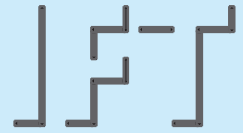


Berichte aus dem

**INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK
UND LOGISTIK**

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K.-H. Wehking

UNIVERSITÄT STUTTGART



Tobias Sommer

**Entwicklung und Bewertung
von Lagerstrategien
zur Steigerung der Energieeffizienz
in automatischen Hochregallagern
unter Beachtung des Umschlags**

August 2015

Entwicklung und Bewertung von Lagerstrategien zur Steigerung der Energieeffizienz in automatischen Hochregallagern unter Beachtung des Umschlags

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Tobias Sommer
aus Pegnitz (Freistaat Bayern)

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karl-Heinz Wehking
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Sascha Röck

Tag der mündlichen Prüfung: 04.05.2015

Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als Akademischer Mitarbeiter und Abteilungsleiter am INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK UND LOGISTIK (IFT) der UNIVERSITÄT STUTTGART sowie als Mitglied der Graduiertenschule SIMULATION TECHNOLOGY (GS SIMTECH) des STUTTGART RESEARCH CENTRE FOR SIMULATION TECHNOLOGY.

Die Kombination aus wissenschaftlicher Projektarbeit am IFT und fachlichem Austausch am SIMTECH habe ich als ideales Umfeld zur Erstellung meiner Dissertation empfunden. Dabei erfuhr ich an beiden Einrichtungen eine hervorragende Unterstützung meiner Forschungsarbeit.

Mein großer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. KARL-HEINZ WEHKING, dem Leiter des IFT, für die Ermöglichung und Unterstützung meines Promotionsvorhabens und die eingeräumten Freiheiten bei der Erstellung dieser Arbeit.

Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. RAINER BRUNS, dem Inhaber des LEHRSTUHL FÜR MASCHINENELEMENTE UND TECHNISCHE LOGISTIK (MTL) der HELMUT-SCHMIDT-UNIVERSITÄT HAMBURG, für die Übernahme des ersten Mitberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. SASCHA RÖCK von der HOCHSCHULE ESSLINGEN danke ich für das Interesse an meiner Arbeit, für ergiebige fachliche Diskussionen, für die Übernahme des zweiten Mitberichts sowie für die Leitung meiner Ausbildung an der GS SIMTECH.

Ich danke darüber hinaus Herrn Prof. Dr.-Ing. PETER KLEMM, dem Direktor des INSTITUTS FÜR STEUERUNGSTECHNIK DER WERKZEUGMASCHINEN UND FERTIGUNGSEINRICHTUNGEN (ISW) der UNIVERSITÄT STUTTGART, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein Dank gilt zudem allen aktiven und ehemaligen Mitarbeitern des IFT in Wissenschaft, Technik und Verwaltung. Insbesondere meine Kollegen und Mitarbeiter der Abteilung Logistik unterstützten mich durch Diskussionen, Anregungen und konstruktive Kritik. Sie schufen eine fachlich und menschlich herausragende Arbeitsatmosphäre.

Dresden, im Juni 2015

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	iii
Inhaltsverzeichnis	
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	ix
Algorithmenverzeichnis	x
Abkürzungsverzeichnis	xi
Kurzfassung	xiv
Abstract	xv
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Zielstellung der Arbeit	3
1.4 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen automatischer Hochregallager	6
2.1 Logistik und Materialfluss	6
2.2 Systemtechnik und Kybernetik in der Logistik	7
2.3 Aufgaben von Lagersystemen	10
2.4 Elemente automatischer Hochregallager	11
2.4.1 Ladeeinheit	12
2.4.1.1 Begriffe und Beschreibung von Paletten	12
2.4.1.2 Verweildauer von Artikeln und Ladeeinheiten	14
2.4.2 Palettenregal	16
2.4.3 Regalbediengerät	18
2.4.4 Lagervorzone	22
2.4.5 Lagersteuerung und -verwaltung	23
2.5 Prozesse in automatischen Hochregallagern	25
3 Effizienz automatischer Hochregallager	28
3.1 Effizienz und Produktivität	28
3.2 Umschlag und Energieeffizienz automatischer Hochregallager	30
3.3 Optimierung der Energieeffizienz automatischer Hochregallager	34
3.3.1 Systematisierung der Ansätze	34
3.3.2 Mechanische Konstruktion	37
3.3.3 Elektrische und elektrotechnische Konfiguration	38

3.3.4	Bewegungssteuerung	39
3.3.5	Lagerstrategien	42
3.3.5.1	Funktionen von Lagerstrategien	42
3.3.5.2	Einlagerung	44
3.3.5.2.1	Ladungsträgerzuordnung	44
3.3.5.2.2	Gassenzuordnung	44
3.3.5.2.3	Lagerplatzzuordnung	45
3.3.5.3	Ladeeinheitenauswahl bei Auslagerungen	54
3.3.5.4	Umlagerung	55
3.3.5.5	Reihenfolgebildung	55
3.3.5.5.1	Erfassung der Aufträge für Ein- und Auslagerungen	57
3.3.5.5.2	Auswahl der Warteschlange	58
3.3.5.5.3	Reihenfolgebildung innerhalb der beiden Warte- schlangen	58
3.3.5.6	Dringlichkeitsregeln	61
3.3.5.7	Befehlszyklus des RBG	62
3.3.5.7.1	Spielbildung	62
3.3.5.7.2	Verweilpunkt	63
3.3.5.8	Fazit	64
4	Bewertung der Energieeffizienz von Lagerstrategien	66
4.1	Simulative Bewertung von Lagersystemen	66
4.1.1	Modelle, Modellierung und Simulation	66
4.1.2	Bewertung der Simulation	69
4.2	Modellierung eines automatischen Hochregallagers	70
4.2.1	Ablauf der Simulationsstudie	70
4.2.2	Problemstellung, Simulationswürdigkeit und Zielformulierung	73
4.2.3	Datenermittlung	74
4.2.3.1	Technische Daten	74
4.2.3.2	Systemlastdaten	76
4.2.3.3	Organisationsdaten	77
4.2.4	Erstellung des Simulationsmodells	78
4.2.4.1	Aufbau des Modells	78
4.2.4.2	Betriebsleitebene Lagerverwaltungssystem	80
4.2.4.2.1	Bestands- und LP-Verwaltung aller Gassen	80
4.2.4.2.2	Erzeugung von Ein- und Auslagerungsaufträgen	82
4.2.4.2.3	Initialbelegung des Lagers	82
4.2.4.2.4	Verwaltung und Anwendung von Lagerstrategien	82

4.2.4.3	Steuerung und Bewegung der Regalbediengeräte	84
4.2.4.4	Verteilte Simulation und Datenkommunikation	87
4.2.4.5	Ergebnisverwaltung und Datenaufbereitung	90
4.3	Durchführung der Simulationsexperimente	92
4.4	Auswertung der Simulationsexperimente	95
5	Entwicklung energieeffizienter Lagerstrategien	100
5.1	Grundüberlegungen	100
5.2	Strategien auf Basis des mittleren Energiebedarfs je LP	104
5.2.1	Grundüberlegungen	104
5.2.2	Ein-Zonen energieminimal (ENM1)	105
5.2.3	Energetische dynamische Zonierung (E-DYN)	108
5.2.4	Energiespannweite in der Isochrone (EMI)	111
5.2.5	EMI mit Toleranzfaktor r (EMIr)	115
5.3	Strategien auf Basis der Energiespannweite je LP	121
5.3.1	Grundüberlegungen	121
5.3.2	Masseverteilung in der Regalwand (MVRW)	125
5.3.3	Masseverteilung in zwