine übrigen Aufträge im Auftragspool zu, sondern auch auf die generierten Aufträge der anderen Agenten und vice versa. Damit lassen sich statistisch gesehen kürzere Kommissioniertouren gestalten, die die Leistungsfähigkeit positiv beeinflussen<sup>37</sup>. Daher ist es empfehlenswert, dass die Aufträge positionsweise an die Agenten übermittelt werden.

Die Auswirkungen einer größeren Auftragsbasis waren ebenfalls Bestandteil der Untersuchung. Der Bezugspunkt bei diesem Inputfaktor war ein Mindestbestand an Aufträgen in Höhe von: Anzahl an Agenten \* Kapazität je Agent \* 10. Dem gegenüber stand ein leerer Auftragspool, sodass analysiert werden sollte, wie hoch die vermeintlich negativen Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Agenten sind, wenn die Größe des Auftragspools minimiert wird. Bei Betrachtung der Datenlage wird deutlich, dass zwar beide Regressionskoeffizienten für den Menschen und den Roboter negativ sind, die Ergebnisse beim Menschen jedoch wegen des p-Werts von 0,385 nicht statistisch signifikant sind. Damit wäre dieser Inputfaktor der erste, der einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Leistungsfähigkeit beider Agenten aufweist. Der grundsätzlich negative Trend auf die Pickleistung ist nachvollziehbar und lässt sich durch die schlechtere Gestaltung der Batches begründen, da weniger Aufträge zur Auswahl stehen. Interessanter ist jedoch die Frage, warum keine Signifikanz für den Menschen festgestellt werden konnte. Mit einer steigenden Anzahl an zur Verfügung stehenden Aufträgen können kürzere Touren entwickelt werden, da der Abstand zwischen zwei Entnahmepositionen reduziert werden kann. Dem Beta-Wert des Roboters nach zu urteilen, scheint er von diesem Umstand zu profitieren. Die fehlende Signifikanz für den Menschen kann damit begründet werden, dass das betrachtete Layout zu klein ist, sodass der Zugewinn eines komprimierten Batches nicht ausschlaggebend ist. Alternativ ist die zugrunde gelegte Gesamtmenge an zusätzlichen Aufträgen im Auftragspool für den Menschen nach wie vor zu klein, sodass keine signifikante Leistungssteigerung erreicht werden kann. Der ausschlaggebende Grund für die mangelnde Signifikanz in diesem Layout kann schlussendlich nicht sicher festgestellt werden. In Abschnitt 6.7 werden größeren Layoutvarianten hinzugezogen, sodass der Einfluss der Layoutgröße nochmals überprüft wird.

---

<sup>37</sup>Anzumerken ist, dass in dieser Konstellation der Auftragspool nie größer wird als die Anzahl an Agenten, multipliziert mit der Kapazität je Agent.

## 6.6.5 Lagerbelegung und Zonierung

Im Rahmen der Untersuchung wurden drei Lagerbelegungsstrategien analysiert: die freie Lagerbelegung, die ABC-Belegung und die zonierte Lagerbelegung. Dazu bedarf es bei der Regressionsanalyse dieser Inputfaktoren einer Referenz. In diesem Fall ist es die freie Lagerbelegung. Bei der näheren Betrachtung der Ergebniswerte aus Abbildung 6-8 wird deutlich, dass eine Umstellung von einer freien Lagerbelegung auf eine zonierte Belegung einen positiven Effekt auf die Leistungsfähigkeit beider Agenten hat. Eine Umstellung auf eine ABC-Belegung ruft jedoch einen negativen Effekt auf die Leistungsfähigkeit beider Agenten hervor. Allerdings zeigt die Analyse, dass bei beiden Agenten die positiven Effekte der zonierten Lagerbelegung statistisch nicht signifikant sind, auch wenn die Werte mit 0,08 und 0,06 sehr nahe an der üblichen Grenze von 0,05 liegen. In einzelnen Studien wird auch eine statistische Signifikanz bei einem  $p < 0,1$  diskutiert (vgl. [Bac-2016, S. 93]). Um dem wissenschaftlichen Konsens zu folgen, wird im Rahmen dieser Arbeit für eine gültige Signifikanz ein  $p$ -Wert  $< 0,05$  gefordert. Demnach wird der mögliche Einfluss einer Zonierung für dieses Referenzlayout nicht näher untersucht.

Anders ist es für die ABC-Belegung, für die in beiden Fällen eine statistische Signifikanz nachgewiesen werden konnte (vgl. Abb. 6-8). Sowohl für den Roboter als auch für den Menschen muss von einer Reduktion der Pickleistung ausgegangen werden, wenn von einer freien zu einer ABC-orientierten Lagerbelegung gewechselt wird. Interessanterweise greift hier nicht der Effekt, dass die Leistung gesteigert werden kann, wenn die Abstände zwischen zwei Picks möglichst gering gehalten werden. Bei einer ABC-Belegung wird der Abstand zwar nicht zwingend auf null reduziert, durch die räumliche Nähe der schnell drehenden Artikel statistisch gesehen jedoch stark verkürzt. Im Vergleich zu einer Steigerung der Artikel je Position, die die Leistungsfähigkeit deutlich erhöht, tritt dieser Effekt bei der ABC-Belegung nicht ein. In diesem Fall sinkt die Leistungsfähigkeit. Dies hängt damit zusammen, dass durch die räumliche Nähe aller schnell drehenden Artikel entsprechend viele Touren konzentriert diesen Bereich durchlaufen müssen. Dies kann wiederum zu deutlich mehr Interaktionen führen, die die Leistungsfähigkeit beeinflussen können<sup>38</sup>. Diesen Erkenntnissen stehen wiederum Empfehlungen der Grundlagenliteratur gegenüber, die die ABC-Belegung als Strategie zur Leistungssteigerung vorschlagen (vgl. [Gud-2012a, S. 754; Hom-2011, S. 92 ff.]). Um diese gegensätzlichen Aussagen beurteilen zu können, soll Abbildung 6-9 herangezogen werden. Diese zeigt die Leistungsentwicklung der ABC-Strategie für Mensch und Roboter differenziert nach der Anzahl an Agenten.

Dabei wird deutlich, dass in beiden Fällen bei einer Agentenanzahl von kleiner als zehn mit der ABC-Belegung höhere Leistung erzielt werden kann als mit einer freien Belegung.

---

<sup>38</sup>Diese Erkenntnis trifft auf das zu Grunde liegende Untersuchungsmodell und den implementierten Strategien zu. Es ist durchaus denkbar, dass durch dedizierte Routing- oder Batchingverfahren auch mit Leistungssteigerung bei einer ABC-Belegung zu rechnen ist. Dies bedarf jedoch gesonderter Untersuchungen, die nicht im Fokus dieser Arbeit stehen.

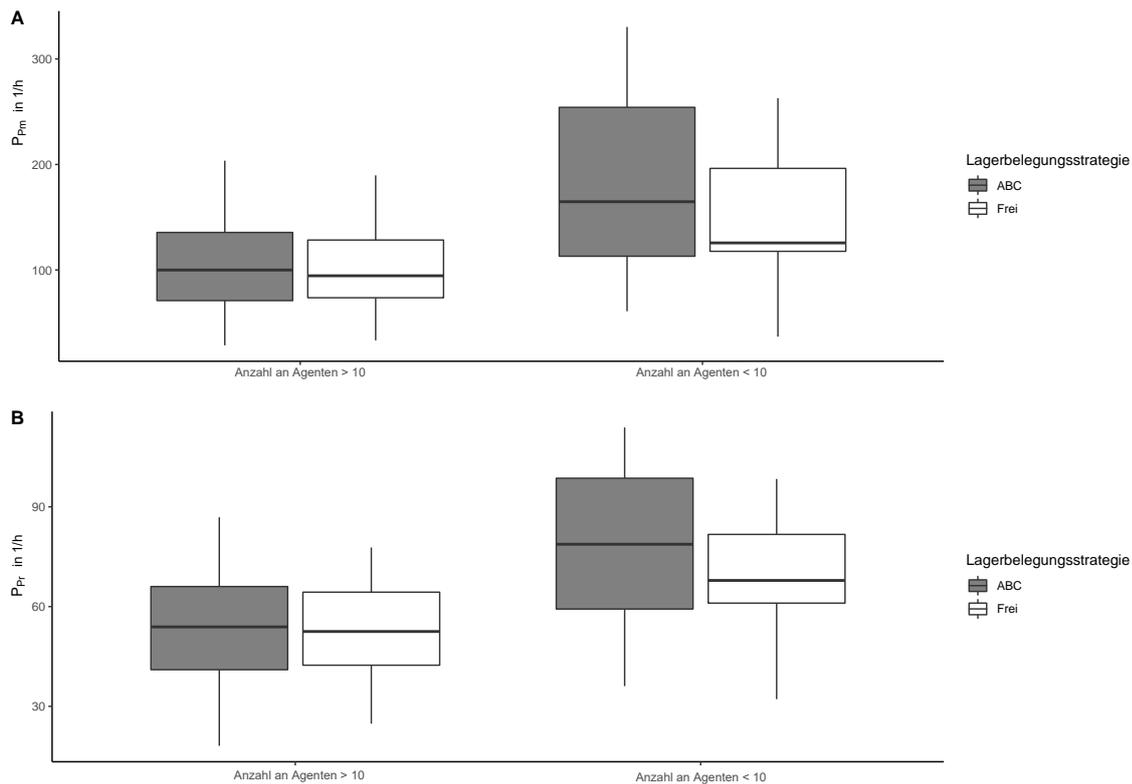


Abbildung 6-9: Anwendung einer ABC-Belegung. A: Auswirkungen für den Menschen. B: Auswirkungen für den Roboter

Dies untermauert abermals die Beobachtung, dass die bestehenden Untersuchungen, die eine umschlagsorientierte Untersuchung befürworten, auftretende Interaktionen nicht berücksichtigten oder ausschließen. Andererseits scheinen aber bei einer größeren Anzahl an Agenten keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Strategien zu bestehen. Anhand der Abbildung 6-9 kann nicht zweifelsfrei festgestellt werden, ob die ABC-Belegung ausschließlich für den Leistungszuwachs respektive die Leistungsminderung verantwortlich ist. Dazu bedarf es nach wie vor einer Regressionsanalyse, welche die übrigen Inputfaktoren berücksichtigt. Allerdings lässt sich die Tendenz erkennen, dass bei einer geringeren Anzahl an Agenten eine ABC-Belegung dazu beitragen kann, die Leistung zu steigern. Im Rahmen des hier betrachteten Layouts 1a konnte anhand der Regressionsanalyse festgestellt werden, dass bei einer ABC-Belegung im Vergleich zu einer freien Lagerbelegung mit Leistungseinbußen zu rechnen ist.

### 6.6.6 Übrige Inputfaktoren

Im Zuge der Regressionsanalyse wurden zwei Inputfaktoren noch nicht näher betrachtet: die Sicherheitszonen des Roboters und die auslastungsorientierte Auftragsfreigabe. Dies liegt daran, dass für beide Agenten keine Signifikanz nachgewiesen werden konnte. Als Referenz bei der Auftragsfreigabe dient die Variante ohne Berücksichtigung jeglicher Aus-

lastungen im System. Bei den Sicherheitszonen des Roboters dient die Variante mit lediglich einer Zone in Fahrtrichtung als Referenz, sodass hier Leistungseinbußen zu erwarten sind.

Entgegen den Erwartungen wirken sich beide Inputfaktoren bei Berücksichtigung der Regressionskoeffizienten nur marginal auf die Pickleistung beider Agenten aus. Das gleiche Ergebnis zeigen die Beta-Koeffizienten, bei denen die Inputfaktoren den geringsten Wert aufweisen. Bemerkenswert ist vor allem die fehlende Auswirkung der eingesetzten Sicherheitstechnik auf die Leistung des Roboters. Hier hätte man damit rechnen können, dass die Nutzung von lediglich einer Sicherheitszone in Fahrtrichtung einen deutlich stärkeren Einfluss haben würde. Im Umkehrschluss lässt sich dieser Umstand damit begründen, dass die aufwändigen Interaktionen, nämlich die, die ein mögliches Ausweichen verursachen, nur bei Hindernissen in Fahrtrichtung auftreten. Hindernisse, die in die seitliche oder hintere Sicherheitszonen eintreten, verursachen zwar einen kurzen Stopp, der Roboter kann jedoch im Normalfall seine Fahrt im Anschluss fortsetzen.

Der mangelnde Einfluss einer auslastungsorientierten Freigabe lässt sich nicht nachvollziehbar herleiten. Letztlich bleibt die Erkenntnis, dass offensichtlich andere Inputfaktoren im Layout 1 einen größeren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit haben als die Freigabe von Aufträgen im betrachteten Referenzlayout.

### 6.6.7 Gestaltungsrichtlinien für das Referenzlayout

Aus den Ergebnissen der vorangegangenen Unterabschnitten lassen sich für das Layout 1a (vgl. Abb. 6-10) folgende Gestaltungsrichtlinien ableiten.

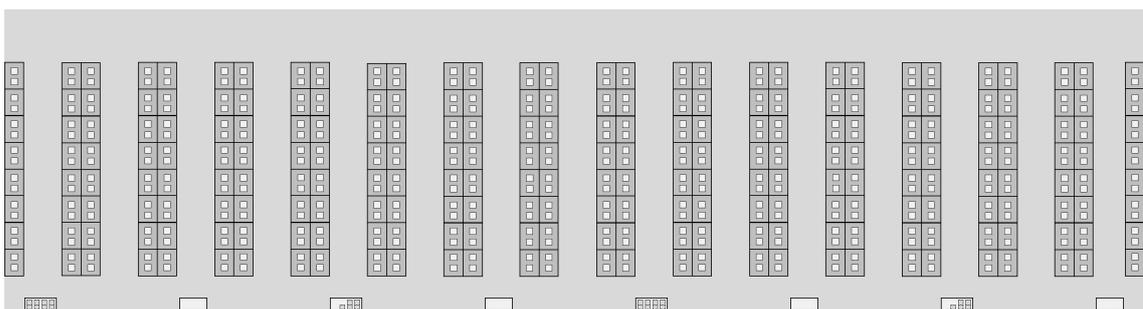


Abbildung 6-10: Referenzlayout L1a

- Die Anzahl an Artikeln je Position sollte für beide Agenten möglichst hoch sein.
- Die Anzahl an Agenten sollte so gering wie möglich sein, um die geforderte Leistung zu erreichen.
- Nach Möglichkeit sollte ein Überhang an Robotern im System bestehen.
- Die Kommissionieraufträge sollten positionsweise übergeben werden mit einem möglichst großen Auftragspool.

- Als Lagerbelegung sollte entweder eine freie oder eine zonierte Lagerbelegung gewählt werden, wobei der positive Einfluss der Zonierung nicht signifikant ist.
- Die Sicherheitszonen des Roboters sowie die auslastungsorientierte Freigabe haben keinen Einfluss auf das Layout 1a.

## 6.7 Generalisierung der Ergebnisse

Die vorangegangenen Untersuchungen beruhten auf den Ergebnissen der Simulationsstudie für das spezifische Layout L1a. Die folgenden beiden Unterabschnitte sollen nun aufzeigen, ob es innerhalb der Basiskonfigurationen (vgl. Tab. 6-3) Unterschiede im Hinblick auf die Auswirkungen einzelner Inputfaktoren gibt. Des Weiteren soll überprüft werden, ob zwischen den Basiskonfigurationen signifikante Abweichungen bei den Inputfaktoren zu erkennen sind. Es soll geklärt werden, ob sich die Quergasse oder die veränderte Position des Depots auf die Relevanz der Inputfaktoren auswirken.

### 6.7.1 Wesentliche Abweichungen innerhalb der Basiskonfiguration L1

Die innerhalb der Basiskonfiguration L1 untersuchten Layoutvarianten unterscheiden sich in ihrer Gassenlänge und der Anzahl an Gassen. Das Layout 1a, welches die Grundlage der vorangegangenen Untersuchungen bildete, hat kürzere Lagergassen von 12 m, jedoch insgesamt 15 Gassen. Deutlich länger gestaltet sind die Layoutvarianten L1b, L1d und L1e, deren Gassenlänge zwischen 39 m und 56 m liegt und die über bis zu 19 Gassen verfügen. Das System L1c stellt das kleinste System dar, dessen drei Gassen eine Länge von 25 Metern haben.

Vergleicht man nun die Ergebnisse der einzelnen Regressionsanalysen, kann grundsätzlich sowohl für den Menschen als auch für den Roboter festgestellt werden, dass die Faktoren Anzahl an Artikeln je Position sowie Positionen je Batch in allen fünf Layoutvarianten den größten Einfluss haben. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Faktoren ohne Einfluss. Für die Sicherheitszonen des Roboters sowie die auslastungsorientierte Freigabe an Aufträgen konnte bereits im Layout 1a (vgl. Unterabschnitt 6.6.6) kein wesentlicher Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Systems nachgewiesen werden, was für die übrigen Layoutvarianten ebenfalls gilt.

Legt man zunächst den Fokus auf die Leistung des Menschen, kann festgestellt werden, dass sie nur im Layout 1c von anderen Faktoren beeinflusst wird. Für die Varianten L1a, L1b, L1d und L1e liegen die Inputfaktoren im gleichen Bereich, sodass der folgende Vergleich zwischen L1c und den übrigen Layoutvarianten vorgenommen wird. Das Layout L1c repräsentiert das kompakteste Layout mit nur drei Gassen und einer Gassenlänge von 25 Metern. Zwei Inputfaktoren zeigen hier im Vergleich zu den anderen einen signifikanten

Einfluss: die Lagerbelegungsstrategien ABC und die Zonierung. Im Falle des Layouts L1c steigt bei der Umstellung auf eine Zonierung die Leistung des Menschen um ca. 25 Picks pro Stunde. Im Gegenzug sinkt die Leistung des Menschen um ca. 15 Picks pro Stunde, wenn eine ABC-Belegung eingeführt wird. Ein vergleichbarer Einfluss lässt sich bei den anderen Konfigurationen erkennen, ohne dass eine Signifikanz festgestellt werden kann. Jedoch liegen alle Regressionskoeffizienten im einstelligen Bereich. Daher soll die Frage diskutiert werden, wieso die beiden Lagerbelegungsstrategien im Layout L1c so einen großen Einfluss haben. Der hohe Einfluss lässt sich mit der Anzahl an Agenten erklären. Zieht man hier die Beta-Koeffizienten heran, also den standardisierten Einfluss der einzelnen Inputfaktoren, liegt dieser beim Layout L1c bei 0,429. Für den Faktor Auftragspositionen je Batch liegt er bei 0,490. In den übrigen Layoutvarianten ist zwar der Beta-Wert der Auftragspositionen je Batch ähnlich, jedoch liegt die Anzahl an Agenten um den Wert von 0,10. Der Regressionskoeffizient für die Anzahl an Agenten ist im Layout L1c bis zum Dreifachen höher als bei den übrigen Layoutvarianten. Dieser Einfluss ist nachvollziehbar, da es in kleineren Systemen bei der Zunahme an Agenten zu mehr Interaktionen und Blockierungen kommen kann. Die ABC-Belegung verstärkt diesen Effekt, wohingegen die Zonierung ihn verringert. Letztlich treten die beschriebenen Effekte in einem System mit sehr wenigen Lagergassen stärker auf und resultieren in höheren Regressionskoeffizienten als bei Systemen mit deutlich mehr Gassen. Für den Menschen kann demnach festgehalten werden, dass bei einem kompakten System die Zonierung vorgezogen und die Anzahl an Agenten so gering wie möglich gehalten werden sollte.

Für den Roboter lässt sich beim Vergleich der einzelnen Layoutvarianten eine ähnliche Tendenz wie beim Menschen erkennen. Auch hier sind die Auswirkungen für L1c andere als für die übrigen Konfigurationen. Allerdings lassen sich Unterschiede zum Menschen feststellen. So profitiert im Layout L1c auch der Roboter deutlich von einer Zonierung, allerdings kann bei der ABC-Belegung, die zwar ähnlich wie beim Menschen einen negativen Einfluss hat, keine Signifikanz ( $p$ -Wert = 0,980) festgestellt werden. Bemerkenswerter ist jedoch, dass der Regressionskoeffizient in allen Layoutvarianten gleich hoch ist. Daraus lässt sich schließen, dass für den Roboter die Layoutkonfiguration im Hinblick auf die Wirksamkeit einer ABC-Belegung keine signifikante Rolle spielt, sondern stets mit einem ähnlichem Rückgang der Leistung zu rechnen ist. Darüber hinaus scheint der Inputfaktor Anteil Roboter ebenfalls nicht signifikant zu sein. Lediglich in der Variante L1d kann eine Signifikanz gezeigt werden. Allerdings liegt in allen Varianten der Regressionskoeffizient bei ca. 0,10.

Ein weiterer relevanter Aspekt sind die Sicherheitszonen des Roboters. In keinem Szenario konnte eine Signifikanz für die beiden Inputfaktoren gezeigt werden. Jedoch ist interessant, dass gerade im kompaktesten Layout die  $p$ -Werte am niedrigsten sind und damit am nächsten zur Grenze von 0,05 liegen. Diese Entwicklung deckt sich mit der Theorie, dass durch das kompakte Layout mehr Interaktionen entstehen und damit die Sicherheitszonen am ehesten einen Einfluss auf die eigene Leistungsfähigkeit nehmen können. Letztlich lassen

sich für den Roboter ähnliche Erkenntnisse wie beim Menschen ableiten: In kompakten Systemen hilft eine Zonierung und es ist zu empfehlen, die Anzahl an Robotern möglichst gering zu halten. Die Tabelle 6-6 fasst die Ergebnisse der Regressionsmodelle für die Basiskonfiguration 1 zusammen.

Tabelle 6-6: Qualitative Zusammenfassung der Regressionsmodelle für die Basiskonfiguration 1. Grau eingefärbte Bereiche symbolisieren die fehlende Signifikanz des Inputfaktors ( $p \geq 0, 05$ )

	L1a		L1b		L1c		L1d		L1e	
	$\Delta P_{p,m}$	$\hat{b}_j$								
Anzahl an Agenten	+	○	+	○	+	○	+	○	+	○
Anteil Roboter	+	○	+	○	+	○	+	○	+	○
Auftragspositionen je Batch	+	○	+	○	+	○	+	○	+	○
Anzahl an Artikeln je Position	+	○	+	○	+	○	+	○	+	○
Lagerbelegung: Zonierung	+	○	+	○	+	○	+	○	+	○
Lagerbelegung: ABC	+	○	+	○	+	○	+	○	+	○
Auftragspool: Leer	+	○	+	○	+	○	+	○	+	○
Übergabe des Batches: Single	+	○	+	○	+	○	+	○	+	○
Auslastungsorientierte Freigabe: aktiv	+	○	+	○	+	○	+	○	+	○
Sicherheitszonen (hinten): aktiv	+	○	+	○	+	○	+	○	+	○
Sicherheitszonen (seitlich): aktiv	+	○	+	○	+	○	+	○	+	○

+	positive Veränderung der Pickleistung
-	negative Veränderung der Pickleistung
○	keine Veränderung der Pickleistung
●	sehr hoher Einfluss auf die Pickleistung
◐	hoher Einfluss auf die Pickleistung
◑	mittlerer Einfluss auf die Pickleistung
◒	geringer Einfluss auf die Pickleistung
◓	sehr geringer Einfluss auf die Pickleistung

### 6.7.2 Wesentliche Abweichungen innerhalb der Basiskonfiguration L2

Die Konfiguration L2 unterscheidet sich von der Konfiguration L1 im Wesentlichen dadurch, dass die Kommissioniergassen über eine Quergasse verfügen und die Depots daher über die linke Seite des Layouts verteilt sind. Wie in der Konfiguration L1 unterscheiden sich die Varianten in L2 hinsichtlich ihrer Gassenlänge sowie der Anzahl an Lagergassen. So sind die Varianten L2a, L2c und L2e größere Systeme mit entweder einer längeren Gassenlänge oder einer größeren Anzahl an Lagergassen. L2b und L2d sind hingegen kompaktere Systeme (vgl. Tab. 6-3).

Die Regressionsmodelle bei der Konfiguration L2 zeigen ebenfalls, dass für Mensch und Roboter die Variablen Anzahl an Artikeln je Position sowie Positionen je Batch in allen fünf Layoutvarianten den größten Einfluss haben. Gleiches gilt für die Sicherheitszonen des Roboters, deren signifikanter Einfluss auch in der zweiten Layoutgruppe nicht nachgewiesen werden konnte.

Rückt man zunächst den Menschen und dessen Leistungsfähigkeit in den Fokus, lassen sich die wesentlichen Unterschiede anhand der Größe des Layouts erkennen. Wie schon zuvor nehmen in den kompakteren Varianten der Einfluss der Zonierung und der ABC-Belegung deutlich zu, wobei die Zonierung abermals eine Leistungssteigerung hervorruft und die ABC-Belegung die Performance reduziert. Hinzu kommt die auslastungsorientierte Freigabe von Aufträgen, die für die Layoutvarianten L2b und L2d beim Menschen eine Steigerung der Leistung von ca. 15 Picks pro Stunde ermöglicht. Lediglich in der Variante L2a können ähnliche Einflüsse beobachtet werden, wobei hier die Leistung nur um 10 Picks pro Stunde erhöht werden konnte. Somit lässt sich erkennen, dass eine auslastungsorientierte Freigabe von Aufträgen vor allem in kompakteren Systemen effektiv ist.

Eine mögliche Begründung dafür könnte sein, dass in größeren Systemen die Wahl einer Kommissioniergasse mit geringer Auslastung zu einer längeren Wegstrecke führt, wodurch sich die Zeitersparnisse aufgrund der reduzierten Interaktionen aufheben. In kleineren Systemen ist die Wegstrecke jedoch weniger entscheidend, wodurch die Reduzierung der Interaktionen positive Effekte haben kann. Im Gegenzug kann bei den großen Layoutvarianten festgestellt werden, dass die positionsweise Übergabe des Batches einen erheblichen Zuwachs der Leistung erreichen kann. Im Durchschnitt ist eine Steigerung von ca. 15 Picks pro Stunde möglich. Dieser Effekt lässt sich damit begründen, dass eine mögliche Reduzierung der Wegstrecke, insbesondere bei größeren Systemen, einen signifikanten Einfluss haben kann. In kompakteren Systemen fällt der Effekt entsprechend kleiner aus.

Für den Roboter lassen sich für die kompakteren Systeme nicht unmittelbar Maßnahmen erkennen, mit der die Leistung gesteigert werden kann. Im Vergleich zum Menschen erhöht eine Zonierung in den Varianten L2b und L2d die Picks des Roboters lediglich um ca. zwei pro Stunde, wobei auch hier keine Signifikanz erkennbar ist. Im Gegensatz zum

Menschen profitiert der Roboter zudem in allen Layoutvarianten von einer auslastungsorientierten Freigabe von Aufträgen. Zwar ist die Steigerung in den kleineren Systemen größer (ca. 10 Picks pro Stunde), aber ein signifikanter Einfluss ist in allen Konfigurationen zu erkennen. Dies lässt sich damit begründen, dass eine mögliche Interaktion für den Roboter immer noch zeitintensiver sein kann, als wenn er einen längeren Weg zurücklegen muss, um dort allein in einer Gasse zu kommissionieren. Die bemerkenswerteste Erkenntnis zeigt sich jedoch im Einfluss der Zonierung innerhalb der größten Layoutvarianten (L2c u. L2e). Bei deren Anwendung reduziert sich tatsächlich die Leistung des Roboters um ca. 5 Picks pro Stunde. Dazu soll noch einmal verdeutlicht werden, dass bei einer Zonierung in der Basiskonfiguration die Gassen oberhalb der Quergasse dem Roboter zugewiesen werden. Unterhalb kommissioniert entsprechend der Mensch (vgl. Abb. 6-11). Damit sinken die zur Verfügung stehenden Kommissioniergassen und die Wahrscheinlichkeit von längeren Kommissioniertouren steigt, da der Roboter weitere Strecken zurücklegen muss. Gleiche Effekte lassen sich auch für den Menschen feststellen, jedoch kann hier im Gegensatz zum Roboter keine Signifikanz festgestellt werden.

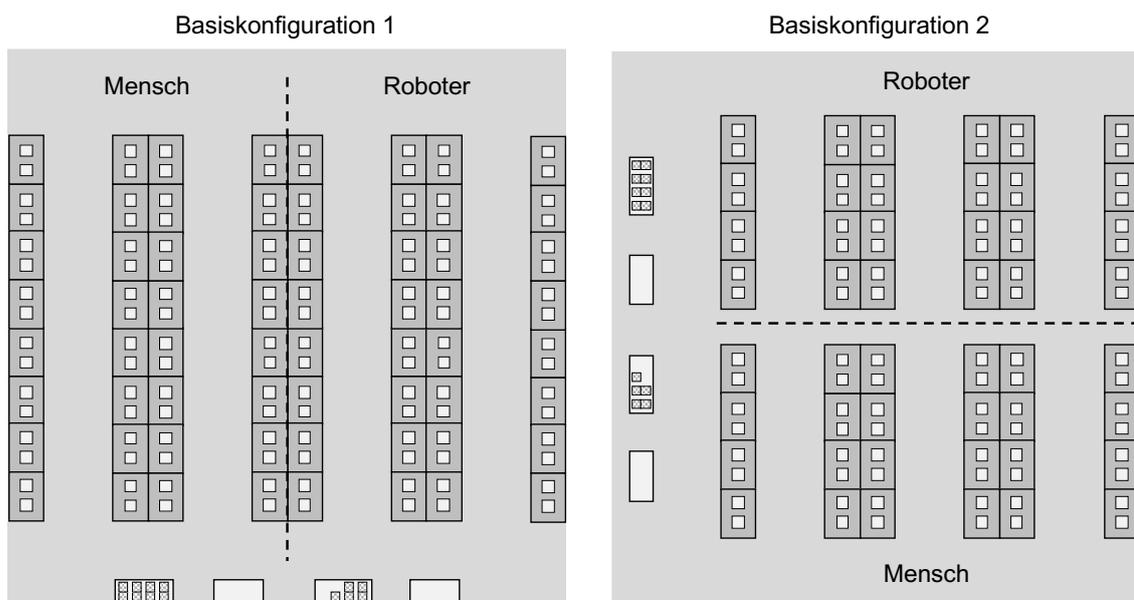


Abbildung 6-11: Zonierung in den Basiskonfigurationen

Die Tabelle 6-7 fasst die Ergebnisse der Regressionsmodelle für die Basiskonfiguration 2 zusammen. Im Zuge der Beschreibungen der Basiskonfigurationen L1 und L2 wurden bereits erste Unterschiede deutlich. Der folgende Unterabschnitt geht daher detailliert auf Abweichungen zwischen den beiden Basiskonfigurationen ein.

Tabelle 6-7: Qualitative Zusammenfassung der Regressionsmodelle für die Basiskonfiguration 2. Grau eingetärbte Bereiche symbolisieren die fehlende Signifikanz des Inputfaktors ( $p \geq 0,05$ )

	L2a		L2b		L2c		L2d		L2e	
	$\Delta P_{p,m}$	$\hat{b}_j$	$\Delta P_{p,r}$	$\hat{b}_j$	$\Delta P_{p,m}$	$\hat{b}_j$	$\Delta P_{p,r}$	$\hat{b}_j$	$\Delta P_{p,m}$	$\hat{b}_j$
Anzahl an Agenten	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○
Anteil Roboter	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○
Auftragspositionen je Batch	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○
Anzahl an Artikeln je Position	↕	●	↕	●	↕	●	↕	●	↕	●
Lagerbelegung: Zonierung	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○
Lagerbelegung: ABC	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○
Auftragspool: Leer	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○
Übergabe des Batches: Single	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○
Auslastungsorientierte Freigabe: aktiv	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○
Sicherheitszonen (hinten): aktiv	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○
Sicherheitszonen (seitlich): aktiv	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○	↕	○

↕	positive Veränderung der Pickleistung	●	sehr hoher Einfluss auf die Pickleistung
↕	negative Veränderung der Pickleistung	●	hoher Einfluss auf die Pickleistung
↕	keine Veränderung der Pickleistung	●	mittlerer Einfluss auf die Pickleistung
		○	geringer Einfluss auf die Pickleistung
		○	sehr geringer Einfluss auf die Pickleistung

### 6.7.3 Wesentliche Abweichungen zwischen den Basiskonfigurationen

In den beiden vorangegangenen Unterabschnitten wurden die Einflüsse einzelner Inputfaktoren innerhalb der beiden Basiskonfigurationen beschrieben. In diesem Unterabschnitt werden die gesammelten Erkenntnisse miteinander verglichen, um Unterschiede in der Wirksamkeit einzelner Inputfaktoren im Hinblick auf die unterschiedlichen Layouttypen aufzuzeigen. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass sich beide Konfigurationen in ihren wesentlichen Aspekten sehr ähneln. So sind die Anzahl an Artikeln je Position sowie die Positionen je Batch in allen zehn Layoutvarianten die Inputfaktoren mit dem größten Einfluss. Gleichermäßen konnte gezeigt werden, dass die unterschiedlichen Ausprägungen der Sicherheitszonen des Roboters keinen signifikanten Einfluss haben, weder auf die Leistung des Menschen noch auf die des Roboters. Darüber hinaus wurde deutlich, dass die ABC-Belegung in keiner der zehn Varianten die Leistung steigern konnte. Entweder hat sie die Performance deutlich reduziert, insbesondere dann, wenn es sich um kompakte Layoutvarianten handelte, oder sie hatte keinen erkennbaren Einfluss. Dies war bei den größeren Systemen zu erkennen und gilt sowohl für den Menschen als auch für den Roboter. Die Zonierung konnte in beiden Konfigurationen bei kompakten Systemen für Mensch und Roboter eine Leistungssteigerung hervorrufen. Es kann jedoch festgestellt werden, dass bei der Konfiguration L2 und dort insbesondere bei den großen Systemen L2c und L2e, eine Zonierung die Leistung des Roboters minimiert. Dieses Verhalten ist jedoch nicht bei den Varianten von L1 zu erkennen. Eine mögliche Begründung dafür liegt in der Anordnung der Kommissioniergassen und der Depots. In Variante L1 erfolgt die Zuteilung der Kommissioniergassen durch einen vertikalen Schnitt. Alle links davon liegenden Gassen werden von Menschen bedient, alle rechts liegenden Gassen von Robotern. Bei den Layoutkonfigurationen L2 erfolgt dies durch einen horizontalen Schnitt entlang der Quergasse. Alle oben liegenden Gassen werden vom Roboter bedient, alle unteren vom Menschen. Durch diese Zuteilung verlängert sich für beide Agenten der maximale Weg bis zum Eintritt in eine Kommissioniergasse deutlich (vgl. Abb. 6-11). Dieser längere Weg reduziert demnach die Leistungsfähigkeit des Roboters. Ähnliche Auswirkungen lassen sich auch beim Menschen beobachten, allerdings konnte dort auf Basis der durchgeführten Versuche keine Signifikanz für die Zonierung festgestellt werden.

Ein weiterer Inputfaktor, bei dem Unterschiede in den Basiskonfigurationen festgestellt werden können, ist die Übergabe des Batches. Grundsätzlich konnte für beide Fälle gezeigt werden, dass in den jeweils größeren Systemen der Leistungszuwachs deutlich stärker ausfällt. Dies lässt sich damit begründen, dass dort Einsparungen im Hinblick auf den zurückzulegenden Weg einen größeren Einfluss haben, als wenn es sich um ein kompaktes Layout handelt. Hervorzuheben ist jedoch, dass der Leistungszuwachs bei den großen Systemen von Typ L1 größer ausfällt als bei denen von Typ L2. Hier könnte ein Zusammenhang mit den Quergassen in L2 bestehen. Da hier die Agenten frühzeitig die Gasse wechseln können, ist der Effekt einer positionsweisen Weitergabe des Batches nicht so stark, da

durch den Quergang auf kürzerem Weg eine andere Gasse mit weiteren Aufträgen betreten werden kann. In L1e mit einer Gassenlänge von fast 60 Metern kann ein Leistungszuwachs deutlich stärker ausfallen, wenn im Rahmen der Kommissioniertour ein weiterer Auftrag in den Auftragspool aufgenommen wird, der einen Gassenwechsel erübrigt.

Noch deutlicher wird es bei der auslastungsorientierten Freigabe von Aufträgen. Bei den Varianten von L1 konnte kein signifikanter Einfluss ermittelt werden. Der Inputfaktor hatte in den Layoutkonfigurationen stets einen der kleinsten Beta-Werte. Deutlich anders ist es bei den Varianten von L2. Hier profitieren sowohl der Mensch als auch der Roboter – der Roboter bei allen Systemgrößen und der Mensch vornehmlich bei kompakteren Systemen. Die Leistungssteigerung kann mit der Verkehrsgestaltung der Layoutvarianten begründet werden. Bei der Konfiguration von L2 gibt es vom Depot aus drei mögliche Wege, in das System einzutreten: über den Kopfgang am oberen Rand, über die Quergasse in der Mitte oder über den Kopfgang am unteren Rand. Dadurch entsteht eine Entzerrung des Begegnungsverkehrs. Die gesammelten Erkenntnisse aus den insgesamt zehn Regressionsanalysen sollen nun genutzt werden, um geeignete, allgemeingültige Betriebsstrategien zu formulieren<sup>39</sup>.

#### **6.7.4 Ableitung von geeigneten Betriebsstrategien**

Die verschiedenen Planungsprobleme und Freiheitsgrade haben je nach Gestaltung des Kommissioniersystems einen unterschiedlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit beider Agenten. Der generische Versuchsaufbau ermöglicht es nun, dass diese Erkenntnisse in Betriebsstrategien münden. Diese sollen dazu dienen, dass Planer und Betreiber von hybriden Kommissioniersystemen eine erste Orientierung zur Verfügung haben, wie eine mögliche Gestaltung aussehen könnte. Wichtig ist jedoch, dass die nachfolgenden Betriebsstrategien eine spezifische Einzelfallplanung des jeweiligen Systems nicht ersetzen können. Eine Bewertung, inwieweit die entwickelten Betriebsstrategien auf Systeme in der Praxis zutreffen und als Ausgangssituation der Planung genutzt werden können, soll in Kapitel 7 erfolgen.

#### **Betriebsstrategie 1: Multi-Order-Picking**

Die erste Betriebsstrategie zielt auf den hohen Einfluss der Picks pro Position ab. Dieser Effekt ist sowohl beim Mensch als auch beim Roboter zu erkennen, denn die Leistung beider Agenten profitiert davon, wenn bei einem Stopp möglichst viele Artikel entnommen werden. Für externe Kunden kann versucht werden, durch Rabatte die Anzahl an gleichen

---

<sup>39</sup>Die Ergebnisse der übrigen neun Regressionsanalysen können dem Anhang B entnommen werden.

Artikeln zu beeinflussen. Bei internen Kunden (Produktion) kann durch die Berücksichtigung eines Gesamtoptimums aus Produktion und Kommissionierung die Anzahl an gleichen Artikeln gesteigert werden. Eine andere Möglichkeit dieser Strategie liegt darin, dass im Rahmen einer Kommissioniertour mehrere Kundenaufträge mit identischen Artikeln oder Artikeln mit identischen Lagerplätzen bedient werden können. Aus technischer Sicht sind dafür getrennte Ablagefächer auf dem Kommissionierwagen des Kommissionierers sowie beim Roboter notwendig. Dazu bedarf es eines Batching-Verfahrens, bei dem der Fokus klar auf Heuristiken wie dem Nearest-Neighbour-Verfahren liegt. Zusätzlich ist ein großer Auftragspool an Kommissionieraufträgen hilfreich, auf den beim Batching-Verfahren zugegriffen werden kann. Letztlich ist diese Betriebsstrategie für beide Agenten und unabhängig von der Layoutgröße und dem Layouttyp zu empfehlen.

### **Betriebsstrategie 2: Maximierung der Kommissioniertouren**

Die Betriebsstrategie 2 kann sowohl für beide Agentenarten als auch beide Layoutkategorien und alle Größen empfohlen werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Zunahme der Batchgröße und damit der Länge der Kommissioniertour mit einer Leistungssteigerung zu rechnen ist. Die Zeit, die die Agenten in den Kommissioniergassen verbringen, um die geforderten Waren zu entnehmen, kann als wertschöpfend angesehen werden. Die Zeit außerhalb der Gassen, beispielsweise der Weg zum Depot mit vermeidbaren Wartezeiten, ist zwar für den Gesamtprozess notwendig, allerdings trägt diese Zeit nicht zur Wertschöpfung bei. Verlängert sich jedoch die Kommissioniertour durch mehr Aufträge, haben eben diese unproduktiven Zeitanteile einen geringeren Anteil an der Gesamtzeit. Kommt es zudem vor, dass sich mehrere Agenten einen Depotplatz teilen müssen, führen längere Kommissioniertouren zu einer Entzerrung der Ankunftszeiten und somit zu einer Reduzierung von Wartezeiten<sup>40</sup>. Letztlich ist die Länge der Kommissioniertour abhängig von der verfügbaren Kapazität der Agenten. Dabei ist es weniger komplex, durch einen Umbau die Kapazität des Kommissionierwagens zu vergrößern, denn die Kapazität des Roboters ist häufig vorgegeben, sodass hier geeignete Logiken, bspw. in der Strategie, welche Artikel gepickt werden, zu berücksichtigen sind<sup>41</sup>.

---

<sup>40</sup> Alternativ könnte die Synchronisation und die Einlastung der Aufträge einen ähnlichen Effekt erzielen. In der Praxis erfolgt dies häufig durch unterschiedliche Startzeiten einzelner Kommissionierer zu Beginn einer Schicht. Eine durchgehende Synchronisation und dessen Effekt auf die Leistungsfähigkeit könnte in zukünftigen Untersuchungen berücksichtigt werden.

<sup>41</sup> Der Roboter TORU der Firma Magazino kann beispielsweise zwischen 8 und 16 Schuhkartons kommissionieren, abhängig von deren Größe und Gewicht. Nach dieser Betriebsstrategie 2 wäre es daher sinnvoller, dass der TORU möglichst leichte und kleine Güter transportiert, um die eigene Kapazität maximal auszulasten.

### **Betriebsstrategie 3: Layoutspezifische Lagerbelegung**

Im Zuge der Untersuchung zeigte sich, dass die jeweiligen Lagerbelegungsstrategien einen unterschiedlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit beider Agenten nehmen. Liegt ein kompaktes Layout vor, ist eine Zonierung empfehlenswert. Die Kompaktheit definiert sich sowohl über die Gassenlänge als auch über die Anzahl an Gassen, wobei eine geringere Anzahl stärkeren Einfluss hat. Von einer Zonierung profitiert vor allem der Mensch. Die Leistung des Roboters nimmt ebenfalls zu, jedoch konnte im Rahmen der Untersuchungen letztendlich keine statistische Signifikanz festgestellt werden<sup>42</sup>. Letztlich erreicht die Zonierung eine Harmonisierung der Interaktionen und Verteilung der Agenten, die auf engem Raum im Vergleich mit einer freien Lagerbelegung zu einer Leistungssteigerung führt. Handelt es sich jedoch um große Layoutvarianten nach der Basiskonfiguration 2, also mit einem Quergang und den Depots auf der linken Seite, ist eine Zonierung zu vermeiden. Hier wurden insbesondere beim Roboter deutliche Leistungseinbußen festgestellt, die u. a. auf die längeren Wegstrecken zurückzuführen sind.

Die ABC-Belegung als dritte Lagerbelegungsstrategie neben der Zonierung und der freien Belegung konnte gemäß den Regressionsmodellen in keinem Fall eine Leistungssteigerung hervorrufen. Zu beachten ist jedoch auch, dass im Rahmen der Untersuchungen stets mindestens vier Agenten eingesetzt wurden. Die ABC-Belegung kann bei sehr wenigen Agenten durchaus eine Leistungssteigerung hervorrufen (vgl. Abb. 6-9). In Verbindung mit sehr großen Systemen, wie in der Basiskonfiguration 2, in denen mehrere Kommissioniergassen mit A-Artikel gelagert werden, sollte eine ABC-Belegung ebenfalls als Freiheitsgrad der Planung berücksichtigt werden.

### **Betriebsstrategie 4: Positionsweise Berücksichtigung der Auftragslage**

Üblicherweise werden zu Beginn einer Kommissioniertour die relevanten Aufträge festgelegt. Diese werden entsprechend dem Auftragspool entnommen, sodass es zu keiner doppelten Entnahme durch zwei Kommissionierer kommen kann. Dies hat den wesentlichen Nachteil, dass die Tour einmalig bestimmt wird und Aufträge, die im weiteren Verlauf der Tour in das System integriert werden und eine verbesserte Kommissioniertour hervorbringen könnten, nicht berücksichtigt werden. Anders ist es bei einem dynamischen Batching, bei dem die Aufträge positionsweise dem Agenten übergeben werden. Hier haben die Untersuchungen zeigen können, dass bei großen Systemen deutliche Leistungssteigerungen bei beiden Agenten realisierbar sind. Diese Betriebsstrategie stellt sicherlich die höchsten

---

<sup>42</sup>In diesem Kontext kann die statistische Signifikanz durchaus kritisch betrachtet werden. Grundsätzlich zeigten die Untersuchungen in diesem Zusammenhang ähnlich wie beim Menschen eine Leistungssteigerung, jedoch verdeutlicht die fehlende Signifikanz nur, dass nicht mit ausreichender Sicherheit bestätigt werden kann, dass der Leistungsgewinn durch eine Zonierung entstanden ist. Für einen Betreiber oder Planer eines solchen Systems spielt die Signifikanz eine untergeordnete Rolle. Solange ein Leistungszuwachs festgestellt werden kann, wird eine Umsetzung der Strategie vermutlich in Betracht gezogen.

technischen Anforderungen, insbesondere in Bezug auf die System- und Kommunikationsstruktur. Es ist nicht zwingend gegeben, dass das WMS in der Lage ist, einzelne Positionen zu steuern, und dass die notwendigen Daten des Agenten, wie der aktuelle Standort und die Auslastung der Kapazität, unterbrechungsfrei übermittelt werden können. Je nach Aufwand zur Realisierung empfiehlt es sich daher, eine solche Umstellung lediglich bei Systemen durchzuführen, die über keine Quergassen verfügen. Die Untersuchungen konnten zeigen, dass dort der Leistungszuwachs teilweise doppelt so hoch ist wie bei den Systemen mit Quergasse.

### **Betriebsstrategie 5: Auslastungsorientierte Überwachung der Kommissioniergassen**

Dass die auftretenden Interaktionen einen maßgeblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit beider Agenten haben, wurde bereits an diversen Stellen dieser Arbeit angesprochen. Aus diesem Grund bietet es sich an, dass die aktuellen Auslastungen der Kommissioniergassen im Zuge des Batchings berücksichtigt werden, sodass als Initialgasse stets die gewählt wird, in der zum aktuellen Zeitpunkt die wenigsten Positionen kommissioniert werden müssen. Die Untersuchungen haben zeigen können, dass die entwickelte Heuristik bei beiden Agenten einen Leistungszuwachs hervorbringen konnte. Allerdings wurde deutlich, dass ein Zuwachs nur bei den Layoutvarianten der Basiskonfiguration 2 festgestellt werden kann. Dabei spielt es eine Rolle, dass in der Basiskonfiguration 2 das Betreten und Verlassen an beiden Enden einer Kommissioniergasse möglich ist, wodurch sich der Begegnungsverkehr der Agenten zwischen den Kommissioniergassen entzerrt. Die Kommissioniergassen in der Konfiguration 1 sind jedoch nur durch die unteren Vorzonen mit den Depots verbunden, sodass dort der Begegnungsverkehr zunimmt und zu mehr Interaktionen führen kann. Handelt es sich im Planungsfall um ein Layout, welches dem Typ der Basiskonfiguration 2 ähnelt, empfiehlt es sich, die auslastungsorientierte Überwachung der Kommissioniergassen als Freiheitsgrad zu berücksichtigen.

### **Betriebsstrategie 6: Leistungsgerechte Auswahl der Agenten und Layoutgestaltung**

Die Anzahl der Agenten im System hängt vornehmlich von den gegebenen Leistungsanforderungen ab. Je höher diese sind, desto mehr Agenten müssen im System eingesetzt werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit Zunahme an Agenten die Leistungsfähigkeit des einzelnen Agenten sinkt. Dies betrifft sowohl den Menschen als auch den Roboter. Deutlich stärker sind die Einbußen dabei in kleineren Systemen.

Die Leistungsfähigkeit eines einzelnen Agenten variiert in Abhängigkeit von der Ausgestaltung der jeweiligen Planungsprobleme. Wählt man für die jeweiligen Layoutvarianten und

die dazu entwickelten Regressionsmodelle die Freiheitsgrade entsprechend der Leistungsfähigkeit, wird deutlich, dass in den Layoutvarianten der Basiskonfiguration 1 ein ungefähres Leistungsverhältnis von 1 zu 2 herrscht. Das bedeutet, dass ein Mensch ungefähr doppelt so viele Picks pro Stunde schafft wie ein Roboter. Für die Varianten der Basiskonfiguration L2 kann bei idealer Wahl der Freiheitsgrade ein Leistungsverhältnis von 1 zu 3 bis 4 beobachtet werden. Es ist festzustellen, dass in den Varianten der Basiskonfiguration L2 die Leistungsfähigkeit des Menschen steigt und die des Roboters sinkt. Daraus resultiert die deutlich höhere Diskrepanz beider Agenten im Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit.

Zielführend ist es jedoch nicht, grundsätzlich Layoutvarianten nach der Basiskonfiguration 1 zu empfehlen. Vielmehr sollte die angestrebte Zusammensetzung zwischen Mensch und Roboter berücksichtigt werden. Möchte der Planer oder Betreiber einen Überhang an Menschen einsetzen und lediglich einen geringeren Teil an Robotern, beispielsweise zum Abfangen von Bedarfsspitzen, kann die Basiskonfiguration 2 mit berücksichtigt werden. Unterliegt der Betreiber aber einem hohen Personalmangel oder ist grundsätzlich ein hoher Automatisierungsgrad gewünscht, empfiehlt es sich, die Layoutvarianten der Basiskonfiguration 1 in Betracht zu ziehen. Insbesondere mit einer hohen Anzahl an Gassen und längeren Kommissioniergassen lassen sich hohe Leistungswerte erzielen.

## 7 Fallstudienbasierte Evaluation der entwickelten Betriebsstrategien

---

Im Folgenden sollen die konzipierten Betriebsstrategien anhand einer Fallstudie evaluiert werden. Dazu werden in Abschnitt 7.1 zunächst der Hintergrund und das Ziel der Evaluation bestimmt. Im Anschluss erfolgt die Durchführung der Evaluation anhand von zwei sich bereits in der Industrie im Einsatz befindlichen Systemen (vgl. Abschn. 7.2). Die Evaluation schließt mit einem Fazit, welches genutzt wird, um die definierten Forschungsfragen noch einmal aufzugreifen und abschließend zu beantworten.

### 7.1 Ziel der Evaluation

Das Verfahren der Evaluation stammt ursprünglich aus der Sozialforschung und wurde entwickelt, um die Beurteilung eines wissenschaftlichen Erfolges oder Misserfolges insbesondere im Gesundheits- und Bildungswesen formal und nachvollziehbar bewerten zu können (vgl. [Dor-2016, S. 976]). Die Evaluation grenzt sich von der Verifikation und Validierung ab, indem sie zum Ziel hat, einen *Evaluationsgegenstand* unter Berücksichtigung der relevanten *Anspruchsgruppen* und *Evaluationskriterien* zu bewerten (vgl. [Dor-2016, S. 979]). Evaluation wird heute nicht mehr ausschließlich in der Sozialforschung eingesetzt, sondern findet in vielen anderen Forschungsfeldern Anwendung. So haben *Blessing und Chakrabarti* die Evaluation in die von ihnen entwickelte *Design Research Methodology* als *Deskriptive Studie II* zur empirischen Bewertung von Planungswerkzeugen integriert (vgl. [Ble-2009, S. 181 ff.]). Sie sehen die Evaluation für Planungswerkzeuge insbesondere deswegen als wichtig an, da deren Auswirkungen und Einflüsse in der Praxis nur grob abgeschätzt werden können. So können diese Werkzeuge zu neuen Sachverhalten führen, über die es zum Zeitpunkt der Evaluation noch keine vergleichbaren Erkenntnisse gibt (vgl. [Ble-2009, S. 182]).

Damit sieht sich auch diese Arbeit konfrontiert. Es konnte festgestellt werden, dass mobile Roboter zwar schon in der Praxis eingesetzt werden, allerdings gibt es weder in der Praxis noch in der Wissenschaft veröffentlichte Erkenntnisse und Ansätze zur Planung und Steuerung solcher Systeme. Das in dieser Arbeit entwickelte Planungswerkzeug trägt dazu bei, dass erste Betriebsstrategien für eben diese Planung und Steuerung von hybriden Kommissioniersystemen formuliert werden konnten. Daher soll hier eine *initiale Evaluation* nach *Blessing und Chakrabarti* durchgeführt werden (vgl. [Ble-2009, S. 195]). Die Basis dieser Evaluation bildet eine *Fallstudie*, die nach *Yin* einen *realen Fall* darstellt, der untersucht werden soll, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf den *eigenen Fall* übertragbar sind (vgl. [Yin-2014, S. 16]). Diese Erkenntnisse basieren auf der Beantwortung folgender

Fragen von *Blessing und Chakrabarti*, die sich auf den hier untersuchten Anwendungsfall übertragen lassen (vgl. [Ble-2009, S. 181]):

- Sind die Betriebsstrategien in realen Planungsfällen anwendbar?
- Können die Betriebsstrategien als Planungsunterstützung dienen?
- Erreichen die Betriebsstrategien eine Leistungssteigerung?
- Ist der Einfluss der Betriebsstrategien für Mensch und Roboter identisch?
- Lassen sich Optimierungen an den Betriebsstrategien feststellen?

*Yin* schlägt zur Durchführung einer Fallstudie die Schritte *Design*, *Datensammlung* und *Analyse* mit abschließender Formulierung eines *Fazits* vor (vgl. [Yin-2014, S. 26 ff.]). Diese Planungsschritte bilden die Struktur der nachfolgenden Abschnitte.

## 7.2 Durchführung der Evaluation

### 7.2.1 Design und Datensammlung

Die hier durchgeführte Fallstudie untersucht zwei Systeme eines Anbieters von mobilen Kommissionierrobotern. In beiden Fällen handelt es sich um bereits implementierte Systeme. Die bereitgestellten Daten der beiden Planungsfälle werden beschrieben und notwendige Annahmen ergänzt. Die Datensätze entsprechen den Mittelwerten aus zwanzig Wochen Betriebszeit des realen Systems. Im weiteren Verlauf werden die beiden Planungsfälle als *Fall 1* und *Fall 2* bezeichnet. *Fall 1* stellt von den Abmaßen und dem Einsatz an Agenten her ein kleineres System dar (vgl. Abb. 7-1).

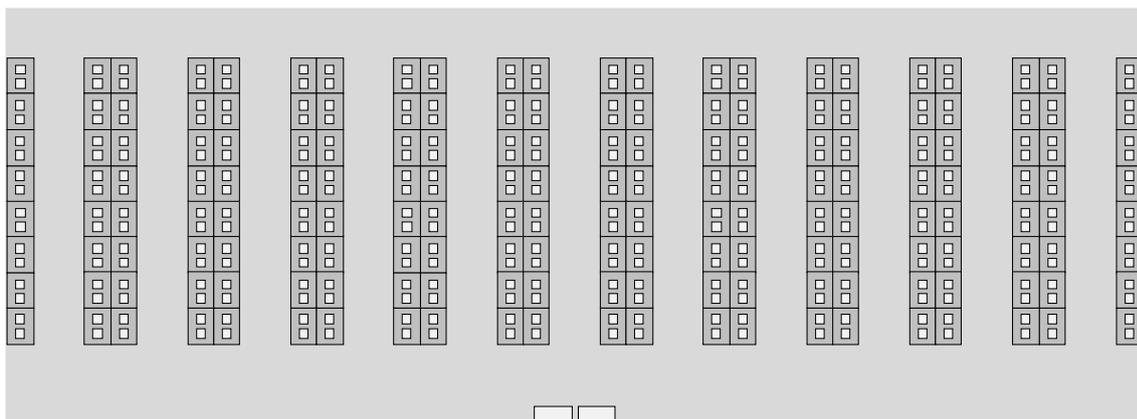


Abbildung 7-1: Layoutgestaltung Fall 1

Das Layout besteht aus insgesamt elf Kommissioniergassen, die auf beiden Seiten mit Regalen bestückt sind. Jede Kommissioniergasse ist zwölf Meter lang und zwei Meter breit. Das Layout verfügt über einen Kopfgang und zwei Depots, welche im unteren Teil von einer ca. drei Meter breiten Vorzone von dem Kommissionierbereich getrennt sind. Im aktuellen Betriebsmodell werden in dem System über zwei Schichten lediglich jeweils zwei Roboter

eingesetzt. Es soll dabei eine Betriebszeit von ca. sieben Stunden angenommen werden. Zusätzlich wird mit einer Pausenzeit von einer Stunde gerechnet, die für den Ladevorgang der Batterien benötigt wird. Die Roboter kommissionieren im Durchschnitt zehn Positionen je Batch, wobei jede Position aus nur einem Pick besteht. Über die betrachtete Laufzeit liegt die mittlere Stundenleistung des Roboters bei 44 Picks. Der Maximalwert liegt bei ca. 60 Picks pro Stunde. Im aktuellen Betriebsmodell werden zur Kommissionierung keine Menschen eingesetzt. Diese übernehmen lediglich den Nachschub und den Einlagerungsvorgang von Waren. Da der Nachschub jedoch im Rahmen des Untersuchungsmodells ausgeschlossen wurde, soll dieser ebenfalls nicht Gegenstand der Evaluation sein. Aufgrund von Auftragsschwankungen überlegt der Betreiber jedoch, in bestimmten Zeiten zusätzlich Menschen für die Entnahme von Waren einzusetzen. In Tabelle 7-1 werden alle relevanten Daten für *Fall 1* zusammengefasst.

Tabelle 7-1: Relevante Parameter für Fall 1

Roboter	$v_r$	=	1 m/s
	$a_r$	=	0,5 m/s <sup>2</sup>
	$C_{T,r}$	=	10
	$t_{W,r}$	=	30 s
	$t_{RS,r}$	=	120 s
	$t_{RE,r}$	=	120 s
	$S_{Z,r}$	=	Vorne, Seite
Layout	$n_B$	=	1
	$n_D$	=	2
	$n_G$	=	11
	$L_G$	=	12 m
	$L_V$	=	3 m
	$W_G$	=	2 m
Lagertechnik	$n_{Fb}$	=	8
	$h_{Fb,i}$	=	0,25 m; 0,5 m; 0,75 m; 1 m; 1,25 m; 1,5 m; 1,75 m; 2 m

*Fall 2* stellt ebenfalls ein im Einsatz befindliches System dar. Dieses ist im Vergleich zum ersten System deutlich größer und wird bereits im aktuellen Zustand als hybrides System betrieben (vgl. Abb. 7-2). Dabei werden in einem Zweischichtbetrieb pro Schicht jeweils acht Roboter und fünf Menschen eingesetzt. Das Layout verfügt über 35 Kommissioniergassen, die jeweils 40 m lang sind. Auf mittlerer Höhe der Gassen verläuft jedoch eine zwei Meter breite Quergasse. Am unteren Ende befinden sich die acht Depotplätze. Der Abstand zwischen Depot und Kommissioniergasse beträgt drei Meter. Die Kommissioniergassen sind zwei Meter breit.

Für den Roboter werden wie in Fall 1 Betriebszeiten von sieben Stunden angenommen. Im

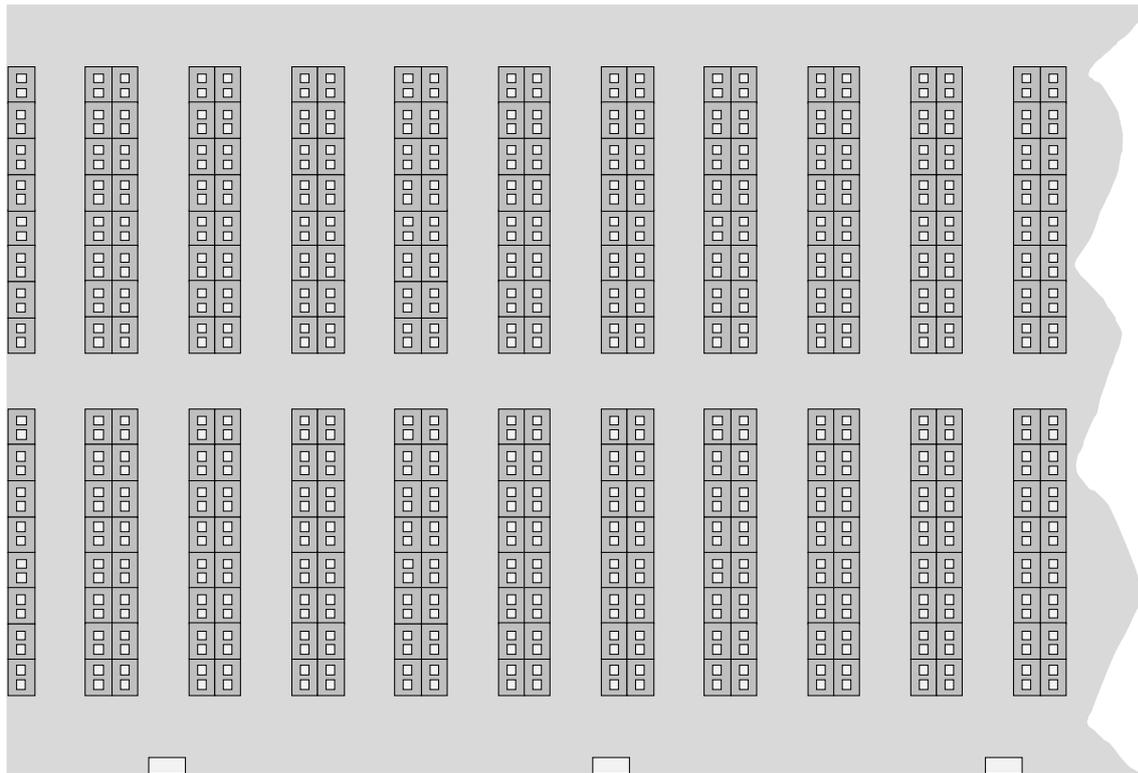


Abbildung 7-2: Ausschnitt des Layouts im Fall 2

Anschluss erfolgt eine einstündige Pause, die zur Aufladung der Batterien genutzt wird. Für den Menschen wird ein Arbeitszeitmodell von acht Stunden inkl. einer Stunde Pause angenommen. Im aktuellen System kommen die Roboter auf eine durchschnittliche Leistung von ca. 30 Picks pro Stunde, bei einer Kapazität von zehn Positionen je Batch mit jeweils einem Pick je Position. Die Leistung des Menschen liegt zwischen 80 und 100 Picks pro Stunde mit der Annahme, dass die Kapazität des Kommissionierwagens bei 20 Positionen je Batch und jeweils einem Pick liegt. Das aktuelle System unterliegt keinen geplanten strategischen Veränderungen. Seine Überprüfung im Untersuchungsmodell soll jedoch aufzeigen, ob durch die Anwendung der entwickelten Betriebsstrategien die Leistungsfähigkeit beider Agenten gesteigert werden kann. Die Tabelle 7-2 fasst die relevanten Untersuchungsparameter zusammen.

Tabelle 7-2: Relevante Parameter für Fall 2

Mensch	$v_r$	=	1,5 m/s
	$a_r$	=	1 m/s <sup>2</sup>
	$C_{T,m}$	=	20
	$t_{RS,r}$	=	60 s
	$t_{RE,r}$	=	60 s
Roboter	$v_r$	=	1 m/s
	$a_r$	=	0,5 m/s <sup>2</sup>
	$C_{T,r}$	=	10
	$t_{W,r}$	=	30 s
	$t_{RS,r}$	=	120 s
	$t_{RE,r}$	=	120 s
	$S_{Z,r}$	=	Vorne, Seite
Layout	$n_B$	=	2
	$n_D$	=	8
	$n_G$	=	35
	$L_G$	=	20 m
	$L_V$	=	3 m
	$W_G$	=	2 m
Lagertechnik	$n_{Fb}$	=	8
	$h_{Fb,i}$	=	0,25 m; 0,5 m; 0,75 m; 1 m; 1,25 m; 1,5 m; 1,75 m; 2 m

### 7.2.2 Analyse von Fall 1

Im *Fall 1* besteht die Aufgabenstellung darin, mit Hilfe des Untersuchungsmodells aufzuzeigen, inwieweit die Systemleistung durch das temporäre Ergänzen von Menschen gesteigert werden kann und welche Auswirkungen auf die Leistung der Roboter zu erwarten sind. Wie bereits beschrieben, sollen Menschen in hohen Nachfragephasen die Roboter unterstützen. Die Zielleistung liegt bei ca. 5.000 Auftragspositionen über zwei Schichten. Dem Anwendungsfall liegt zudem die Annahme zugrunde, dass das System zu jeder Zeit über genügend Aufträge verfügt und kein Agent auf einen Auftragseingang warten muss. Abbildung 7-3 zeigt die zu erwartende Leistungsentwicklung beider Agenten sowie die Gesamtleistung an Auftragspositionen bei unterschiedlich vielen Menschen im System. Die Anzahl an Robotern wird konstant bei zwei belassen.

Bei näherer Betrachtung der Verläufe wird deutlich, dass sowohl die Leistung des Menschen als auch die des Roboters mit jedem weiteren Agenten im System abnimmt – eine Erkenntnis, die bereits in der *Betriebsstrategie 6* festgehalten wurde (vgl. Unterabschnitt 6.7.4). Des Weiteren wird deutlich, dass das zu erwartende Maximum an Auftragspositio-

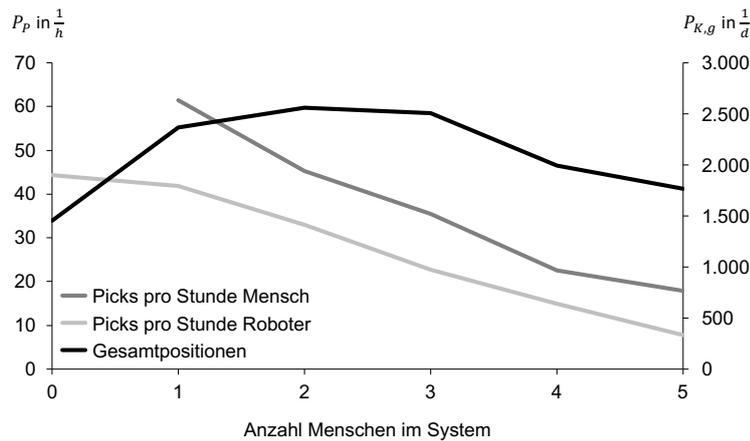


Abbildung 7-3: Leistungsentwicklung beider Agenten in der bestehenden Konfiguration

nen bereits bei insgesamt drei Menschen und zwei Robotern erreicht wird und unterhalb der geforderten 5.000 Positionen liegt. Damit wird erkennbar, dass mit dem bestehenden Layout und System die geforderte Leistung nicht erreicht werden kann. Bevor zunächst größere Veränderungen im Hinblick auf die Systemgestaltung betrachtet werden, wie beispielsweise eine Verlängerung der Kommissioniertour (*Betriebsstrategie 2*) oder eine layoutspezifische Lagerbelegung, wie sie *Betriebsstrategie 3* vorschlägt, soll zunächst der Fokus auf die vorhandenen Depots als Abgabestationen gelegt werden.

In der aktuellen Konfiguration verfügt das System über lediglich zwei Abgabestellen, jeweils eine für jeden Roboter. Indem nun bis zu sieben Agenten im System eingesetzt werden, kommt es zu häufigeren Wartezeiten vor den Depots, da sich im Schnitt 3,5 Agenten ein Depot teilen müssen. Daher soll im nächsten Schritt untersucht werden, welchen Einfluss zwei weitere Abgabestellen auf die Leistung haben. Im betrachteten Referenzsystem sind die Depotplätze mit einem beweglichen Regal ausgestattet, in das der Mensch und der Roboter die kommissionierten Waren abgeben. Die Regale werden anschließend durch weitere Mitarbeiter zu den Versandstationen gebracht. Da es sich hier um einen manuellen Prozess ohne Anbindung an Fördertechnik handelt, soll zudem analysiert werden, welchen Einfluss eine Verteilung der Depotplätze über die gesamte Systembreite haben wird (vgl. Abb. 7-4 und 7-5).

Es wird deutlich, dass in beiden Fällen innerhalb des Betrachtungsraums kein Maximum an Auftragspositionen zu beobachten ist. Zwar lässt sich bei fünf Menschen und zwei Robotern in Abbildung 7-4 ein Abflachen der Kurve erkennen, allerdings liegt die Leistung oberhalb der Leistung von vier Menschen. Noch deutlicher zeigt sich die Entwicklung in Abbildung 7-5, wo die Leistungskurve selbst bei fünf Menschen eine deutlich positive Steigung zeigt. Ein ähnliches Verhalten ist bei der Leistungsfähigkeit von Mensch und Roboter zu erkennen. Offensichtlich führt eine Verteilung der Depots über die gesamte Breite des Systems zu einer Stabilisierung der Leistungsfähigkeit beider Agenten. Dies hängt damit zusammen, dass die Interaktionen bei räumlich angrenzenden Depots mit steigender Anzahl an

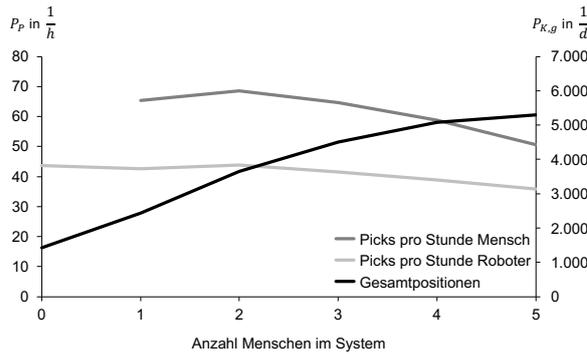


Abbildung 7-4: Leistungsentwicklung beider Agenten bei vier Depots im Layout, die nebeneinander positioniert sind

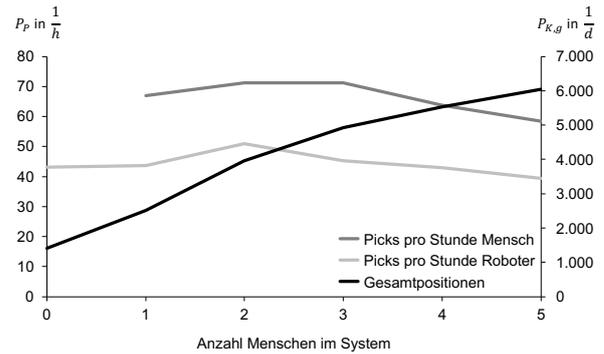


Abbildung 7-5: Leistungsentwicklung beider Agenten bei vier Depots im Layout, die über die gesamte Breite positioniert sind

Agenten überproportional zunehmen. Eine Verteilung der Abgabepplätze ermöglicht eine entsprechende Reduktion der Interaktionen. Dies lässt sich auch an der Gesamtleistung erkennen. Gemäß Abbildung 7-4 werden insgesamt fünf Mitarbeiter und zwei Roboter benötigt, um die geforderten 5.000 Positionen zu kommissionieren. Sind die Abgabepplätze entsprechend verteilt, wird bereits ein Mitarbeiter weniger benötigt.

Mit diesen Erkenntnissen wäre mit Hilfe des Untersuchungsmodells die initiale Planungsaufgabe gelöst. Je nach Gestaltung der Abgabepplätze – eine Entscheidung, die letztlich der Planer oder Betreiber treffen muss –, ließen sich die geforderten 5.000 Positionen mit vier oder fünf zusätzlichen Mitarbeitern je Schicht erreichen. Davon ausgehend stellt sich nun die Frage, ob das Untersuchungsmodell und die entwickelten Betriebsstrategien in der Lage sind, die Leistungsfähigkeit des Systems weiter zu steigern.

Zunächst soll der Einfluss von *Betriebsstrategie 2* evaluiert werden<sup>43</sup>. Diese Betriebsstrategie sieht vor, dass die Kommissioniertour eines einzelnen Agenten so lang wie möglich gestaltet sein soll. Die Untersuchungen aus Kapitel 6 haben gezeigt, dass die Leistung entsprechend erhöht werden kann, wenn die Anzahl der zu kommissionierenden Positionen innerhalb einer Tour zunimmt. Da der eingesetzte Roboter in seiner Bauform und Kapazität nicht erweitert werden kann, soll die notwendige Kapazitätserweiterung nur für den Menschen in Betracht gezogen werden. Die Abbildungen 7-6 und 7-7 zeigt die Leistungsentwicklung bei einer Kapazität des Menschen von 15 und 20 Positionen.

<sup>43</sup>Die *Betriebsstrategie 1* soll im Rahmen dieser Fallstudie nicht näher betrachtet werden. Das zugrunde liegende System verfügt nur über ein eingeschränktes Auftragsmanagementsystem, wodurch umfassende Multi-Order-Picking-Strategien nur eingeschränkt umgesetzt werden können. Diese Einschränkung betrifft darüber hinaus auch die *Betriebsstrategie 4*, sodass eine positionsweise Übergabe des Batches im realen System nicht umgesetzt werden könnte.

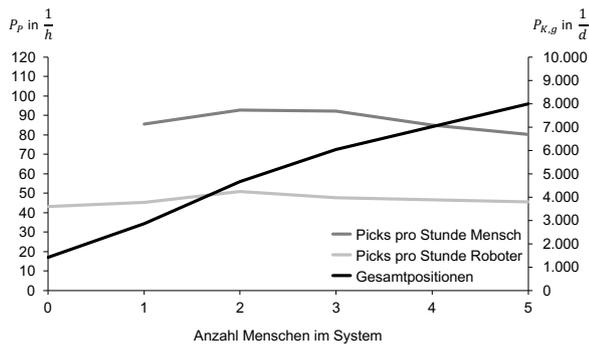


Abbildung 7-6: Leistungsentwicklung beider Agenten bei einer Kapazitätserweiterung für den Menschen von 15 Positionen

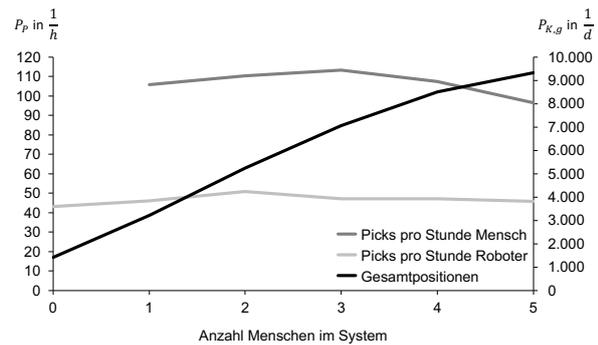


Abbildung 7-7: Leistungsentwicklung beider Agenten bei einer Kapazitätserweiterung für den Menschen von 20 Positionen

Zunächst zeigen die Abbildungen 7-6 und 7-7, dass die Leistung des Roboters durch die Kapazitätserweiterung des Menschen nicht beeinflusst wird. Im Gegenzug steigt die Leistung des Menschen von ca. 70 Picks pro Stunde bei 10 Positionen (vgl. Abb. 7-5) auf nahezu 120 Picks pro Stunde bei einer Verdopplung der Positionen je Tour. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen aus den theoretischen Modellen in Kapitel 6. Die Leistungssteigerung lässt sich damit begründen, dass der Mitarbeiter mehr Zeit für die Entnahme von Artikeln verwendet und damit weniger häufig zum Depot zurückkehren und dort ggf. wegen einem vor ihm befindlichen Agenten warten muss. Dieser Umstand wird auch in der Gesamtleistung deutlich. Bei einer Kapazität von 15 werden bereits mit drei Menschen die geforderten 5.000 Positionen erreicht. Kann die Kapazität sogar auf 20 erhöht werden, erreicht man die gleiche Leistung schon mit nur zwei Mitarbeitern. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei einer Erhöhung der Kapazität des Menschen auf 20 Positionen je Kommissioniertour zwei Mitarbeiter je Schicht eingespart werden können.

Im Zuge der Untersuchung stellt sich die Frage, ob die Anwendung der übrigen Betriebsstrategien weitere Leistungssteigerungen hervorrufen kann. Dazu soll nun die *Betriebsstrategie 3* näher beleuchtet werden. Diese empfiehlt in kompakteren Systemen den Einsatz einer Zonierung, sodass Mensch und Roboter getrennt voneinander arbeiten und im laufenden Betrieb nicht aufeinanderstoßen. Es konnte zwar gezeigt werden, dass die Anzahl der Kommissioniergassen entscheidender ist als die Länge, jedoch soll trotzdem die Zonierung für die Szenarien mit 15 und 20 Positionen je Kommissioniertour angewandt werden. Die Abbildungen 7-8 und 7-9 zeigen den zu erwartenden Leistungsverlauf.

Zunächst wird deutlich, dass sich die Leistungsfähigkeit des Roboters um ca. 10 Picks pro Stunde erhöht hat. Dies kann zum einen darauf zurückgeführt werden, dass durch den kleineren Bereich, der durch die Zonierung bedient werden muss, die Wegstrecken einer Kommissioniertour kürzer werden. Zum anderen reduziert sich die Häufigkeit an Interaktionen, da lediglich die zwei Roboter aufeinandertreffen. Gleiches trifft auf den Einsatz von Menschen zu, sodass insbesondere in den Konfigurationen mit nur einem oder zwei Men-

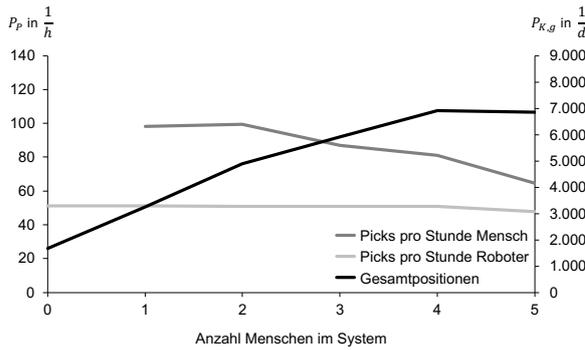


Abbildung 7-8: Leistungsentwicklung bei der Einführung einer Zonierung und 15 Positionen je Kommissioniertour

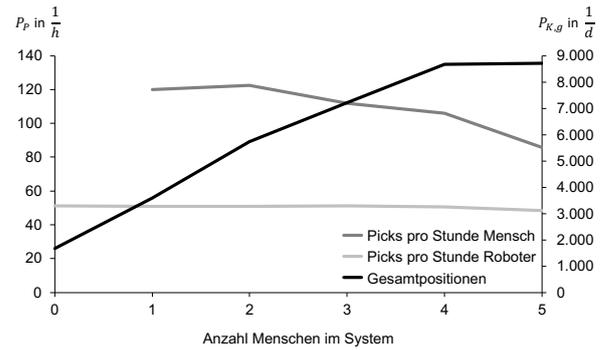


Abbildung 7-9: Leistungsentwicklung bei der Einführung einer Zonierung und 20 Positionen je Kommissioniertour

schen ebenfalls höhere Leistungen erzielt werden können. Allerdings ist zu beobachten, dass sowohl bei 15 als auch bei 20 Positionen bereits mit vier Menschen im System die Maximalleistung erreicht wird. Offensichtlich profitiert die Gesamtleistung ab fünf Menschen davon, dass das gesamte System genutzt werden kann. Da jedoch auch bereits mit zwei respektive drei Mitarbeitern die geforderte Leistung von 5.000 Positionen erreicht werden kann, soll der Frage nach einer geeigneten Gestaltung mit fünf oder mehr Mitarbeitern nicht näher nachgegangen werden. Letztlich wird deutlich, dass eine Zonierung bei der geringen Anzahl an Menschen und Robotern einen kleineren Leistungszuwachs erreichen kann. Im industriellen Betrieb bedeutet die Umsetzung einer Zonierung auch einen gewissen Aufwand und die Sicherstellung, dass für beide Zonen stets genügend Aufträge vorhanden sind. Ob sich dies im konkreten Fall realisieren lässt, muss der Planer oder Betreiber entscheiden. Das Untersuchungsmodell konnte jedoch aufzeigen, dass eine Zonierung einen zusätzlichen Leistungsgewinn hervorbringen kann, auch wenn dieser nur marginal ist<sup>44</sup>.

Als weitere Strategien bleiben nun *Betriebsstrategie 5* und *6* übrig. Die Effektivität der *Betriebsstrategie 5* mit der Empfehlung einer auslastungsorientierten Überwachung der Kommissioniergassen konnte lediglich für Systeme mit einer Quergasse und einer seitlichen Depotanordnung nachgewiesen werden. Die *Betriebsstrategie 6* erfordert bei kompakten Systemen ohne Quergassen ein Verhältnis von 2 zu 1 (zwei Roboter ersetzen einen Menschen). Je nach Anzahl an Agenten, lässt sich ein sehr ähnliches Verhältnis in dem Fall 1 zugrunde liegenden System erkennen.

Damit ist die Planung des ersten Falls abgeschlossen. Durch das Untersuchungsmodell konnte gezeigt werden, dass die geforderte Leistung durch das Ergänzen von Menschen ohne weitere Veränderungen im Aufbau und Ablauf des Systems nicht erreicht werden kann. Das Untersuchungsmodell konnte dabei verschiedene Systemalternativen unter Be-

<sup>44</sup> Diese spezifischen Ergebnisse decken sich zudem mit den Ergebnissen aus Kapitel 6. Dort wurde ebenfalls deutlich, dass vor allem die Anzahl an Lagergassen den wesentlichen Einfluss auf die Wirksamkeit der Zonierung nimmt und weniger die Länge der Kommissioniergassen, wie in *Fall 1*.

rücksichtigung der entwickelten Betriebsstrategien betrachten. Durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse wurde deutlich, dass die Anzahl an Depotplätzen erhöht werden muss und diese über die gesamte Systembreite hin verteilt werden sollten. Dadurch gibt es kürzere Wartezeiten vor blockierten Depots und die Entzerrung der Abgabepunkte reduziert die um das Depot herum auftretenden Interaktionen. Ein deutlicher Leistungszuwachs lässt sich durch die Erhöhung der Positionen je Tour erreichen. Erhöht man diese beim Menschen auf 15 oder 20 Positionen, lassen sich bereits mit zwei oder drei Menschen die geforderten 5.000 Positionen kommissionieren. Ein weiterer, wenn auch marginaler Leistungszuwachs lässt sich durch eine Zonierung des Systems erzielen. Darüber hinaus sei erwähnt, dass die angewandten Strategien die durchschnittliche Pickleistung des Roboters um bis zu 25 Prozent steigern können. Diese gesammelten Erkenntnisse liefern eine belastbare Grundlage, sodass der Betreiber eigenständig in einen Testbetrieb übergehen kann.

### 7.2.3 Analyse von Fall 2

Das System des *Falls 2* wird bereits in der Ist-Situation sowohl mit Menschen als auch mit Robotern betrieben. Die Betriebsstrategie des Betreibers sieht vor, dass stets acht Roboter eingesetzt werden und je nach Auftragslage zusätzlich Menschen. Im Durchschnitt liegt die Anzahl bei fünf Menschen. Dies wird als Untersuchungsgrundlage betrachtet. Das Ziel dieser Analyse ist es zu untersuchen, inwieweit die *Betriebsstrategien 1, 3, 4, 5* und *6* sowohl die Systemleistung als auch die spezifischen Leistungen von Mensch und Roboter beeinflussen<sup>45</sup>.

Die *Betriebsstrategie 1* sieht vor, dass möglichst ein Multi-Order-Picking betrieben wird, sodass der Agent bei einem Stopp möglichst viele Artikel für mehrere Positionen entnehmen kann. Es soll daher untersucht werden, welche Leistungssteigerung erzielt werden kann, wenn die Anzahl an entnommenen Artikeln pro Stopp von einem auf zwei erhöht wird (vgl. Abb. 7-10).

Ausgehend von einer durchschnittlichen Pickleistung von ca. 78 Picks pro Stunde beim Menschen und ca. 30 Picks pro Stunde beim Roboter, ließen sich die Leistungswerte auf ca. 96 Picks/h beim Menschen und 34 Picks/h beim Roboter erhöhen. Dies entspricht einer Leistungssteigerung von ca. 23 Prozent respektive 13 Prozent. Die Leistung an Gesamtpositionen pro Tag konnte um ca. 18 Prozent gesteigert werden. Der Mensch profitiert stärker von der Anpassung. Das liegt vor allem daran, dass er im Vergleich zum Roboter die Artikel deutlich schneller entnehmen kann. Darüber hinaus ist durch sein dynamischeres Agieren die kürzere Kommissioniertour deutlich vorteilhafter für ihn<sup>46</sup>. Unter Berücksichtigung der

---

<sup>45</sup> Die Betriebsstrategie 2 liefert wie schon in *Fall 1* den zu erwartenden Leistungszuwachs und wird daher in Anhang C dargestellt.

<sup>46</sup> Da die Gesamtkapazität beider Agenten identisch bleibt, halbieren sich folglich die notwendigen Stopps pro Tour, da an jedem Stopp zwei Artikel entnommen werden können.

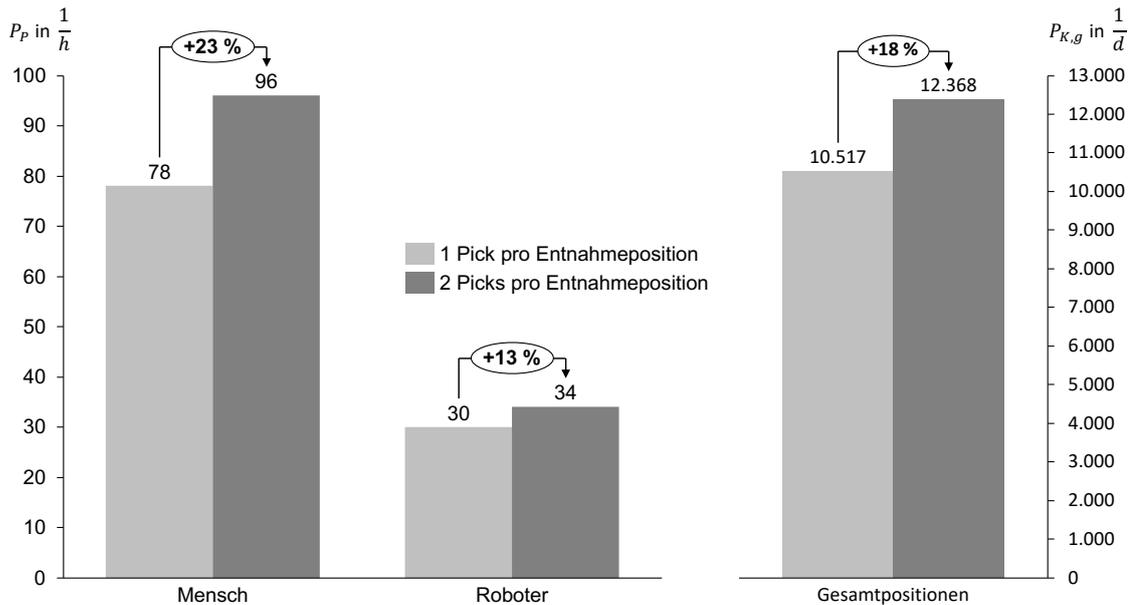


Abbildung 7-10: Leistungsentwicklung beider Agenten bei der Anwendung von Multi-Order-Picking (Betriebsstrategie 1)

erlangten Ergebnisse ist es daher möglich, dass mit einer Erhöhung der Picks pro Entnahmeposition bereits vier Mitarbeiter die gleiche Leistung pro Stunde erbringen können, wie es in der Ist-Situation bei fünf Mitarbeitern der Fall ist. Damit kann die Effektivität der *Betriebsstrategie 1* bestätigt werden.

In der *Betriebsstrategie 4* soll der Kommissionierauftrag zu Beginn einer Tour nicht vollständig an den Agenten übergeben werden, sondern stets nur die nächste Position. Damit wird die Annahme verfolgt, dass nach Beginn einer Kommissioniertour weitere Aufträge in den Auftragspool eingelassen werden, die wiederum eine Verbesserung des übrigen Tourverlaufs ermöglichen können. Abbildung 7-11 zeigt die zu erwartenden Leistungsentwicklungen. Die grau eingefärbten Werte entsprechen der Ausgangssituation aus Abbildung 7-10 und dienen als Vergleich.

Zunächst wird deutlich, dass bereits die alleinige Anwendung der *Betriebsstrategie 4* bei beiden Agenten zu Leistungssteigerungen führt. Die Picks pro Stunde können beim Menschen von ca. 78 auf 87 und beim Roboter von ca. 30 auf 33 erhöht werden. Die Gesamtpositionen steigen ebenfalls um ca. 10 Prozent. Kombiniert man zusätzlich *Betriebsstrategie 4* mit *Betriebsstrategie 1*, können alle drei Leistungskennzahlen nochmals um ca. 10 Prozent gesteigert werden. Dabei fällt auf, dass die Leistung des Menschen in der Kombination beider Strategien jedoch nahezu identisch ist wie der alleinigen Anwendung von *Betriebsstrategie 1*. Anders ist es beim Roboter. Dieser kann durch die Kombination der Strategien die eigene Leistung nochmals minimal steigern. Dies zeigt sich auch in der Entwicklung der Gesamtpositionen. Damit wird deutlich, dass das alleinige Anwenden der *Betriebsstrategie 4* bereits einen Leistungszuwachs von 10 Prozent hervorbringen kann. Allerdings liegt die

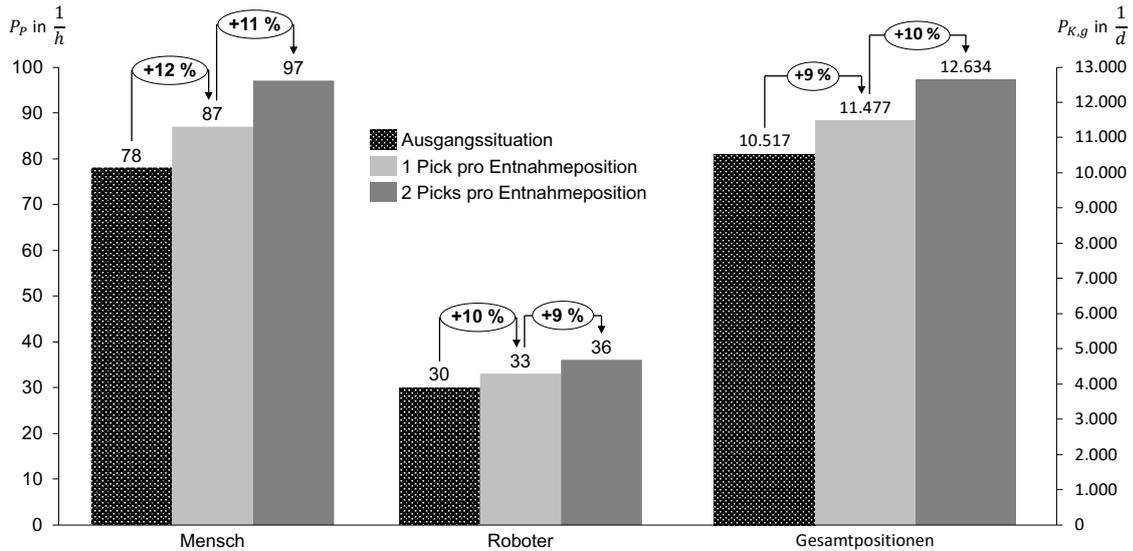


Abbildung 7-11: Leistungsentwicklung beider Agenten bei einer positionsweisen Übergabe der Aufträge (Betriebsstrategie 4)

zu erwartende Leistung des Menschen unterhalb der Leistung, die *Betriebsstrategie 1* hervorruft. Wird diese zusätzlich angewendet, lässt sich ein vergleichbares Niveau erreichen, respektive das des Roboters abermals steigern.

Im Zuge der *Betriebsstrategie 5* wird bei der Auftragszuteilung die Auslastung der Kommissioniergassen berücksichtigt. Wie bereits in der Abbildung 7-11, stellt auch die folgende Abbildung 7-12 neben der Leistungsentwicklung durch die *Betriebsstrategie 5* die Ausgangssituation als Referenz dar.

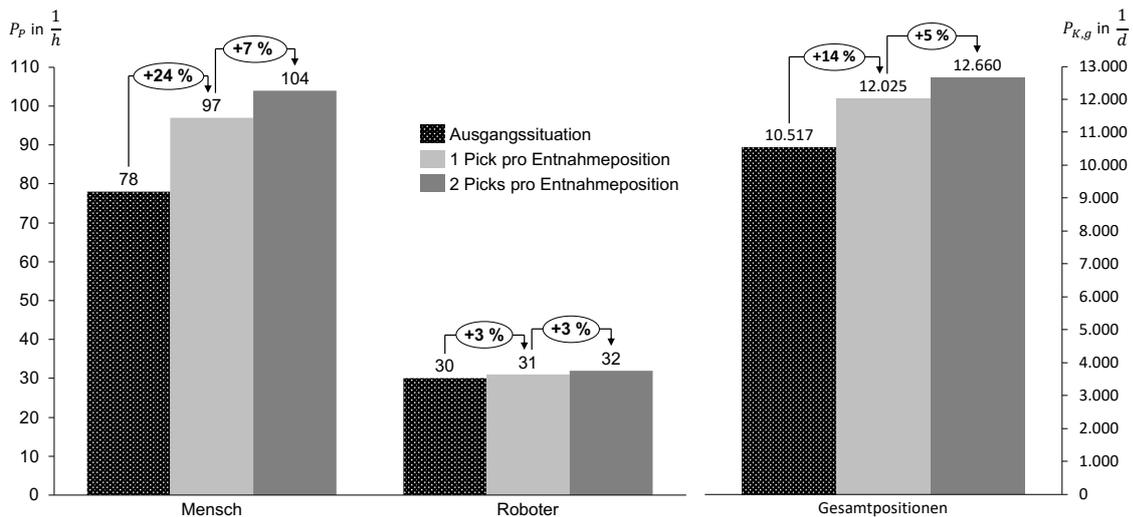


Abbildung 7-12: Leistungsentwicklung beider Agenten bei einer auslastungsorientierten Übergabe der Aufträge (Betriebsstrategie 5)

Abbildung 7-12 zeigt, dass die alleinige Anwendung der *Betriebsstrategie 5* vor allem die Leistung des Menschen positiv beeinflusst. In diesem Fall sind ähnliche Leistungszuwächse zu erwarten wie bereits bei der *Betriebsstrategie 1*. Die Leistung des Roboters bleibt jedoch nahezu unberührt. Dies kann damit zusammenhängen, dass der Roboter durch seine geringe Geschwindigkeit und Bewegungsdynamik deutlich stärker von den längeren Touren beeinflusst wird. Dadurch relativieren sich die Zeitersparnisse aufgrund der reduzierten Interaktionen. Kombiniert man die *Betriebsstrategien 4* und *5*, erreicht der Mensch die Maximalleistung von ca. 104 Picks pro Stunde.

Abschließend soll der Einfluss der *Betriebsstrategien 3* und *6* diskutiert werden. Die Abbildung 7-13 zeigt den Einfluss einer Zonierung im Ist-Zustand.

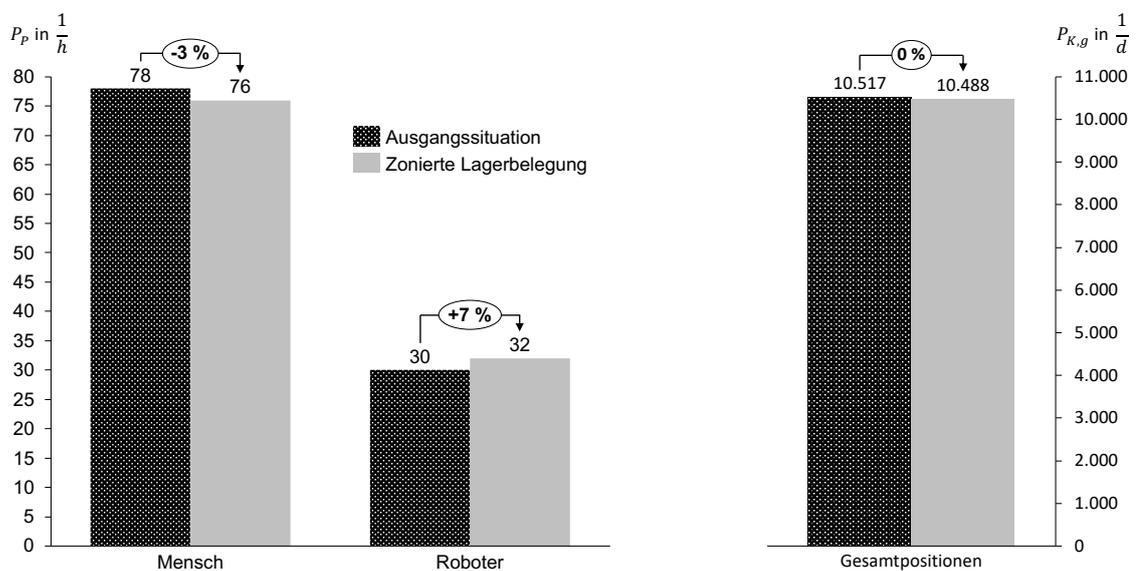


Abbildung 7-13: Leistungsentwicklung beider Agenten bei einer zonierten Lagerbelegung

Hierbei wird deutlich, dass der Mensch minimal an Leistung verliert und der Roboter im Gegenzug an Leistung gewinnt. Mit Blick auf die Gesamtpositionen kann daher kein Einfluss identifiziert werden. Im Zuge der Generalisierung der Ergebnisse in Kapitel 6 wurde festgehalten, dass für Systeme nach *Basiskonfiguration 2* keine Zonierung empfohlen wird, da die Leistung beider Agenten dadurch sinkt. Im vorliegenden *Fall 2* handelt es sich jedoch um eine Kombination aus *Basiskonfiguration 1* und *2*, da einerseits ein Quergang vorhanden ist, aber andererseits das Depot nach wie vor am unteren Ende positioniert ist. Daher wird vermutet, dass der negative Einfluss einer Zonierung weniger durch den Quergang, sondern durch die Positionierung des Depots begründet werden kann. Letztlich verringert sich die Leistung des Menschen. Dies kann durch den minimalen Leistungszuwachs des Roboters nicht kompensiert werden.

Hinsichtlich einer leistungsgerechten Auswahl der Agenten im Rahmen der *Betriebsstrategie 6* ist abermals die Wahl der Freiheitsgrade entscheidend. Wird beispielsweise eine Kombination aus *Betriebsstrategie 1* und *5* gewählt, die für den Menschen den größten

Leistungszuwachs bedeuten, liegt das notwendige Verhältnis bei mehr als 1 zu 3 (Mensch zu Roboter). Wählt man hingegen die *Betriebsstrategien 1* und *4*, braucht es weniger als drei Roboter, um einen Menschen zu ersetzen. Es kann festgehalten werden, dass im Zuge des *Falls 2* keine Kombination festgestellt werden konnte, die ein Verhältnis von 1 zu 4 erforderte, was in den theoretischen Untersuchungen das Maximum darstellte. Daher gibt es auch hier Grund zu der Annahme, dass das sehr hohe Verhältnis aus den theoretischen Untersuchungen in Kapitel 6 mit der Positionierung des Depots (linker Rand) zusammenhängt.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die *Betriebsstrategie 1* für beide Agenten die größte Leistungssteigerung hervorbringen kann. In der Kombination profitiert der Mensch vor allem von den Strategien 1 und 5, während der Roboter höhere Zuwächse bei den Strategien 1 und 4 verzeichnen kann. Mit Blick auf die Gesamtleistung an kommissionierten Positionen liegen bei den Kombinationen jedoch keine nennenswerten Unterschiede vor. Des Weiteren hat die Untersuchung von Fall 2 zeigen können, dass der relevante Freiheitsgrad von *Basiskonfiguration 2* die Position des Depots darstellt und weniger die Quergasse.

Es konnte gezeigt werden, dass durch die angewandten Betriebsstrategien Leistungssteigerungen realisierbar sind, die die Einsparung eines Mitarbeiters zur Folge haben. Dieses Ersparnis muss letztlich den notwendigen Investitionen zur Realisierung der Betriebsstrategien gegenübergestellt werden. Die Entscheidung, welche Strategie umgesetzt wird und ob damit die Rationalisierung wirtschaftlich realisiert werden kann, obliegt nach wie vor dem Planer oder dem Betreiber des Systems. Tabelle 7-3 fasst die Auswirkungen der *Betriebsstrategien 1* bis *5* auf die Gesamtpositionen zusammen.

Tabelle 7-3: Prozentuale Veränderung der Pick- und Gesamtleistung bei Anwendung der Betriebsstrategien 1 bis 5 und die Bestätigung von Betriebsstrategie 6

	Fall 1			Fall 2		
	$P_{P,m}$	$P_{P,r}$	$P_{K,g}$	$P_{P,m}$	$P_{P,r}$	$P_{K,g}$
Betriebsstrategie 1	/	/	/	+ 23 %	+ 13 %	+18 %
Betriebsstrategie 2	+ 19 %	+ 18 %	+ 14 %	+ 36 %	+ 3 %	+ 29 %
Betriebsstrategie 3	+ 7 %	+ 0 %	+ 5 %	- 3 %	+ 7 %	0 %
Betriebsstrategie 4	/	/	/	+ 12 %	+ 10 %	+ 9 %
Betriebsstrategie 5	/	/	/	+ 24 %	+ 3%	+ 14 %
Betriebsstrategie 6	Trifft zu			Trifft zu		

## 7.3 Fazit der Evaluation

Die Erkenntnisse der fallstudienbasierten Evaluation werden hier noch einmal zusammengefasst, bevor auf die eingangs formulierte untersuchungsleitende Fragestellung eingegangen wird. Es wurden zwei aktuell im Einsatz befindliche Kommissioniersysteme evaluiert, wobei ein Planungsvorgehen imitiert wurde, bei dem mögliche Änderungen wie das zeitweise Ergänzen von Menschen (Fall 1) oder eine generelle Untersuchung von Optimierungspotenzialen (Fall 2) geprüft wurden. Zusammenfassend konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die formulierten Betriebsstrategien entsprechen weitestgehend Ansätzen, die auch in der industriellen Praxis Anwendung finden können. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass je nach Anwendungsfall mit systemseitigen Restriktionen zu rechnen ist. Insbesondere für die Gestaltung und Verarbeitung von Kommissionieraufträgen müssen entsprechende Softwarefunktionen vorausgesetzt werden. Allerdings wurde bei der Entwicklung der Betriebsstrategien darauf geachtet, dass bei weiteren Anpassungen im System, wie der Erhöhung der Kapazität der Agenten, keine zusätzlichen Funktionen der Software notwendig sind. Grundsätzlich kann jedoch angenommen werden, dass der durchschnittliche Betreiber von hybriden Kommissioniersystemen über Software mit ausreichenden Funktionen verfügt, die die Anwendung aller Betriebsstrategien technisch möglich machen. Damit kann bestätigt werden:

**Die Betriebsstrategien sind in realen Planungsfällen anwendbar.**

- Die entwickelten Betriebsstrategien können einen generellen Planungsprozess nicht ersetzen. Die Motivation für die Erstellung der Betriebsstrategien liegt darin begründet, dass ein Planer einen Anhaltspunkt hat, um ein hybrides Kommissioniersystem zu dimensionieren. Die durchgeführte Evaluation konnte zeigen, dass dies möglich ist und dass sich die Strategien dazu eignen. So helfen sie einerseits, eine ungefähre Verteilung der Agenten abzuschätzen (Betriebsstrategie 6), als auch in einem bereits bestehendem System erste Optimierungsmaßnahmen vorzunehmen. Daher gilt:

**Die Betriebsstrategien können als Planungsunterstützung dienen.**

- Das primäre Ziel der Betriebsstrategien ist die Leistungssteigerung. Dabei sollen sowohl die individuellen Leistungen der Agenten als auch letztlich die Gesamtleistung erhöht werden. Im Zuge der Evaluation konnte bei keiner Strategie festgestellt werden, dass diese zwar die Gesamtleistung erhöht, aber die individuelle Leistung, bspw. die des Roboters, gleichzeitig sinkt. Dennoch kann dieser Fall auftreten. Dann ist aber der Planer oder Betreiber dafür verantwortlich, ob aus ganzheitlicher Sicht eine Leistungsminderung einzelner Agenten in Kauf genommen werden soll. Im Zuge der Evaluation konnte jedoch bei keiner Betriebsstrategie eine Minderung der Kommissionierleistung verzeichnet werden, sodass gesagt werden kann:

### **Die Betriebsstrategien ermöglichen eine Leistungssteigerung.**

- Es konnte gezeigt werden, dass alle Betriebsstrategien einen positiven Einfluss auf die Leistung haben. Allerdings konnte bereits bei der Entwicklung der Strategien festgestellt werden, dass deren Einfluss auf die individuelle Leistung der Agenten unterschiedlich ausgeprägt ist. Dies hat sich im Rahmen der Evaluation anhand von realen Planungsfällen bestätigt. Besonders deutlich wurde es in der Untersuchung des Falls 2 und der Anwendung der Betriebsstrategien 4 und 5. Hier profitierten Mensch und Roboter unterschiedlich stark. Daher ist festzuhalten:

**Die Betriebsstrategien wirken sich unterschiedlich auf die Leistungsfähigkeit beider Agenten aus.**

- Die entwickelten Betriebsstrategien sind das Ergebnis von wissenschaftlichen Untersuchungen. Das Ziel der Evaluation war es daher auch, eine Abschätzung über erste Anpassungen oder Optimierungen der Strategien zu erlangen. Dabei wurde deutlich, dass vor allem noch Potenziale bei der Untersuchung unterschiedlicher Layoutkonfigurationen vorliegen. Die Positionierung und die notwendige Anzahl an Depots, die in Fall 1 untersucht wurde, wird in keiner Strategie näher berücksichtigt. Außerdem fehlt eine finanzielle Bewertung der Betriebsstrategien, mit der die Kosten einer Systemanpassung dem zu erwartenden Leistungsgewinn gegenübergestellt werden könnten. Die Evaluation zeigt daher, dass **Optimierungen an den Betriebsstrategien festgestellt werden können.**

Die erfolgreich durchgeführte Evaluation gibt damit Aufschluss über die Anwendung des Untersuchungsmodells und der Betriebsstrategien in der Praxis. Mit Abschluss der Evaluation als letztem Bestandteil der entwickelten Vorgehensweise (vgl. Abb. 3-6) zur Beantwortung der Forschungsfragen können diese abermals, beginnend mit den untergeordneten Forschungsfragen, aufgegriffen werden:

*Inwieweit können die Ergebnisse auf einen praktischen Einsatz übertragen werden und welche generellen Rahmenbedingungen lassen sich für einen industriellen Betrieb von mobilen Kommissionierrobotern definieren?*

Die in Kapitel 7 durchgeführte Evaluation konnte zeigen, dass die Ergebnisse in Form von allgemeingültigen Betriebsstrategien sowie das in dieser Arbeit entwickelte Untersuchungsmodell auf einen industriellen Einsatz angewandt werden können. Die Evaluation konnte in Form von zwei Fallstudien zeigen, dass die Effektivität der Betriebsstrategien u. a. von der Größe und der Gestaltung des Layouts abhängig ist. Des Weiteren wurde deutlich, dass sowohl für den Betrieb von hybriden Kommissioniersystemen als auch für die Anwendung der Betriebsstrategien Aspekte wie die eingesetzte Software zur Steuerung des Auftragsmanagements berücksichtigt werden müssen.

*Wie wird die Leistungsfähigkeit von Mensch und Roboter durch die Planungsprobleme von Kommissioniersystemen beeinflusst?*

Die konzipierten Regressionsmodelle als Teil der durchgeführten statistischen Auswertung des Kapitels 6 ermöglichen eine transparente Betrachtung des Einflusses einzelner Freiheitsgrade auf die Leistungsfähigkeit beider Agenten. Dabei wird deutlich, dass die berücksichtigten Freiheitsgrade sowohl unterschiedlich stark auf die jeweiligen Agenten wirken, als auch je nach Layoutgestaltung einen unterschiedlichen Einfluss haben. Diese Erkenntnisse wurden bei der Entwicklung der Betriebsstrategien (vgl. Unterabschnitt 6.7.4) berücksichtigt und stellen ein Kerneergebnis dieser Arbeit dar.

*Wie kann das Verhalten von Mensch und Roboter möglichst realitätsnah modelliert werden und eine Systemdimensionierung hinreichend genau erfolgen?*

Die Konzeptionierung von Mensch und Roboter im Modell war wesentlicher Bestandteil des Kapitels 4. Dort konnte anhand von bestehenden Forschungsansätzen, u. a. zur Bewegung von Menschen im öffentlichen Raum ein hinreichend genaues Abbild der Charakteristika des Menschen sowie seines Verhaltens während der Kommissionierung abgeleitet und in das Untersuchungsmodell integriert werden. Für den Roboter wurde bewusst ein generischer Ansatz gewählt, der es ermöglichte, eine Vielzahl an unterschiedlichen Robotertypen zu berücksichtigen. Im Hinblick auf die Sicherheitsaspekte flossen die bestehenden Industrienormen und -richtlinien in die Modellierung mit ein. Das logische Modell wurde im Anschluss in ein ausführbares Modell überführt (vgl. Kap. 5). In diesem Zuge wurde die Ablaufsimulation als einzige geeignete Methode zur Dimensionierung von hybriden Kommissioniersystemen bestimmt. Durch entsprechende Tests zur Verifikation und Validierung wurde die Vollständigkeit und Richtigkeit des Modells bestätigt.

Die Beantwortung der untergeordneten Forschungsfragen ermöglicht letztendlich die Beantwortung der übergeordneten Fragestellung dieser Arbeit:

*Wie kann ein leistungsgerechter Einsatz von mobilen Kommissionierrobotern in der hybriden Kommissionierung erfolgen?*

In dieser Arbeit wurde ein umfassendes Untersuchungskonzept für den Betrieb von hybriden Kommissioniersystemen entwickelt. Durch die Überführung in eine Simulationsumgebung ermöglicht es die Untersuchung solcher Systeme. Darauf aufbauend wurden Betriebsstrategien konzipiert, die es ermöglichen, je nach Systemkonfiguration eine entsprechende Leistungssteigerung zu realisieren. Außerdem liefern die entwickelten Strategien einen Beitrag zur erstmaligen Konzeptionierung von hybriden Kommissioniersystemen, so dass bei zukünftigen Planungen der Betrachtungsraum an Inputfaktoren entsprechend eingeschränkt werden kann. Dies stellt einen Mehrwert dar, den die bisherigen Arbeiten in diesem Bereich nicht erbringen konnten.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

---

Die Kommissionierung stellt für Unternehmen einen Schlüsselfaktor in den intralogistischen Abläufen dar. Ihre Aufgabe ist es, dem Kunden, unabhängig ob intern oder extern, die geforderte Ware gemäß seiner Bestellung bereitzustellen. In Handel und E-Commerce können effiziente Prozesse in der Kommissionierung einen Wettbewerbsvorteil bedeuten. Nicht ohne Grund bevorzugen Kunden Unternehmen, die in der Lage sind, Waren in möglichst kurzer Zeit zu versenden. Noch wichtiger für Endkunden sind niedrige Preise (vgl. [Bah-2021]). Allerdings stehen diese beiden Aspekte in einem Zielkonflikt, da schnellere Reaktionszeiten häufig nur mit effizienterer Technik oder höheren Kapazitäten (Personal) erreicht werden können. Die steigenden Anforderungen der Endkunden stehen zudem einem zunehmenden Personalmangel in der Intralogistik gegenüber (vgl. [Sem-2021]). Vor diesem Hintergrund ist es erforderlich, dass Unternehmen ihre bestehenden Kommissionierkonzepte zukunftssicher gestalten.

Einen Ansatz dazu bietet der Einsatz von mobiler Robotik in der Kommissionierung. Hierzu werden einzelne Teilprozesse oder der gesamte Kommissionierprozess automatisiert und durch Roboter übernommen oder unterstützt. Bedingt durch den technologischen Fortschritt der Roboter, hat sich über die letzten zwei Jahrzehnte eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten entwickelt. Eine davon ist das *Robotic Mobile Fulfillment Center (RMFC)*, das erstmalig von dem Unternehmen Kiva vorgestellt wurde (vgl. [And-2008]). Hierbei arbeiten Mensch und Roboter getrennt in unterschiedlichen Arbeitsbereichen. In der Wissenschaft wurde dieses Konzept vielfach untersucht (vgl. Kapitel 3.4.1), wobei der Schwerpunkt dieser Arbeiten vor allem bei der Optimierung der Lagerbelegung, dem Routing und der Auftragszuweisung liegt. Eine weitere Möglichkeit zur Automatisierung der Kommissionierung bieten *Mobile Picking Robots (MPR)*. Im Gegensatz zu einem *RMFC* können *MPR* eigenständig kommissionieren, sodass sie sich mit dem Menschen einen Arbeitsraum teilen können. Der Vorteil dabei liegt in der Möglichkeit, dass aus Prozesssicht ein Mensch vollständig durch einen Roboter ersetzt werden kann, während bei einem *RMFC* der Mensch nach wie vor das Picken übernehmen muss. Für Kommissioniersysteme, in denen Mensch und Roboter in einem gemeinsamen Arbeitsraum agieren, hat sich der Begriff *hybride Kommissionierung* etabliert (vgl. [Win-2021, S. 13]).

Die Planung und Steuerung von hybriden Kommissioniersystemen kann jedoch nur bedingt von bestehenden Ansätzen homogener Systeme übernommen werden. Im Fall einer hybriden Kommissionierung muss berücksichtigt werden, dass zwei Agenten mit unterschiedlichen Charakteristika im System eingesetzt werden. Insbesondere beim Roboter, der aufgrund des gemeinsamen Arbeitsraums hohe Sicherheitsanforderungen erfüllen muss, sind die auftretenden Interaktionen entscheidend für seine Leistungsfähigkeit. Welchen Einfluss

diese Interaktionen zudem auf die gängigen Planungsprobleme haben, die bei der Konzeptionierung und Steuerung von Kommissioniersystemen berücksichtigt werden, lässt sich aus den Erkenntnissen von homogenen Systemen nicht ableiten. In der Wissenschaft lassen sich erste Arbeiten identifizieren, die einen Einsatz von hybriden Kommissioniersystemen untersuchen (vgl. Kapitel 3.4.3). Allerdings ist in allen diesen Untersuchungen der Betrachtungsraum an Planungsproblemen eingeschränkt, sodass es ihnen nicht möglich ist, allgemeingültige Aussagen über den Einsatz von hybriden Kommissioniersystemen zu treffen. Solch allgemeingültige Erkenntnisse können jedoch sowohl Planer als auch (zukünftige) Betreiber von hybriden Kommissioniersystemen dabei unterstützen, den Planungsaufwand zu reduzieren, indem der Betrachtungsraum an relevanten Freiheitsgraden bereits im Vorfeld eingeschränkt wird. Des Weiteren können die Erkenntnisse bei bestehenden hybriden Systemen dazu beitragen, dass die Leistung sowohl der Agenten als auch des Gesamtsystems gesteigert wird.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung geeigneter Betriebsstrategien von hybriden Kommissioniersystemen. Dazu wurde zunächst ein Untersuchungsmodell für hybride Kommissioniersysteme konzipiert (vgl. Kap. 4). Wesentlicher Bestandteil des logischen Modells war die Modellierung von Mensch und Roboter mit ihren Interaktionen und Verhaltensweisen (vgl. Unterabschn. 4.5). Für den Menschen wurde das *Social Force Model* zu Grunde gelegt (vgl. [Hel-1995]), welches für den Einsatz in der Kommissionierung adaptiert wurde. Der Roboter basiert auf etablierten Verhaltensweisen und berücksichtigt die gültigen Sicherheitsanforderungen verschiedener Normen und Richtlinien (vgl. [DIN-3691; VDI-4451]). Das entwickelte Untersuchungsmodell wurde im Anschluss in eine Simulationsumgebung überführt (vgl. Kap. 5). Dabei wurde bewusst die Ablaufsimulation als Untersuchungsmethode gewählt, da nur durch diese die Interaktionen zwischen Mensch und Roboter hinreichend genau abgebildet werden können. Durch verschiedene Tests zur Verifikation und Validierung konnte die Richtigkeit des Modells bestätigt werden.

Auf dieser Grundlage erfolgte die Einflussanalyse der Planungsprobleme (vgl. Kap. 6). Dazu wurden zunächst anhand von statistischen Methoden geeignete Versuchspläne entwickelt. Nach Durchführung der Experimente konnten die Ergebnisse durch ein Regressionsmodell umfassend untersucht werden. Dabei konnten die relevanten Einflussfaktoren identifiziert werden, die zudem in unterschiedlichen Layoutkonfigurationen überprüft wurden. Diese Erkenntnisse ermöglichten die Formulierung von sechs allgemeingültigen Betriebsstrategien, die zur Planung und Gestaltung von hybriden Kommissioniersystemen genutzt werden können. Diese wurden zum Abschluss der Arbeit in Form einer fallstudienbasierten Evaluation auf ihre Anwendbarkeit in der industriellen Praxis hin überprüft (vgl. Kap. 7). Dabei konnte gezeigt werden, dass die Betriebsstrategien in realen Planungsfällen anwendbar sind und als Planungsunterstützung dienen können. Damit konnte das Ziel dieser Arbeit vollumfänglich erreicht werden, indem die folgende Forschungsfrage beantwortet wurde:

---

*„Wie kann ein leistungsgerechter Einsatz von mobilen Kommissionierrobotern in der hybriden Kommissionierung erfolgen?“*

Auch wenn das Forschungsziel erreicht wurde, ist der weitere Forschungsbedarf, der identifiziert, aber nicht weiter bearbeitet werden konnte, hervorzuheben. Dieser besteht zum einen in der Berücksichtigung von monetären Kennzahlen. Der Fokus in dieser Arbeit lag auf der Untersuchung der Leistungsaspekte eines hybriden Kommissioniersystems. In der industriellen Praxis müssen jedoch bei der Entscheidungsfindung Investitionen und laufende Kosten berücksichtigt werden, bevor aus Sicht der Planung ganzheitlich entschieden werden kann, welche Planungsalternative die am besten geeignete ist. Auch im Hinblick auf die Betriebsstrategien müssen in der industriellen Praxis Umsetzungen finanziell bewertet werden können. Da jedoch Investitionen, insbesondere bei Softwareerweiterungen, individuell und von vielen Faktoren abhängig sind, muss die Bewertung im Einzelfall erfolgen. Damit stellt die Berücksichtigung von monetären Einflüssen in der Gestaltung von hybriden Kommissioniersystemen einen Forschungsbedarf dar, der von zukünftigen Arbeiten aufgegriffen werden kann.

Die Arbeit hat dem wissenschaftlichen Vorgehen entsprechend eine Vielzahl an Planungsproblemen berücksichtigen können. Dennoch gibt es insbesondere bei hybriden Kommissioniersystemen weitere Gestaltungsmöglichkeiten, die aufgrund der umfangreichen Basisuntersuchungen nicht näher betrachtet werden konnten. Dazu gehört u. a. ein dynamischer und variabler Einsatz beider Agenten. Im Rahmen der Untersuchung wurde stets deren paralleler Betrieb angenommen. Des Weiteren bietet der Ansatz einer dynamischen Zonierung des Kommissioniersystems die Interaktionen der Agenten zu reduzieren. Dessen Effektivität kann durch die auslastungsorientierte Freigabe von Aufträgen angenommen werden. In diesem Zusammenhang könnte zudem der Einfluss einer ABC-Lagerbelegung nochmals verifiziert werden. Es besteht auch die Möglichkeit, dass beide Agenten zu verschiedenen Zeiten arbeiten. Ausschlaggebend könnte hier die Tageszeit oder der Wochentag sein, so dass der Roboter beispielsweise lediglich über Nacht oder an Tagen eingesetzt wird, an denen der Mensch nicht tätig ist. Darüber hinaus könnten kurzfristige Auftragsspitzen, die während eines Tages auftreten, einen Anlass bieten, zusätzliche Menschen oder Roboter einzusetzen. Welche der beiden Agentenarten dabei die geeignetere ist, könnte ebenfalls Untersuchungsgegenstand sein. Außerdem könnte im Rahmen einer Untersuchung eine differenzierte Sortiments- und Auftragsanalyse erfolgen. Diese könnte, unter Berücksichtigung von Investitionen und Kosten, eine Aussage darüber treffen, wie viele Artikel und Aufträge ein Roboter kommissionieren muss, damit eine Investition rentabel ist.

Ein weitreichender Forschungsbedarf zeigte sich bei der Entwicklung der Interaktionen von Mensch und Roboter. Auch wenn der gewählte Modellierungsansatz für das Forschungsziel hinreichend genau definiert war, zeigte sich im Bereich der Mensch-Roboter-Interaktionen nach wie vor großer Forschungsbedarf. Zwar gibt es in diesem Umfeld bereits eine Vielzahl an Arbeiten, die verschiedenste Aspekte berücksichtigen und untersuchen, allerdings

spielt in diesen die Kommissionierung als Anwendungsfeld eine untergeordnete Rolle. Es könnten daher zum einen Untersuchungen erfolgen, die das Dominanzniveau von Robotern berücksichtigen und aus ergonomischer und psychologischer Sicht Verhaltensmuster für Mensch und Roboter ableiten. Des Weiteren könnten Probandenstudien in bereits bestehenden hybriden Systemen weitere Erkenntnisse darüber liefern, inwieweit der Mensch in seiner Arbeit von Robotern beeinflusst wird. Darauf aufbauend könnten Betriebsstrategien und Interaktionen verfeinert werden, die diese Erkenntnisse ebenfalls berücksichtigen. Durch den Zugang zu realen Systemen ließen sich zudem die entwickelten Betriebsstrategien vertiefen. Durch langfristige Studien zur Erprobung der Betriebsstrategien könnten weitere Erkenntnisse gewonnen werden, die im Rahmen der hier durchgeführten Evaluation nicht identifiziert werden konnten. Aufgrund des generischen Aufbaus des Untersuchungsmodells wäre die Implementierung weiterer Systembeispiele ohne großen Aufwand umsetzbar.

Hervorzuheben ist, dass das Untersuchungsmodell als Werkzeug für die Wissenschaft entwickelt wurde, ein Einsatz in der industriellen Praxis, bspw. durch einen Planer, wäre nur mit einer umfangreichen Simulationsexpertise möglich. Es wäre daher die Entwicklung eines geeigneten Planungstools zur Gestaltung von hybriden Kommissioniersystemen zu empfehlen. Dieses könnte an die Arbeit von *Staab* angelehnt sein und ein strukturiertes Planungsvorgehen berücksichtigen, durch das der Nutzer geführt und in seiner Planungsaufgabe unterstützt wird (vgl. [Sta-2019]).

Diese Arbeit konnte wesentliche Erkenntnisse zur Gestaltung von hybriden Kommissioniersystemen aufzeigen und gleichzeitig offene Fragestellungen identifizieren, die weiteren Forschungsbedarf begründen, um zukünftig einen effizienten Einsatz von mobiler Robotik in der manuellen Kommissionierung sicherzustellen.

## Literaturverzeichnis

---

- [Alb-2009] Albareda-Sambola, M.; Alonso-Ayuso, A.; Molina, E.; De Blas, C. S.: Variable Neighborhood Search for Order Batching in a Warehouse. In: Asia-Pacific Journal of Operational Research 26.05 (2009), S. 655–683.
- [And-2008] Andrea, R. D.; Wurman, P.: Future Challenges of Coordinating Hundreds of Autonomous Vehicles in Distribution Facilities. In: 2008 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (2008), S. 80–83.
- [Arn-2009] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 2009.
- [Aza-2019] Azadeh, K.; de Koster, R.; Roy, D.: Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments. In: Transportation Science 53.4 (2019), S. 917–945.
- [Aza-2020] Azadeh, K.; Roy, D.; de Koster, M. R.: Dynamic Human-Robot Collaborative Picking Strategies. In: SSRN Electronic Journal (2020), S. 1–54.
- [Bac-2016] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 2016.
- [Bah-2021] Bahr, I.: Nach Ecommerce kommt Qcommerce. Ist Deutschland bereit? 2021. Url: <https://www.capterra.com.de/blog/2271/q-commerce-studie> (besucht am 10. 02. 2022).
- [Bak-2007] Baker, P.; Halim, Z.: An Exploration of Warehouse Automation Implementations: Cost, Service and Flexibility Issues. In: Supply Chain Management: An International Journal 12.2 (2007), S. 129–138.
- [Bal-1989] Balci, O.: How to Assess the Acceptability and Credibility of Simulation Results. In: Proceedings of the 21st Conference on Winter Simulation - WSC '89 (1989), S. 62–71.
- [Bal-2003] Balci, O.: Verification, Validation, and Certification of Modeling and Simulation Applications. In: Proceedings of the 35th Conference on Winter Simulation: Driving Innovation (2003), S. 150–158.
- [Bal-2005] Balzert, H.: Lehrbuch Grundlagen der Informatik: Konzepte und Notationen in UML 2, Java 5, C und C#, Algorithmik und Software-Technik, Anwendungen. 2. Aufl. Lehrbücher der Informatik. Elsevier, Spektrum Akad. Verl, München: 2005.

- [Bal-2007] Balci, O.: Verification, Validation, and Testing. In: Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. Hrsg. von Banks, J. 2007, S. 335–396.
- [Ber-1997] Bernnat, R.: Strategien der Lagerplatzvergabe. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden: 1997.
- [Ber-1999] Berg, J. P. van den: A Literature Survey on Planning and Control of Warehousing Systems. In: IIE Transactions 31.8 (1999), S. 751–762.
- [Ble-2009] Blessing, L. T.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. Springer London, London: 2009.
- [Bor-1975] Borries, R. von; Fürwentsches, W.: Kommissioniersysteme Im Leistungsvergleich. Verlag Moderne Industrie, München: 1975.
- [Bos-2021a] Boston Dynamics: [Produktfoto "Atlas"]. Unternehmenshomepage Boston Dynamics. 2021. Url: <https://www.bostondynamics.com/sites/default/files/2021-08/atlas-dynamic.jpg> (besucht am 16. 12. 2021).
- [Bos-2021b] Boston Dynamics: [Produktfoto "Spot"]. Unternehmenshomepage Boston Dynamics. 2021. Url: <https://www.bostondynamics.com/sites/default/files/2021-10/spot-explorer-web-sm.png> (besucht am 16. 12. 2021).
- [Boy-2017] Boysen, N.; Briskorn, D.; Emde, S.: Parts-to-Picker Based Order Processing in a Rack-Moving Mobile Robots Environment. In: European Journal of Operational Research 262.2 (2017), S. 550–562.
- [Boy-2019] Boysen, N.; de Koster, R.; Weidinger, F.: Warehousing in the E-Commerce Era: A Survey. In: European Journal of Operational Research 277.2 (2019), S. 396–411.
- [Bun-2017] Bundesverband E-Commerce und Versandhandel: Bevorzugte Tageszeiten und Wochentage für Online-Einkäufe. 2017. Url: [https://www.boniversum.de/wp-content/uploads/2017/05/Boniversum\\_bevh-Bevorzugte-Tageszeiten-und-Wochentage-fuer-Online-Einkaeufe\\_2017.pdf](https://www.boniversum.de/wp-content/uploads/2017/05/Boniversum_bevh-Bevorzugte-Tageszeiten-und-Wochentage-fuer-Online-Einkaeufe_2017.pdf) (besucht am 20. 07. 2020).
- [Cam-2007] Campolongo, F.; Cariboni, J.; Saltelli, A.: An Effective Screening Design for Sensitivity Analysis of Large Models. In: Environmental Modelling & Software 22.10 (2007), S. 1509–1518.
- [Cam-2014] Campanella, M.; Hoogendoorn, S.; Daamen, W.: The Nomad Model: Theory, Developments and Applications. In: Transportation Research Procedia 2 (2014), S. 462–467.

- 
- [Cla-1964] Clarke, G.; Wright, J. W.: Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. In: Operations Research 12.4 (1964), S. 568–581.
- [Dal-2009] Dallari, F.; Marchet, G.; Melacini, M.: Design of Order Picking System. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 42.1-2 (2009), S. 1–12.
- [Dav-1992] Davis, P. K.: Generalizing Concepts and Methods of Verification, Validation, and Accreditation for Military Simulations. RAND Corporation, Santa Monica, CA: 1992.
- [DIN-3691] Deutsches Institut für Normung: Flurförderzeuge – Sicherheitstechnische Anforderungen und Verifizierung – Teil 4: Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme. DIN-Norm 3691-4:2020-11: 2020.
- [Dom-2015] Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R.; Scholl, A.: Einführung in Operations Research. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 2015.
- [Dor-2016] Döring, N.; Bortz, J.: Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften. 5. Aufl. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin Heidelberg: 2016.
- [Dud-o.J.] Duden: Interaktion. o.J. Url: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Interaktion> (besucht am 31. 10. 2021).
- [Els-1983] Elsayed, E. A.; Stern, R. G.: Computerized Algorithms for Order Processing in Automated Warehousing Systems. In: International Journal of Production Research 21.4 (1983), S. 579–586.
- [Fon-2014] Fontana, M. E.; Cavalcante, C. A. V.: Using the Efficient Frontier to Obtain the Best Solution for the Storage Location Assignment Problem. In: Mathematical Problems in Engineering 2014 (2014), S. 1–10.
- [Fot-2021] Fottner, J. u. a.: Autonomous Systems in Intralogistics – State of the Art and Future Research Challenges. 2. Aufl. Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V., DE: 2021. 41 S. Url: [https://doi.org/10.23773/2021\\_2](https://doi.org/10.23773/2021_2) (besucht am 21. 12. 2022).
- [Fot-2022a] Fottner, J.: Materialfluss und Logistik. Vorlesungsskriptum. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Technische Universität München, Garching: 2022.
- [Fot-2022b] Fottner, J.: Planung technischer Logistiksysteme. Vorlesungsskriptum. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Technische Universität München, Garching: 2022.

- [Fot-2022c] Fottner, J.: Förder- und Materialflusstechnik. Vorlesungsskriptum. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Technische Universität München, Garching: 2022.
- [Fra-1989] Frazee, E. A.; Sharp, G. P.: Correlated Assignment Strategy Can Improve Any Order-Picking Operation. In: *Industrial Engineering* 21.4 (1989), S. 33–37.
- [Fra-2021] Fragapane, G.; de Koster, R.; Sgarbossa, F.; Strandhagen, J. O.: Planning and Control of Autonomous Mobile Robots for Intralogistics: Literature Review and Research Agenda. In: *European Journal of Operational Research* (2021), S. 405–426.
- [Gad-2005] Gademann, N.; Velde, S.: Order Batching to Minimize Total Travel Time in a Parallel-Aisle Warehouse. In: *IIE Transactions* 37.1 (2005), S. 63–75.
- [Geb-o.J.] Gebhardt Fördertechnik GmbH: [Produktfoto "GridPick"]. Unternehmenshomepage Gebhardt Fördertechnik. o.J. Url: [https://www.gebhardt-foerdertechnik.de/fileadmin/user-upload/19025\\_GridPick\\_Website\\_Produnkte\\_RZ.png](https://www.gebhardt-foerdertechnik.de/fileadmin/user-upload/19025_GridPick_Website_Produnkte_RZ.png) (besucht am 18. 12. 2021).
- [Gib-1992] Gibson, D. R.; Sharp, G. P.: Order Batching Procedures. In: *European Journal of Operational Research* 58.1 (1992), S. 57–67.
- [Gil-2018] Van Gils, T.; Ramaekers, K.; Caris, A.; de Koster, R. B.: Designing Efficient Order Picking Systems by Combining Planning Problems: State-of-the-art Classification and Review. In: *European Journal of Operational Research* 267.1 (2018), S. 1–15.
- [Gon-2020] Gong, Y.; Jin, M.; Yuan, Z.: Robotic Mobile Fulfillment Systems Considering Customer Classes. In: *International Journal of Production Research* (2020), S. 1–18.
- [Got-2019] Gottschalk-Mazouz, N.: Autonomie. In: *Mensch-Maschine-Interaktion*. Hrsg. von Liggieri, K.; Müller, O. J.B. Metzler, Stuttgart: 2019, S. 238–240.
- [Gro-2012] Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall, W. A.: *Technische Mechanik 3: Kinetik*. 12. überarb. Aufl. Springer Vieweg, Berlin: 2012.
- [Gro-2016] Grosse, E. H.; Dixon, S. M.; Neumann, W. P.; Glock, C. H.: Using Qualitative Interviewing to Examine Human Factors in Warehouse Order Picking: Technical Note. In: *International Journal of Logistics Systems and Management* 23.4 (2016), S. 499–518.
- [Gu-2007] Gu, J.; Goetschalckx, M.; McGinnis, L. F.: Research on Warehouse Operation: A Comprehensive Review. In: *European Journal of Operational Research* 177.1 (2007), S. 1–21.

- 
- [Gud-2012a] Gudehus, T.: Logistik 2. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 2012.
- [Gud-2012b] Gudehus, T.: Logistik 1. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 2012.
- [Gui-2008] Guizzo, E.: Three Engineers, Hundreds of Robots, One Warehouse. In: IEEE Spectrum 45.7 (2008), S. 26–34.
- [Gut-2017] Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Simulation in Produktion und Logistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 2017.
- [Hab-2020] Habl, A.; Lienert, T.; Pradines, G.; Fottner, J.: Vehicle Coordination and Configuration in High-powered Automated Vehicle Storage and Retrieval Systems. In: SNE Simulation Notes Europe 30.4 (2020), S. 139–144.
- [Han-2012] Handelsblatt: Amazon übernimmt Hersteller von Lagerhausrobotern. 2012. Url: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/logistik-spezial/online-versandhaendler-amazon-uebernimmt-hersteller-von-lagerhaus-robotern/6348536.html> (besucht am 03. 09. 2020).
- [Hau-2013] Haun, M.: Handbuch Robotik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 2013.
- [Hau-2020] Haug, S.: Expertengespräch am 04.12.2020. Statistikberatung des Lehrstuhls für Mathematische Statistik der TUM School of Computation, Information and Technology an der Technischen Universität München. 2020.
- [Hau-2021a] Haug, S.: Expertengespräch am 01.04.2021. Statistikberatung des Lehrstuhls für Mathematische Statistik der TUM School of Computation, Information and Technology an der Technischen Universität München. 2021.
- [Hau-2021b] Haug, S.: Expertengespräch am 29.10.2021. Statistikberatung des Lehrstuhls für Mathematische Statistik der TUM School of Computation, Information and Technology an der Technischen Universität München. 2021.
- [Hei-2021a] Heinrichs, N.: Logistikbarometer 10/2021. 2021. Url: <https://bit.ly/3JHuFfF> (besucht am 15. 02. 2022).
- [Hei-2021b] Heinrichs, N.: Logistikbarometer 12/2021. 2021. Url: <https://bit.ly/3BAM1bs> (besucht am 15. 02. 2022).
- [Hel-1995] Helbing, D.; Molnár, P.: Social Force Model for Pedestrian Dynamics. In: Physical Review E 51.5 (1995), S. 4282–4286.
- [Hen-2012] Henn, S.; Koch, S.; Wäscher, G.: Order Batching in Order Picking Warehouses: A Survey of Solution Approaches. In: Warehousing in the Global Supply Chain (2012), S. 105–137.

- [Hes-1963] Heskett, J.: Cube-per-Order-Index. A Key to Warehouse Stock Location. In: *Transportation and Distribution Management* Jg. 3 Nr. 1 (1963), S. 23–31.
- [Hes-1964] Heskett, J.: Putting the Cube-per-Order Index to Work in Warehouse Layout. In: *Transportation and Distribution Management* Jg. 4 Nr. 8 (1964), S. 23–30.
- [Hess-2019] Heßler, M.: Automation/Automatisierung. In: *Mensch-Maschine-Interaktion: Handbuch zu Geschichte – Kultur – Ethik*. Hrsg. von Liggieri, K.; Müller, O. J.B. Metzler Verlag, Berlin, Heidelberg: 2019, S. 235–237.
- [Ho-2006] Ho, Y.-C.; Tseng, Y.-Y.: A Study on Order-Batching Methods of Order-Picking in a Distribution Centre with Two Cross-Aisles. In: *International Journal of Production Research* 44.17 (2006), S. 3391–3417.
- [Hom-2011] Hompel, M. ten; Sadowsky, V.; Beck, M.: *Kommissionierung*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 2011.
- [Hom-2018] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Dregger, J.: *Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik*. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 2018.
- [Hoo-2003] Hoogendoorn, S.; H.L. Bovy, P.: Simulation of Pedestrian Flows by Optimal Control and Differential Games. In: *Optimal Control Applications and Methods* 24.3 (2003), S. 153–172.
- [Hua-2015] Huang, G. Q.; Chen, M. Z. Q.; Pan, J.: Robotics in Ecommerce Logistics. In: *HKIE Transactions* 22.2 (2015), S. 68–77.
- [Int-2020] International Federation of Robotics, Hrsg.: *World Robotics 2020*. 2020. Url: [https://ifr.org/downloads/press2018/Presentation\\_WR\\_2020.pdf](https://ifr.org/downloads/press2018/Presentation_WR_2020.pdf) (besucht am 09.02.2021).
- [loo-2015] looss, B.; Lemaître, P.: A Review on Global Sensitivity Analysis Methods. In: *Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems*. Hrsg. von Dellino, G.; Meloni, C. Bd. 59. Springer US, Boston, MA: 2015, S. 101–122.
- [Kau-2019a] Kauke, D.; Fottner, J.: The Effects of Storage Assignment and Order Batching Intensities on Picker Blocking in Narrow-Aisle Order Picking Systems. In: *33rd Annual European Simulation and Modelling Conference 2019* (2019), S. 290–295.
- [Kau-2019b] Kauke, D.; Pancer, E.; Fottner, J.: Mensch und Roboter in der manuellen Kommissionierung. Herausforderungen einer ganzheitlichen Systemplanung. In: *28. Deutscher Materialfluss-Kongress* (2019), S. 161–168.

- 
- [Kau-2020a] Kauke, D.; Sailer, F.; Fottner, J.: Mobile Picking Robots: A First Study of the Effects of Human-Robot-Interactions in Conventional Order Picking Systems. In: EAI MMS 2020 - 5th EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems (2020), S. 319–332.
- [Kau-2020b] Kauke, D.; Fottner, J.: Planungstool zur Entwicklung geeigneter Betriebsstrategien von mobilen Kommissionierrobotern. In: Logistics Journal : Proceedings, Vol. 2020. (2020), S. 347–356.
- [Kau-2021] Kauke, D.; Rett, A.; Fottner, J.: Entwicklung einer dynamischen Routenfindung in hybriden Mensch-Roboter-Kommissioniersystemen. In: Simulation in produktion und logistik 2021 (2021), S. 421–432.
- [Kla-2019] Klarna: Swedes' Online Shopping Habits. 2019. Url: <https://shoppingreport.klarna.com/se-en/> (besucht am 20.07.2020).
- [Kle-2011] Klein, R.; Scholl, A.: Planung und Entscheidung: Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse. 2. Aufl. Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Vahlen, München: 2011.
- [Kle-2016] Klevers, M. T. M.: Integration von Gamification in Handhabungsprozesse am Beispiel der Kommissionierung. fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Technische Universität München, Garching: 2016.
- [Kle-2016b] Kleppmann, W.: Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. 9., überarbeitete Auflage. Praxisreihe Qualitätswissen. Hanser, München Wien: 2016.
- [Koc-2014] Koch, S.: Genetische Algorithmen für das Order Batching-Problem in manuellen Kommissioniersystemen. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden: 2014.
- [Koc-2017] Koch, M. S.: Methodik zur Einführung von Jobrotation in der Logistik. fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Technische Universität München, Garching: 2017.
- [Kos-1999] Koster, M. R. de; Van der Poort, E.; Wolters, M.: Efficient Orderbatching Methods in Warehouses. In: International Journal of Production Research 37.7 (1999), S. 1479–1504.
- [Kos-2007] Koster, R. de; Le-Duc, T.; Roodbergen, K. J.: Design and Control of Warehouse Order Picking: A Literature Review. In: European Journal of Operational Research 182.2 (2007), S. 481–501.
- [Kue-2019] Kuepper, D.; Lorenz, M.; Knizek, C.; Kuhlmann, K.; Maue, A.; Lässig, R.; Buchner, T.: Advanced Robotics in the Factory of the Future. Boston Consulting Group: 2019.

- [Lam-2017] Lamballais, T.; Roy, D.; de Koster, M.: Estimating Performance in a Robotic Mobile Fulfillment System. In: *European Journal of Operational Research* 256.3 (2017), S. 976–990.
- [Lam-2020] Lamballais, T.; Roy, D.; de Koster, R. B.: Inventory Allocation in Robotic Mobile Fulfillment Systems. In: *IIESE Transactions* 52.1 (2020), S. 1–17.
- [Law-2005] Law, A.: How to Build Valid and Credible Simulation Models. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005. Winter Simulation Conference, 2005. IEEE, Orlando, FL. USA: 2005*, S. 24–32.
- [Lee-2019] Lee, H.-Y.; Murray, C. C.: Robotics in Order Picking: Evaluating Warehouse Layouts for Pick, Place, and Transport Vehicle Routing Systems. In: *International Journal of Production Research* 57.18 (2019), S. 5821–5841.
- [Lie-2018] Lienert, T.; Staab, T.; Ludwig, C.; Fottner, J.: Simulation-Based Performance Analysis in Robotic Mobile Fulfillment Systems - Analyzing the Throughput of Different Layout Configurations. In: *8th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (2018)*, S. 383–390.
- [Lie-2019] Lienert, T.; Stigler, L.; Fottner, J.: Failure-Handling Strategies for Mobile Robots in Automated Warehouses. In: *33rd International ECMS Conference on Modelling and Simulation (2019)*, S. 199–205.
- [Lie-2021] Lienert, T.: Methodik zur simulationsbasierten Durchsatzanalyse FTF-basierter Kommissioniersysteme. fml-Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Technische Universität München, Garching: 2021.
- [Lin-1965] Lin, S.: Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem. In: *Bell System Technical Journal* 44.10 (1965), S. 2245–2269.
- [Lof-2019] Loffler, M.; Boysen, N.; Schneider, M.: Picker Routing in AGV-assisted Order Picking Systems. *Deutsche Post Chair - Optimization of Distribution Networks*. RWTH Aachen, Aachen: 2019.
- [Mag-2018] Magazino GmbH: [Produktfoto "TORU"]. Unternehmenshomepage Magazino. 2018. Url: [https://www.magazino.eu/wp-content/uploads/2018/10/mag\\_toru\\_side\\_01.jpg](https://www.magazino.eu/wp-content/uploads/2018/10/mag_toru_side_01.jpg) (besucht am 18. 12. 2021).
- [Mag-2019] Magazino GmbH: [Produktfoto "TORU"]. Unternehmenshomepage Magazino. 2019. Url: [https://www.magazino.eu/wp-content/uploads/2019/03/mag\\_KV02\\_final\\_web.jpg](https://www.magazino.eu/wp-content/uploads/2019/03/mag_KV02_final_web.jpg) (besucht am 14. 12. 2021).
- [Mar-2015] Marchet, G.; Melacini, M.; Perotti, S.: Investigating Order Picking System Adoption: A Case-Study-Based Approach. In: *International Journal of Logistics Research and Applications* 18.1 (2015), S. 82–98.

- 
- [Mor-1991] Morris, M. D.: Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. In: *Technometrics* 33.2 (1991), S. 161–174.
- [Neh-2002] Nehmzow, U.: *Mobile Robotik*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 2002.
- [Nig-2014] Nigam, S.; Roy, D.; de Koster, R. B.; Adan, I.: Analysis of Class-Based Storage Strategies for the Mobile Shelf-Based Order Pick System. In: *13TH IMHRC Proceedings Cincinnati, Ohio, USA (2014)*, S. 1–9.
- [Onn-2016] Onnasch, L.; Maier, X.; Jürgensohn, T.: *Mensch-Roboter-Interaktion - Eine Taxonomie Für Alle Anwendungsfälle*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Medizin: 2016.
- [Onn-2021] Onnasch, L.; Roesler, E.: A Taxonomy to Structure and Analyze Human–Robot Interaction. In: *International Journal of Social Robotics* 13.4 (2021), S. 833–849.
- [Pet-2004] Petersen, C. G.; Aase, G.: A Comparison of Picking, Storage, and Routing Policies in Manual Order Picking. In: *International Journal of Production Economics* 92.1 (2004), S. 11–19.
- [Pro-2016] Prodhon, C.; Prins, C.: Metaheuristics for Vehicle Routing Problems. In: *Metaheuristics*. Hrsg. von Siarry, P. Springer International Publishing: 2016, S. 407–437.
- [Rab-2008] Rabe, M.; Spiekermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg: 2008.
- [Rat-2013a] Ratsamee, P.; Mae, Y.; Ohara, K.; Takubo, T.; Arai, T.: Human-Robot Collision Avoidance Using a Modified Social Force Model with Body Pose and Face Orientation. In: *International Journal of Humanoid Robotics* 10.01 (2013), S. 1–24.
- [Rat-2013b] Ratsamee, P.; Mae, Y.; Ohara, K.; Kojima, M.; Arai, T.: Social Navigation Model Based on Human Intention Analysis Using Face Orientation. In: *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2013)*, S. 1682–1687.
- [Rin-2017] Rinke, N.; Schiermeyer, C.; Pascucci, F.; Berkhahn, V.; Friedrich, B.: A Multi-Layer Social Force Approach to Model Interactions in Shared Spaces Using Collision Prediction. In: *Transportation Research Procedia* 25 (2017), S. 1249–1267.
- [Roo-2001] Roodbergen, K. J.: *Layout and Routing Methods for Warehouses*. University of Rotterdam: 2001.

- [Roy-2019] Roy, D.; Nigam, S.; de Koster, R.; Adan, I.; Resing, J.: Robot-Storage Zone Assignment Strategies in Mobile Fulfillment Systems. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 122 (2019), S. 119–142.
- [Sar-1994] Sargent, R. G.: Verification and Validation of Simulation Models. In: *Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference* (1994), S. 77–87.
- [Sar-2010] Sargent, R. G.: Verification and Validation of Simulation Models. In: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference* (2010), S. 166–183.
- [Sch-1979] Schlesinger, S.; Crosbie, R.; Gagné, R.; Innis, G.; Lalwani, C.; Loch, J.; Sylvester, R.; Wright, R.; Kheir, N.; Bartos, D.: Terminology for Model Credibility. In: *SIMULATION* 32.3 (1979), S. 103–104.
- [Sch-2002] Scholtz, J. C.: Human-Robot Interactions: Creating Synergistic Cyber Forces. In: *Multi-Robot Systems: From Swarms to Intelligent Automata*. Hrsg. von Schultz, A. C.; Parker, L. E. Springer Netherlands, Dordrecht: 2002, S. 177–184.
- [Sch-2015] Schmidtler, J.; Knott, V.; Hölzel, C.; Bengler, K.: Human Centered Assistance Applications for the Working Environment of the Future. In: *Occupational Ergonomics* 12.3 (2015), S. 83–95.
- [Sch-2018] Schröter, D.: Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation. *Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung*. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung Band 81. Fraunhofer Verlag, Stuttgart: 2018.
- [Sem-2021] Semmann, C.; Lauenroth, L.; Bosse, T.: Logistik-Fachkräftemangel Verschärft Sich Wieder. In: *Deutsche Verkehrszeitung* (2021). [Url: https://www.dvz.de/sonderseiten/daten-center/detail/news/logistik-fachkraeftemangel-verschaerft-sich-wieder.html](https://www.dvz.de/sonderseiten/daten-center/detail/news/logistik-fachkraeftemangel-verschaerft-sich-wieder.html) (besucht am 10. 02. 2022).
- [Sie-2017] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: *Statistische Versuchsplanung*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 2017.
- [Spa-2019] Spangenberg, M.; Henrich, D.: Mensch-Roboter-Interaktion. In: *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration*. Hrsg. von Müller, R.; Franke, J.; Henrich, D.; Kuhlenkötter, B.; Raatz, A.; Verl, A. Hanser, München: 2019.
- [Sta-2009] Stark, G.: *Robotik mit MATLAB: mit 33 Tabellen, 40 Beispielen, 55 Aufgaben und 37 Listings*. Lehrbücher zur Informatik. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl, München: 2009.
- [Sta-2019] Staab, T.: Eine exakte Planungsmethode für manuell bediente Lagersysteme mit mehreren Lagerbereichen. *fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik*, Technische Universität München, Garching b. München: 2019.

- 
- [Swi-o.J.] Swisslog AG: [Produktfoto "CarryPick"]. Unternehmenshomepage Swisslog. o.J. Url: <https://www.swisslog.com/-/media/swisslog/images/logistics-warehouse-distribution-automation/products-and-systems/storage-systems/mini-load-system/carrypick/carrypick.jpg> (besucht am 15. 12. 2021).
- [Tal-2009] Talbi, E.-G.: Metaheuristics: From Design to Implementation. John Wiley & Sons, Hoboken, N.J: 2009.
- [Tsu-2021] Tsukanov, A. A.; Senjkevich, A. M.; Fedorov, M. V.; Brilliantov, N. V.: How Risky Is It to Visit a Supermarket during the Pandemic? In: PLoS ONE 16.7 (2021), S. 1–18.
- [Val-2021] Valle, C. A.; Beasley, J. E.: Order Allocation, Rack Allocation and Rack Sequencing for Pickers in a Mobile Rack Environment. In: Computers & Operations Research 125 (2021), S. 1–49.
- [VDI-3590] Verein Deutscher Ingenieure: Kommissioniersysteme Grundlagen. Blatt 1. VDI-Richtlinie 3590. 1994.
- [VDI-4451] Verein Deutscher Ingenieure: Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) Sensorik für Navigation und Steuerung. VDI-Richtlinie 4451. 2003.
- [VDI-4490] Verein Deutscher Ingenieure: Operative Logistikkennzahlen von Wareneingang bis Versand. VDI-Richtlinie 4490. 2007.
- [Wan-2020] Wang, K.; Yang, Y.; Li, R.: Travel Time Models for the Rack-Moving Mobile Robot System. In: International Journal of Production Research 58.14 (2020), S. 4367–4385.
- [Wer-2020] Werner, H.: Supply Chain Management: Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Lehrbuch. Springer Gabler, Wiesbaden [Heidelberg]: 2020. 597 S.
- [Win-2021] Winkelhaus, S.; Grosse, E. H.; Morana, S.: Towards a Conceptualisation of Order Picking 4.0. In: Computers & Industrial Engineering 159 (2021), S. 1–20.
- [Wur-2008] Wurman, P.; D'Andrea, R.; Mountz, M.: Coordinating Hundreds of Cooperative, Autonomous Vehicles in Warehouses. In: AI Magazine Volume 29 Number 1 (2008), S. 9–19.
- [Xi-2010] Xi, H.; Son, Y.-J.; Lee, S.: An Integrated Pedestrian Behavior Model Based on Extended Decision Field Theory and Social Force Model. In: Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (2010), S. 824–836.

- [Xie-2021] Xie, L.; Thieme, N.; Krenzler, R.; Li, H.: Introducing Split Orders and Optimizing Operational Policies in Robotic Mobile Fulfillment Systems. In: *European Journal of Operational Research* 288.1 (2021), S. 80–97.
- [Yan-2002] Yanco, H. A.; Drury, J. L.: A Taxonomy for Human-Robot Interaction. In: *AAAI Fall Symposium on Human-Robot Interaction, AAAI Technical Report FS-02-03* (2002), S. 111–119.
- [Yan-2004] Yanco, H.; Drury, J.: Classifying Human-Robot Interaction: An Updated Taxonomy. In: *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2004, S. 2841–2846.
- [Yin-2014] Yin, R. K.: *Case Study Research: Design and Methods*. 5. ed. Sage, Los Angeles, Calif.: 2014.
- [Yua-2016] Yuan, R.; Cezik, T.; Graves, S. C.: Velocity-Based Storage Assignment in Semi-Automated Storage Systems. In: *SSRN Electronic Journal* (2016), S. 1–42.
- [Yua-2017] Yuan, Z.; Gong, Y. Y.: Bot-in-Time Delivery for Robotic Mobile Fulfillment Systems. In: *IEEE Transactions on Engineering Management* 64.1 (2017), S. 83–93.
- [Zha-2021a] Zhang, M.; Semar, T.; Grosse, E. H.; Winkelhaus, S.; Glock, C. H.: Mensch-Roboter-Kollaboration in der Kommissionierung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116.6 (2021), S. 372–376.
- [Zha-2021b] Zhang, M.; Winkelhaus, S.; Grosse, E. H.: Evaluation of Human Workload in a Hybrid Order Picking System. In: *IFAC-PapersOnLine* 54.1 (2021), S. 458–463.
- [Zhe-2009] Zheng, X.; Zhong, T.; Liu, M.: Modeling Crowd Evacuation of a Building Based on Seven Methodological Approaches. In: *Building and Environment* 44.3 (2009), S. 437–445.
- [Zou-2018] Zou, B.; Xu, X.; Gong, Y.; de Koster, R.: Evaluating Battery Charging and Swapping Strategies in a Robotic Mobile Fulfillment System. In: *European Journal of Operational Research* 267.2 (2018), S. 733–753.
- [Zul-2022] Žulj, I.; Salewski, H.; Goeke, D.; Schneider, M.: Order Batching and Batch Sequencing in an AMR-assisted Picker-to-Parts System. In: *European Journal of Operational Research* 298.1 (2022), S. 182–201.

## Verzeichnis der vom Autor betreuten Studienarbeiten

Im Rahmen der Entstehung dieser Dissertation und der Bearbeitung der zugrunde liegenden Forschungsthemen wurden folgende Studienarbeiten betreut. Die Anfertigung dieser Arbeiten wurde durch den Autor inhaltlich und wissenschaftlich angeleitet.

Kurzbeleg	Titel	Autor	Art	Abgabe
	Robotik in der Intralogistik: Herausforderungen der Automatisierung des manuellen Kommissionierprozesses mit wahrnehmungsgesteuerten Robotern	Gries, Philipp	Bachelor Thesis	2018
[fml-2018]	Analyse der Strategien zur Lagerplatzvergabe im Kontext der manuellen Kommissionierung	Pancar, Emre	Semesterarbeit	2018
	Analyse von Methoden zur Planung und Auswahl von Kommissioniersystemen	Martin, Michael	Semesterarbeit	2019
	Hybride Kommissionierung: Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion (HMI) in der Intralogistik	Martl, Niklas	Bachelor Thesis	2019
	Gegenüberstellung zweier Simulationsprogramme bei der Planung von Kommissioniersystemen: „Plant Simulation“ und „Sim3D“	Mittermeier, Franziska	Semesterarbeit	2019
	Investigation of Human-Robot Interactions in a Picker-to-Parts Order Picking System and Implementation of Selected Scenarios in a Simulation Model	Pancar, Emre	Master Thesis	2019
[fml-2019]	Abbildung einer detaillierten Lagerplatzbelegung in einem generischen Simulationsmodell	Rett, Angelika	Bachelor Thesis	2019
	Development of a Collision Avoidance Concept between Humans and Robots in Order Picking Systems	Eben, Andreas	Semesterarbeit	2020
[fml-2020]	Collision Management in Human-Robot Picking Systems	Grau Miarons, Artur	Master Thesis	2020
	Analyse bestehender Methoden zum Einsatz von mobilen Robotern in der manuellen Kommissionierung	Kallab, Stephan	Bachelor Thesis	2020
	Analyse bestehender Methoden zum Einsatz mobiler Roboter in der manuellen Kommissionierung	Reinisch, Felix	Bachelor Thesis	2020
	Das Verhalten von Mensch und Roboter in der Kommissioniergasse	Sailer, Florian	Bachelor Thesis	2020
	Aufbau eines Konzeptes für Hybride Mensch-Roboter-Systeme in der Lagerlogistik	Wazinski, Sarah	Master Thesis	2020
	Simulation des Pickprozesses von Mensch und Roboter in der hybriden Kommissionierung	Wegerich, Benjamin	Bachelor Thesis	2020



## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1-1	Entwicklung der weltweit verkauften mobilen Roboter in der Logistik. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Int-2020]	2
Abbildung 1-2	Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	4
Abbildung 2-1	Planungsvorgehen für Kommissioniersysteme. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Gud-2012a, S. 765]	10
Abbildung 2-2	Einteilung der relevanten Planungsprobleme. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Gil-2018, S. 2]	16
Abbildung 2-3	Beispiel einer PzW-Kommissionierung mit der Naschubversorgung durch ein AKL (vgl. [Hom-2011, S. 88])	18
Abbildung 2-4	Mögliche Grundform eines Lagerlayouts. Bestehend aus zwei Lagerblöcken, fünf Lagergassen je Block, drei Depots am unteren Ende. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Kos-2007, S. 10]	19
Abbildung 2-5	Platzierung der ABC-Artikel. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Hom-2011, S. 93]	22
Abbildung 2-6	Prinzip der iterativen lokalen Suche [Tal-2009, S. 147]	25
Abbildung 2-7	Beispielhafte Darstellung des 2-Opt-Verfahrens. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Dom-2015, S. 147]	26
Abbildung 2-8	Beispielhafte Darstellung möglicher Routing-Strategien in der Kommissionierung [Roo-2001, S. 36]	29
Abbildung 3-1	Einordnung der Bestandteile eines Robotersystems. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Hau-2013, S. 21]	33
Abbildung 3-2	Kategorisierung der Mensch-Roboter-Interaktionen. Darstellung der Interaktions- (erste Spalte), der Roboter- (zweite und dritte Spalte) und der Teamklassifikation (vierte und fünfte Spalte) [Onn-2016]	35
Abbildung 3-3	Morphologie von Robotern; links: humanoid [Bos-2021a], Mitte: funktional [Mag-2018], rechts: zoomorph [Bos-2021b]	36
Abbildung 3-4	Mobile Roboter in der Kommissionierung; links: RMFC [Swi-o.J.], Mitte: PSA [Geb-o.J.], rechts: MPR [Mag-2019]	38
Abbildung 3-5	Beispielhaftes Layout eines RMFC [Wur-2008]	39
Abbildung 3-6	Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen	48
Abbildung 4-1	Morphologische Betrachtung des Gesamtsystems hybride Kommissionierung	54
Abbildung 4-2	Darstellung des hybriden Kommissioniersystems als Gesamtsystem und die Anordnung der Systemkomponenten Materialfluss und Informationsfluss	56
Abbildung 4-3	Darstellung des Kommissionierprozesses	57

Abbildung 4-4	Darstellung der Sicherheitszone des Menschen [Cam-2014, S. 466]	60
Abbildung 4-5	Gestaltung der Sicherheitszone des Menschen ohne Berücksichtigung von unterstützenden Kommissioniertechniken	61
Abbildung 4-6	Gestaltung der Sicherheitszone des Roboters	63
Abbildung 4-7	Drei Arten einer möglichen Kollision. Eigene Darstellung in Anlehnung an [fml-2020]	65
Abbildung 4-8	Ablaufdiagramm zur Bestimmung der Kollision	66
Abbildung 4-9	Alle Konstellationen einer bevorstehenden Kollision zwischen Mensch und Roboter	67
Abbildung 4-10	Grundverhalten beider Agenten bei einer Kollision des Typs i	68
Abbildung 4-11	Grundverhalten beider Agenten bei einer Kollision des Typs ia	68
Abbildung 4-12	Grundverhalten beider Agenten bei einer Kollision des Typs ib	69
Abbildung 4-13	Grundverhalten beider Agenten bei einer Kollision des Typs iia	70
Abbildung 4-14	Grundverhalten beider Agenten bei einer Kollision des Typs iib	70
Abbildung 4-15	Exemplarische Darstellung eines Layouts mit den relevanten Gestaltungsparametern	73
Abbildung 4-16	Anordnungsmöglichkeiten eines Depots	74
Abbildung 4-17	Pseudocode für die Nearest-Neighbour-Heuristik	79
Abbildung 4-18	Pseudocode für das 2-Opt-Verfahren	80
Abbildung 5-1	Grafische Darstellung der Agenten: links Mensch, rechts Roboter	85
Abbildung 5-2	Implementierung des Bausteins Flächenelement: links als Fläche von neun Flächenelementen, rechts im Detail	86
Abbildung 5-3	Darstellung der Sicherheitszonen beider Agenten im Simulationsmodell	87
Abbildung 5-4	Darstellung einer exemplarischen Interaktion zwischen Mensch und Roboter innerhalb einer Kommissioniergasse im Simulationsmodell	87
Abbildung 5-5	Auswirkungen der Batchgröße auf die Systemleistung (links) und die Durchlaufzeit (rechts)	90
Abbildung 5-6	Auswirkungen der Geschwindigkeit auf die Systemleistung pro Tour (links) und die Durchlaufzeit (rechts)	91
Abbildung 5-7	Auswirkungen der Orderpositionen auf die Wartevorgänge pro Tour (links) und die Durchlaufzeit (rechts)	92
Abbildung 6-1	Vergleich Vollfaktorplan (links) und LHC-Verfahren (rechts) [Sie-2017, S. 183]	99
Abbildung 6-2	Zwei mögliche Ausprägungen des Morris-Screenings	101
Abbildung 6-3	Verteilung der Pickleistung des Menschen über alle Layoutkonfigurationen hinweg	105
Abbildung 6-4	Verteilung Pickleistung des Roboters über alle Layoutkonfigurationen hinweg	107

Abbildung 6-5	Effective Elements für die Pickleistung von Mensch und Roboter. <b>A</b> = Anzahl an Agenten; <b>BT</b> = Übergabe des Batches; <b>LB</b> = Lagerbelegungsstrategie; <b>OB</b> = Anzahl an Positionen je Batch; <b>OP</b> = Größe des Auftragspool; <b>SCS</b> = Anzahl an Artikeln je Auftragsposition; <b>SR</b> = Sicherheitszonen der Roboter; <b>VA</b> = Verteilung der Agenten; <b>WOR</b> = Auslastungsorientierte Auftragsvergabe	109
Abbildung 6-6	Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse einer Regressionsanalyse. A: Abbildung der Regressionskoeffizienten und damit die Veränderung der Picks pro Stunde des Menschen bei der Variation einer Einheit der unabhängigen Variablen. Die grau eingefärbten Werte haben einen p-Wert > 0,05. B: Standardisierte Beta-Koeffizienten, um den Einfluss der einzelnen Inputfaktoren vergleichen zu können	113
Abbildung 6-7	Referenzlayout L1a	114
Abbildung 6-8	Ergebnis der Regressionsanalyse für das Layout L1a. A: Regressionskoeffizienten für den Menschen. B: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Menschen. C: Regressionskoeffizienten für den Roboter. D: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Roboter	115
Abbildung 6-9	Anwendung einer ABC-Belegung. A: Auswirkungen für den Menschen. B: Auswirkungen für den Roboter	120
Abbildung 6-10	Referenzlayout L1a	121
Abbildung 6-11	Zonierung in den Basiskonfigurationen	127
Abbildung 7-1	Layoutgestaltung Fall 1	136
Abbildung 7-2	Ausschnitt des Layouts im Fall 2	138
Abbildung 7-3	Leistungsentwicklung beider Agenten in der bestehenden Konfiguration	140
Abbildung 7-4	Leistungsentwicklung beider Agenten bei vier Depots im Layout, die nebeneinander positioniert sind	141
Abbildung 7-5	Leistungsentwicklung beider Agenten bei vier Depots im Layout, die über die gesamte Breite positioniert sind	141
Abbildung 7-6	Leistungsentwicklung beider Agenten bei einer Kapazitätserweiterung für den Menschen von 15 Positionen	142
Abbildung 7-7	Leistungsentwicklung beider Agenten bei einer Kapazitätserweiterung für den Menschen von 20 Positionen	142
Abbildung 7-8	Leistungsentwicklung bei der Einführung einer Zonierung und 15 Positionen je Kommissioniertour	143
Abbildung 7-9	Leistungsentwicklung bei der Einführung einer Zonierung und 20 Positionen je Kommissioniertour	143
Abbildung 7-10	Leistungsentwicklung beider Agenten bei der Anwendung von Multi-Order-Picking (Betriebsstrategie 1)	145

Abbildung 7-11	Leistungsentwicklung beider Agenten bei einer positionsweisen Übergabe der Aufträge (Betriebsstrategie 4)	146
Abbildung 7-12	Leistungsentwicklung beider Agenten bei einer auslastungsorientierten Übergabe der Aufträge (Betriebsstrategie 5)	146
Abbildung 7-13	Leistungsentwicklung beider Agenten bei einer zonierten Lagerbelegung	147

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 3-1	Übersicht über den Stand der Forschung zu hybriden Kommissioniersystemen	47
Tabelle 4-1	Übersicht über die im Untersuchungsmodell abzubildenden Kennzahlen	54
Tabelle 4-2	Gestaltungsparameter des Menschen	61
Tabelle 4-3	Gestaltungsparameter des Menschen	64
Tabelle 4-4	Zusammenfassung der Interaktionsvarianten	72
Tabelle 4-5	Gestaltungsparameter des Layouts	73
Tabelle 4-6	Gestaltungsparameter des Depots	75
Tabelle 4-7	Gestaltungsparameter der Lagertechnik	75
Tabelle 4-8	Gestaltungsparameter des Sortiments	76
Tabelle 4-9	Gestaltungsparameter des Auftragseingangs	78
Tabelle 5-1	Übersicht der Grenzwerttests	89
Tabelle 6-1	Betrachtete Faktoren für das konzipierte Untersuchungsmodell	97
Tabelle 6-2	Layoutfaktoren im LHC-Verfahren.	102
Tabelle 6-3	Zu untersuchende Layoutvarianten	102
Tabelle 6-4	Versuchsplan des Morris-Screenings	103
Tabelle 6-5	Unabhängige Variablen im Rahmen der Regressionsanalysen	112
Tabelle 6-6	Qualitative Zusammenfassung der Regressionsmodelle für die Basis-konfiguration 1. Grau eingefärbte Bereiche symbolisieren die fehlende Signifikanz des Inputfaktors ( $p \geq 0,05$ )	125
Tabelle 6-7	Qualitative Zusammenfassung der Regressionsmodelle für die Basis-konfiguration 2. Grau eingefärbte Bereiche symbolisieren die fehlende Signifikanz des Inputfaktors ( $p \geq 0,05$ )	128
Tabelle 7-1	Relevante Parameter für Fall 1	137
Tabelle 7-2	Relevante Parameter für Fall 2	139
Tabelle 7-3	Prozentuale Veränderung der Pick- und Gesamtleistung bei Anwendung der Betriebsstrategien 1 bis 5 und die Bestätigung von Betriebsstrategie 6	148



# A Ergänzungen zu Kap. 5: Zusammensetzung der Pickzeit

---

## Mensch

Die berücksichtigte Formel zur Berechnung der Pickzeit des Menschen basiert auf der Arbeit von *Borries und Fürwentsches* (vgl. [Bor-1975, S. 60 ff.]) mit Anpassung nach [fml-2019]. *Gudehus* hat die Formel ebenfalls aufgegriffen und so abgewandelt, dass auch Mittelwerte berechnet bzw. berücksichtigt werden können (vgl. [Gud-2012a, S. 787 ff.]).

Die Formel, die in das Simulationsmodell integriert wurde, sieht wie folgt aus:

$$t_{greif,m} = n_P \cdot \left(1 + \frac{(n_P - 7,5)^4}{8000}\right) \cdot \left(1 + \frac{m_A^2}{110}\right) \cdot \left(1 + \frac{V_A^2}{18000}\right) \cdot 2 \cdot \left[0,3 + \left(\frac{|h_{Fb} - 1,1|}{1,2} + \frac{z_{greif}}{1,6}\right) + \left(\frac{|h_A - 0,9|}{1,2} + \frac{z_A}{1,6}\right) + \max\left(\frac{\gamma}{120}; \frac{d_A}{1,6}\right)\right] \quad (\text{A-1})$$

mit

- $n_P$  Anzahl an Picks
- $m_A$  Masse des Artikels
- $V_A$  Volumen des Artikels
- $h_{Fb}$  Greifhöhe
- $z_{greif}$  Greiftiefe
- $h_A$  Ablagehöhe
- $z_A$  Ablagetiefe
- $\gamma$  Ablagewinkel
- $d_A$  Ablageentfernung

## Roboter

Die Greifzeit des Roboters wird in Anlehnung an *Schröter* konzipiert (vgl. [Sch-2018]). Die Gesamtzeit  $t_{greif,r}$  definiert sich wie folgt:

$$t_{greif,r} = t_H + t_F + t_B + t_L \quad (\text{A-2})$$

Wobei sich  $t_H$  in die Bewegung des Greifmechanismus zum Entnahmeort und  $t_B$  in die Bewegung zur Abgabeposition jeweils in eine vertikale (z) und horizontale (y) Bewegung unterteilen lassen, sodass gilt

$$t_{H,z} = \begin{cases} \frac{s_{H,z}}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} & \text{für } \frac{s_{H,z}}{v_z} \geq \frac{v_z^2}{a_z} \\ 2 \cdot \sqrt{\frac{s_{H,z}}{a_z}} & \text{für } \frac{s_{H,z}}{v_z} < \frac{v_z^2}{a_z} \end{cases} \quad (\text{A-3})$$

$$t_{H,y} = \begin{cases} \frac{s_{H,y}}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} & \text{für } \frac{s_{H,y}}{v_y} \geq \frac{v_y^2}{a_y} \\ 2 \cdot \sqrt{\frac{s_{H,y}}{a_y}} & \text{für } \frac{s_{H,y}}{v_y} < \frac{v_y^2}{a_y} \end{cases} \quad (\text{A-4})$$

$$t_{B,z} = \begin{cases} \frac{s_{B,z}}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} & \text{für } \frac{s_{B,z}}{v_z} \geq \frac{v_z^2}{a_z} \\ 2 \cdot \sqrt{\frac{s_{B,z}}{a_z}} & \text{für } \frac{s_{B,z}}{v_z} < \frac{v_z^2}{a_z} \end{cases} \quad (\text{A-5})$$

$$t_{B,y} = \begin{cases} \frac{s_{B,y}}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} & \text{für } \frac{s_{B,y}}{v_y} \geq \frac{v_y^2}{a_y} \\ 2 \cdot \sqrt{\frac{s_{B,y}}{a_y}} & \text{für } \frac{s_{B,y}}{v_y} < \frac{v_y^2}{a_y} \end{cases} \quad (\text{A-6})$$

$$t_{H,z} = \begin{cases} \frac{s_{H,z}}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} & \text{für } \frac{s_{H,z}}{v_z} \geq \frac{v_z^2}{a_z} \\ 2 \cdot \sqrt{\frac{s_{H,z}}{a_z}} & \text{für } \frac{s_{H,z}}{v_z} < \frac{v_z^2}{a_z} \end{cases} \quad (\text{A-7})$$

$$t_{H,y} = \begin{cases} \frac{s_{H,y}}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} & \text{für } \frac{s_{H,y}}{v_y} \geq \frac{v_y^2}{a_y} \\ 2 \cdot \sqrt{\frac{s_{H,y}}{a_y}} & \text{für } \frac{s_{H,y}}{v_y} < \frac{v_y^2}{a_y} \end{cases} \quad (\text{A-8})$$

$$t_{B,z} = \begin{cases} \frac{s_{B,z}}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} & \text{für } \frac{s_{B,z}}{v_z} \geq \frac{v_z^2}{a_z} \\ 2 \cdot \sqrt{\frac{s_{B,z}}{a_z}} & \text{für } \frac{s_{B,z}}{v_z} < \frac{v_z^2}{a_z} \end{cases} \quad (\text{A-9})$$

$$t_{B,y} = \begin{cases} \frac{s_{B,y}}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} & \text{für } \frac{s_{B,y}}{v_y} \geq \frac{v_y^2}{a_y} \\ 2 \cdot \sqrt{\frac{s_{B,y}}{a_y}} & \text{für } \frac{s_{B,y}}{v_y} < \frac{v_y^2}{a_y} \end{cases} \quad (\text{A-10})$$

Je nach Gestaltung des Roboters können die Bewegungen  $t_H$  und  $t_B$  entweder sequenziell oder gleichzeitig erfolgen. Daraus resultiert folgende Berechnung:

$$t_H = \begin{cases} t_{H,z} + t_{H,y} & \text{für eine sequentielle Bewegung} \\ \max(t_{H,z}; t_{H,y}) & \text{für eine parallele Bewegung} \end{cases} \quad (\text{A-11})$$

$$t_H = \begin{cases} t_{H,z} + t_{H,y} & \text{für eine sequentielle Bewegung} \\ \max(t_{H,z}; t_{H,y}) & \text{für eine parallele Bewegung} \end{cases} \quad (\text{A-12})$$

$$t_B = \begin{cases} t_{B,z} + t_{B,y} & \text{für eine sequentielle Bewegung} \\ \max(t_{B,z}; t_{B,y}) & \text{für eine parallele Bewegung} \end{cases} \quad (\text{A-13})$$

$$t_B = \begin{cases} t_{B,z} + t_{B,y} & \text{für eine sequentielle Bewegung} \\ \max(t_{B,z}; t_{B,y}) & \text{für eine parallele Bewegung} \end{cases} \quad (\text{A-14})$$

Für die Zeitanteile Greifen  $t_F$  und Loslassen  $t_L$  wird der Einfachheit der gleiche fixe Zeitanteil angenommen (vgl. [Sch-2018, S. 101]).



## B Ergänzungen zu Kap. 6: Ergebnisse der Regressionsanalysen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Regressionsanalysen der übrigen neun Layoutvarianten dargestellt. Auf eine explizite Beschreibung der einzelnen Ergebnisse wird verzichtet. Die wesentlichen Abweichungen zwischen den einzelnen Konfigurationen können dem Kapitel 6.7 entnommen werden.

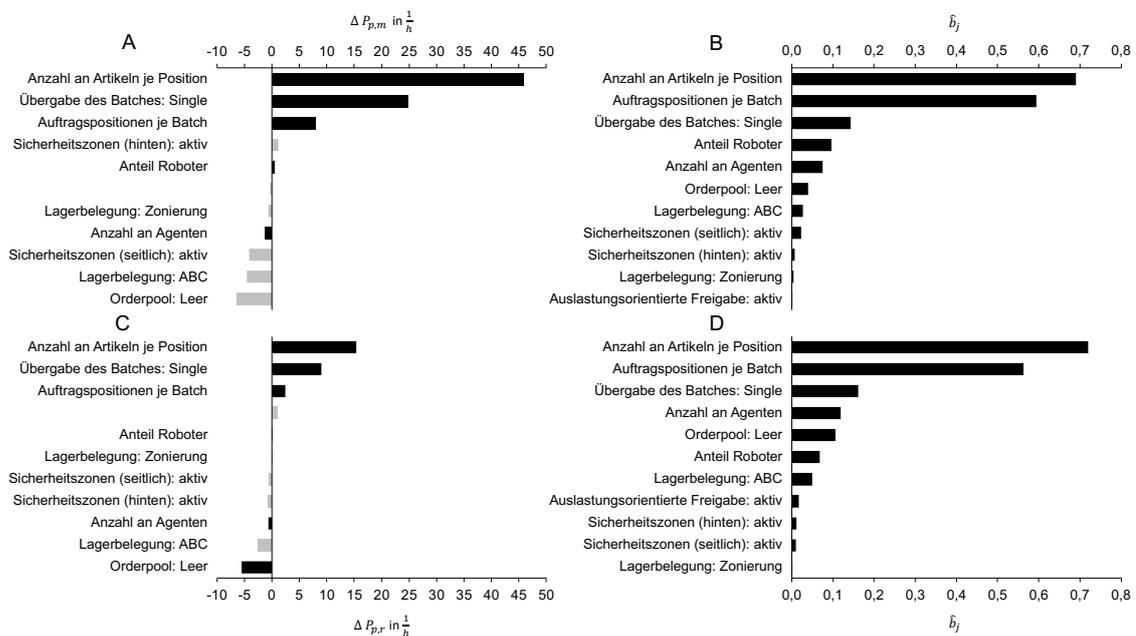


Abbildung B-1: Ergebnis der Regressionsanalyse für das Referenzlayout L1b. A: Regressionskoeffizienten für den Menschen. B: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Menschen. C: Regressionskoeffizienten für den Roboter. D: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Roboter

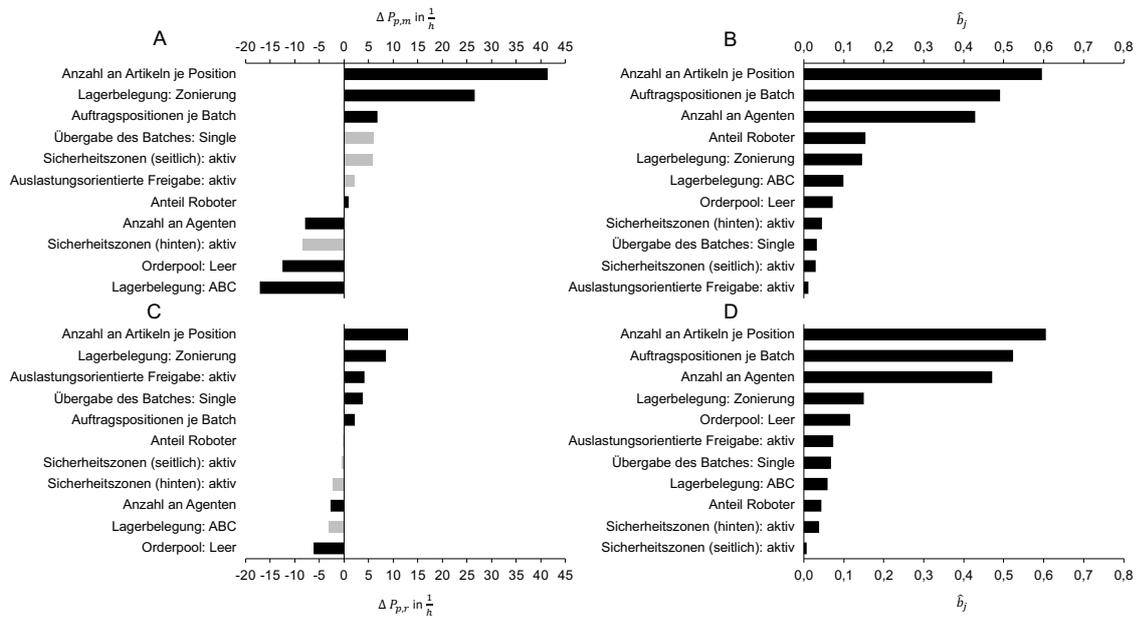


Abbildung B-2: Ergebnis der Regressionsanalyse für das Referenzlayout L1c. A: Regressionskoeffizienten für den Menschen. B: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Menschen. C: Regressionskoeffizienten für den Roboter. D: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Roboter

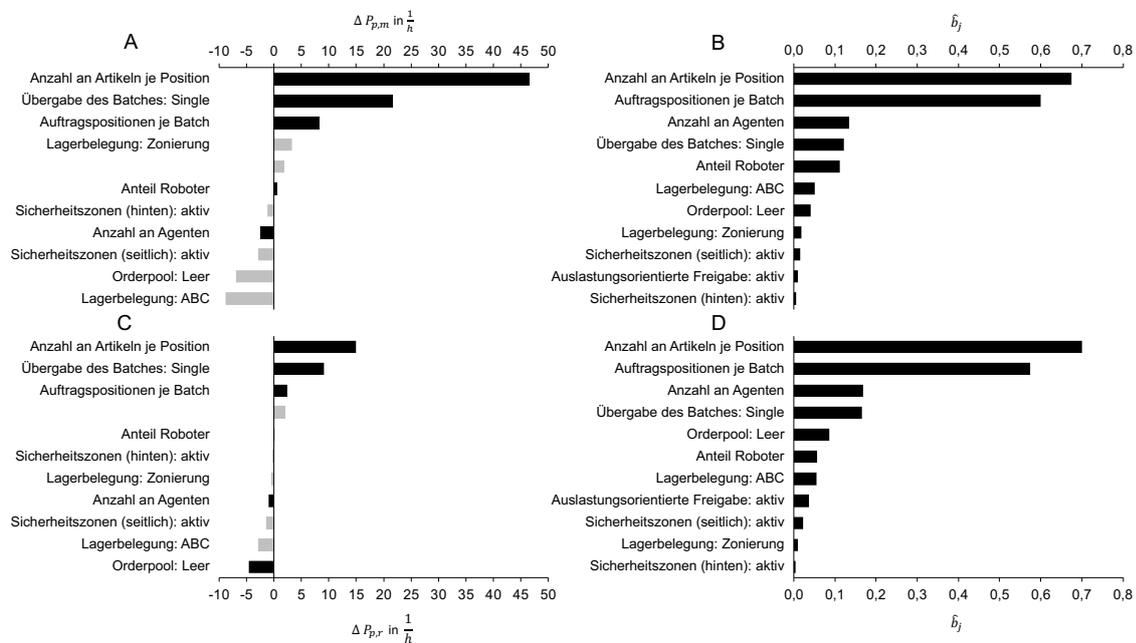


Abbildung B-3: Ergebnis der Regressionsanalyse für das Referenzlayout L1d. A: Regressionskoeffizienten für den Menschen. B: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Menschen. C: Regressionskoeffizienten für den Roboter. D: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Roboter

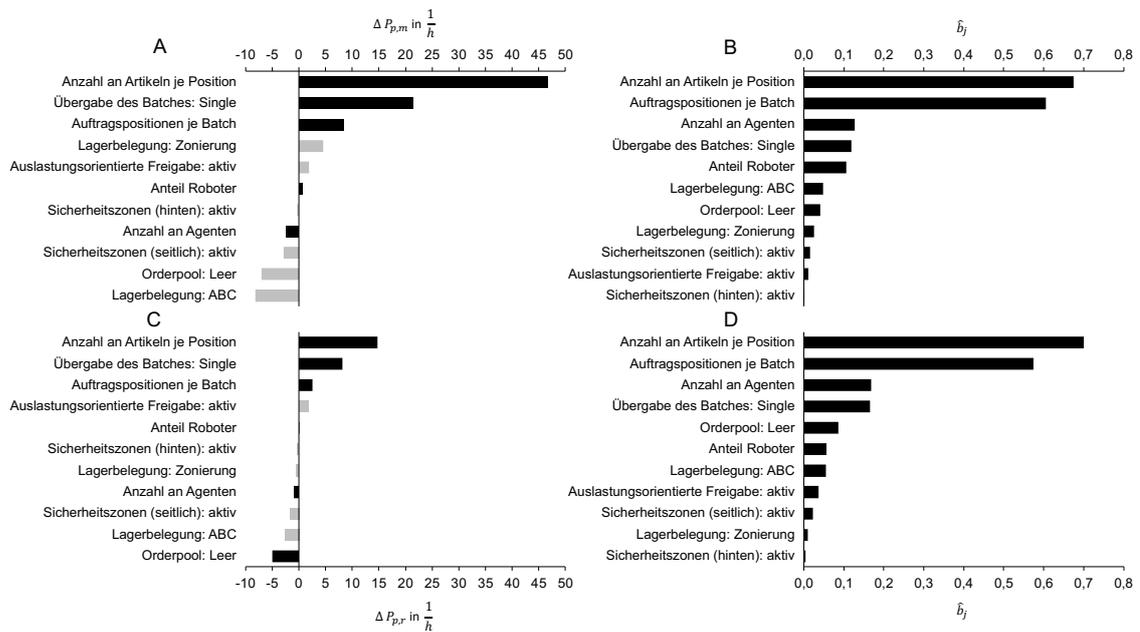


Abbildung B-4: Ergebnis der Regressionsanalyse für das Referenzlayout L1e. A: Regressionskoeffizienten für den Menschen. B: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Menschen. C: Regressionskoeffizienten für den Roboter. D: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Roboter

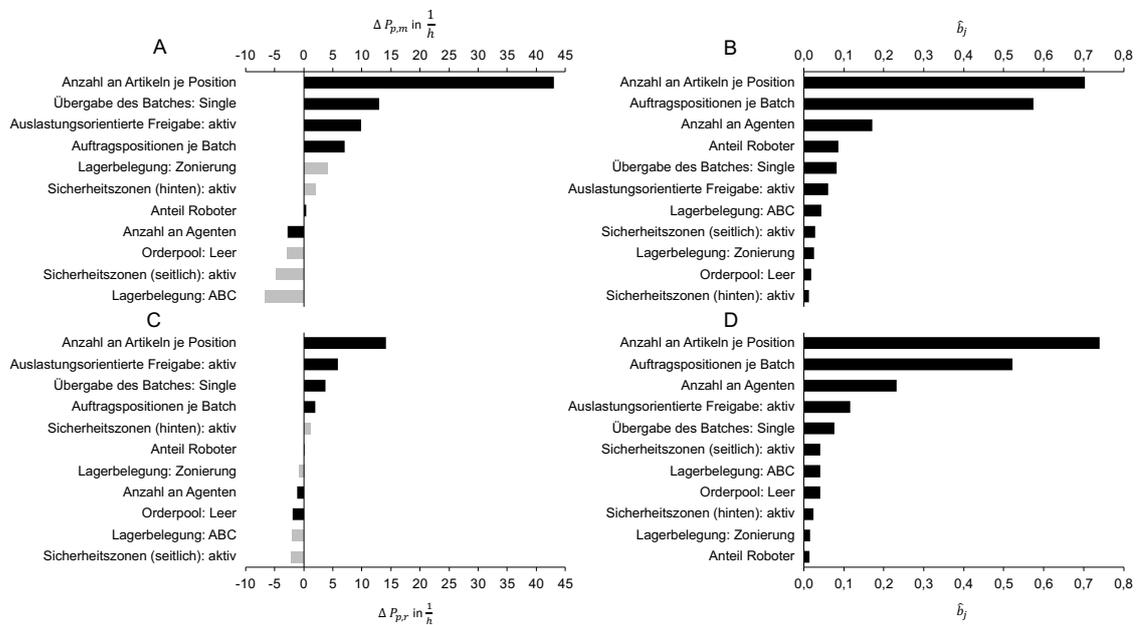


Abbildung B-5: Ergebnis der Regressionsanalyse für das Referenzlayout L2a. A: Regressionskoeffizienten für den Menschen. B: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Menschen. C: Regressionskoeffizienten für den Roboter. D: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Roboter

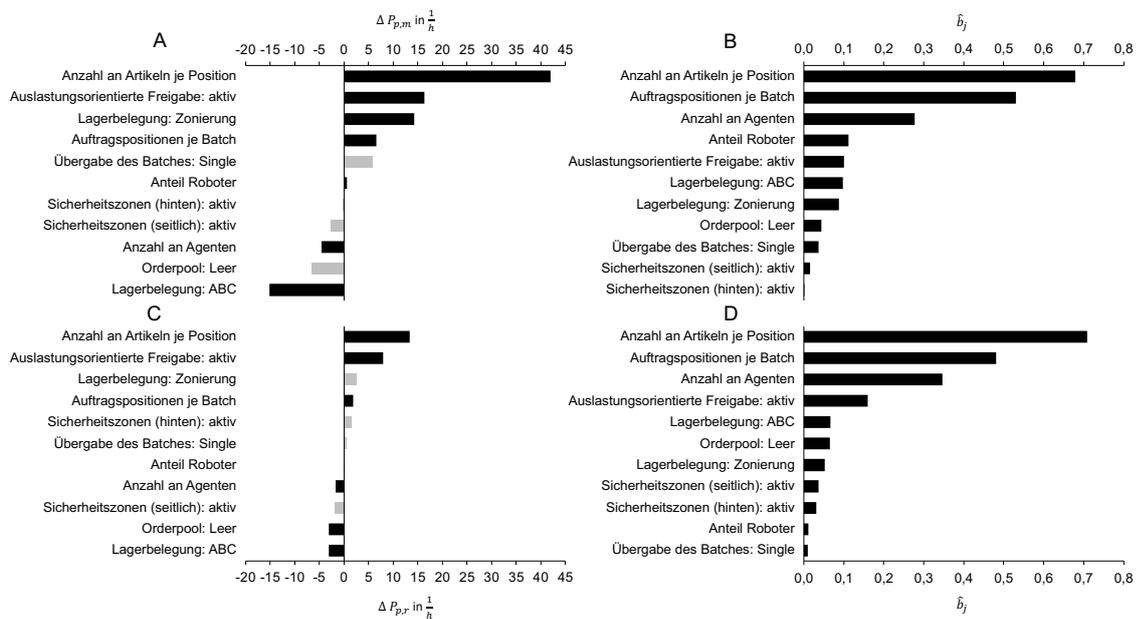


Abbildung B-6: Ergebnis der Regressionsanalyse für das Referenzlayout L2b. A: Regressionskoeffizienten für den Menschen. B: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Menschen. C: Regressionskoeffizienten für den Roboter. D: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Roboter

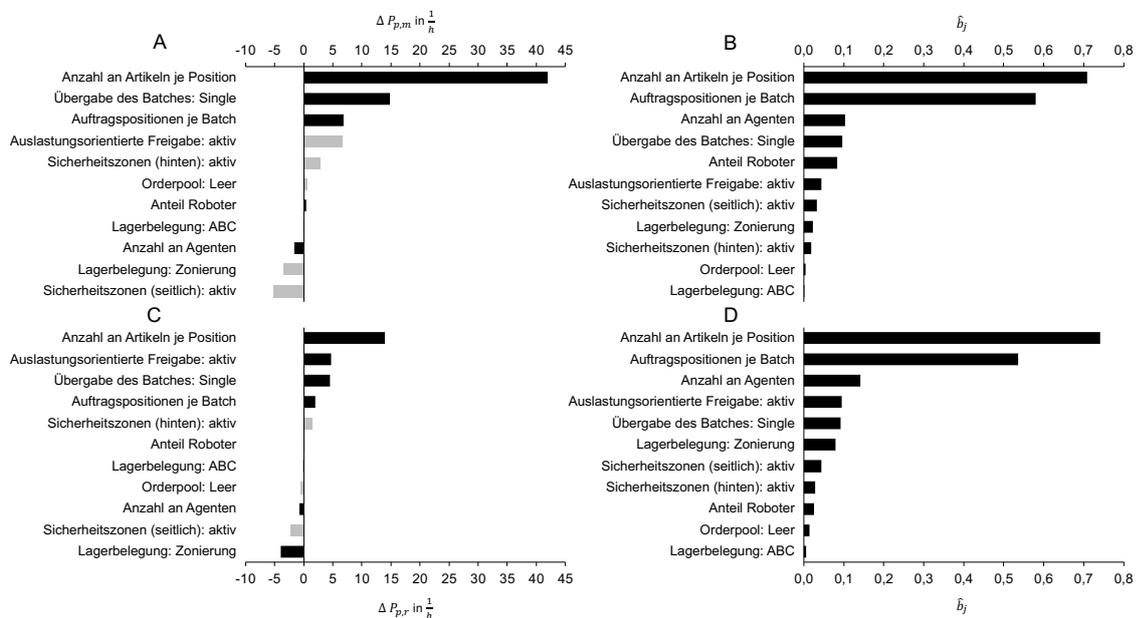


Abbildung B-7: Ergebnis der Regressionsanalyse für das Referenzlayout L2c. A: Regressionskoeffizienten für den Menschen. B: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Menschen. C: Regressionskoeffizienten für den Roboter. D: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Roboter

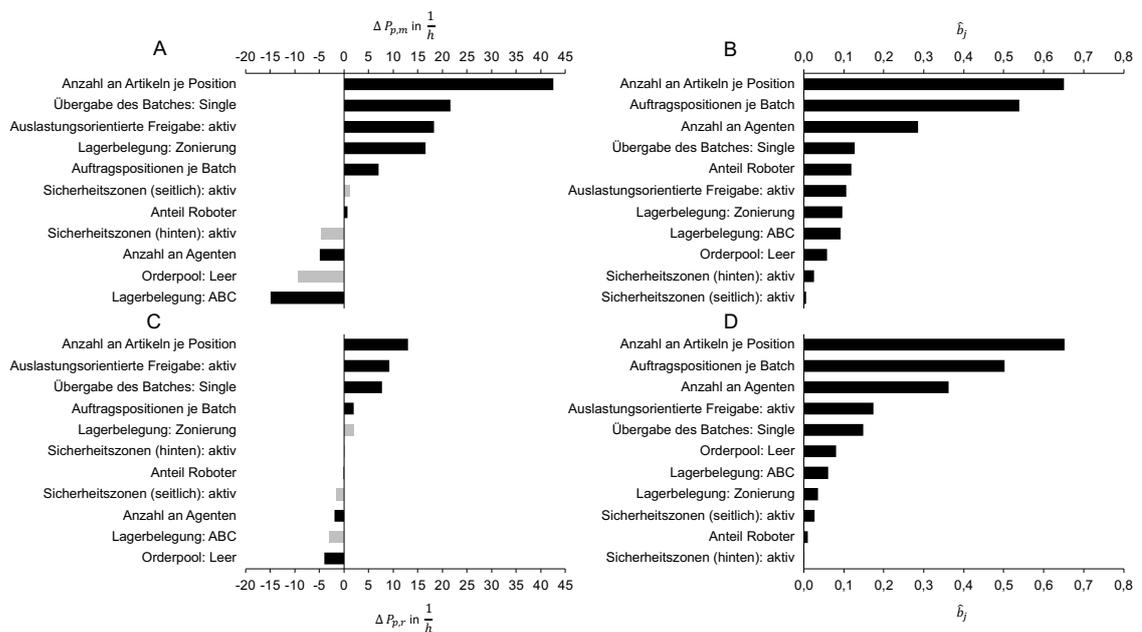


Abbildung B-8: Ergebnis der Regressionsanalyse für das Referenzlayout L2d. A: Regressionskoeffizienten für den Menschen. B: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Menschen. C: Regressionskoeffizienten für den Roboter. D: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Roboter

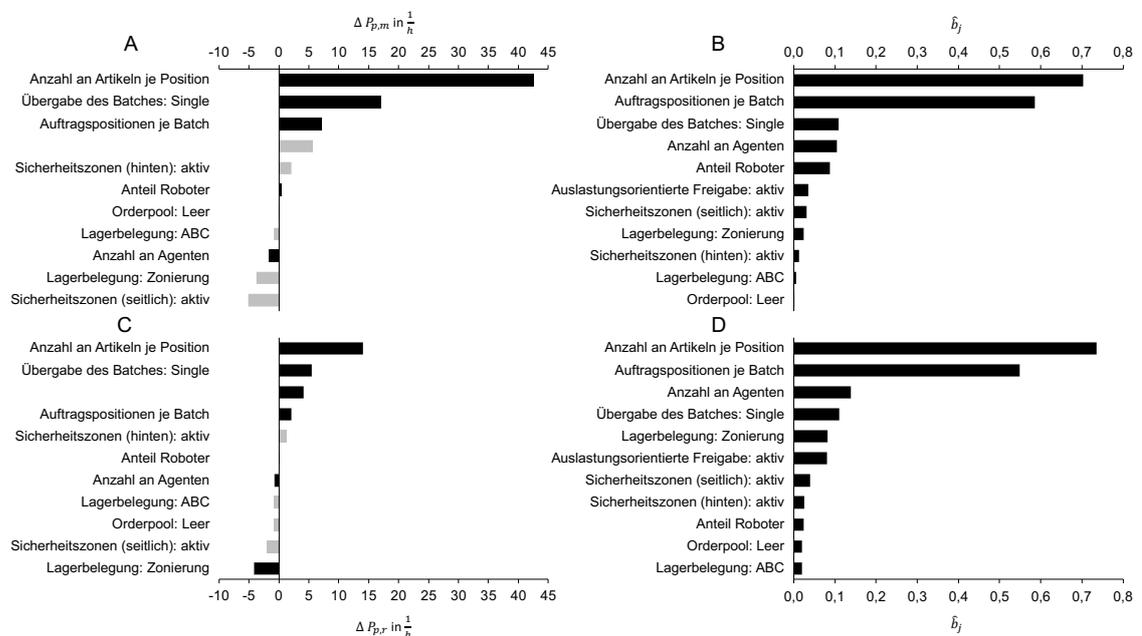


Abbildung B-9: Ergebnis der Regressionsanalyse für das Referenzlayout L2e. A: Regressionskoeffizienten für den Menschen. B: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Menschen. C: Regressionskoeffizienten für den Roboter. D: Standardisierte Beta-Koeffizienten für den Roboter



## C Ergänzungen zu Kap. 7: Betriebsstrategie 2 im Planungsfall 2

Wie zuvor in *Fall 1* ist im Rahmen der Evaluation für *Fall 2* ebenfalls der Einfluss der *Betriebsstrategie 2* zu analysieren. Diese sieht vor, dass mit einer Steigerung der Batchgröße die Leistung beider Agenten erhöht werden sollte. Dabei gilt die Einschränkung, dass die Batchgröße beim Menschen auf maximal 20 und beim Roboter auf maximal 15 Positionen erweitert werden kann. Die Abbildung C-1 zeigt die entsprechenden Ergebnisse.

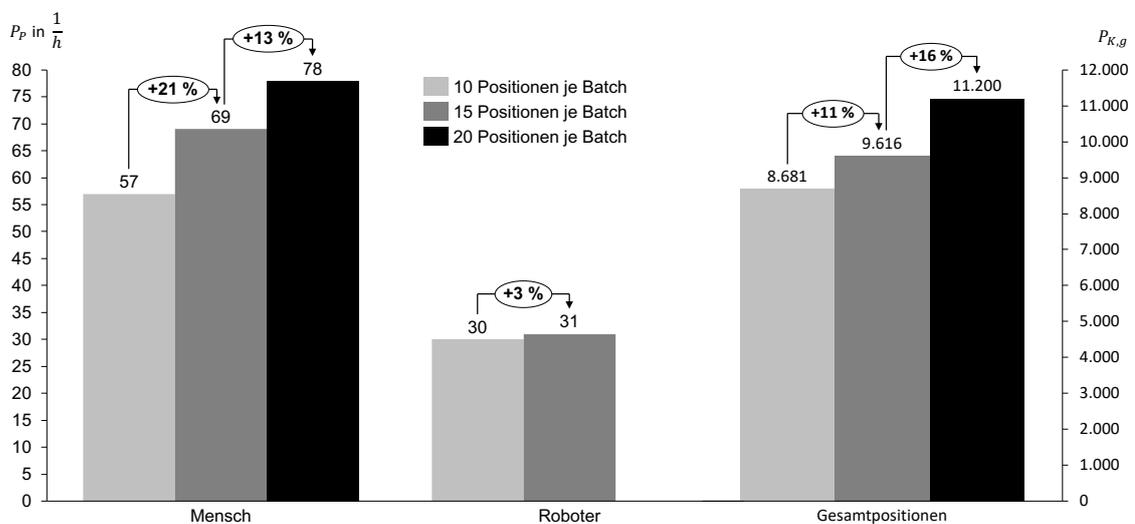


Abbildung C-1: Einfluss der Batchgröße beider Agenten auf die individuelle Leistungsfähigkeit als auch die des Gesamtsystems

Es wird deutlich, dass wie schon in *Fall 1* die Leistungsfähigkeit beider Agenten deutlich gesteigert werden kann. Wobei der Mensch deutlich stärker von der erhöhten Anzahl der Batches profitiert. Damit lässt sich die Wirksamkeit der *Betriebsstrategie* abermals bestätigen.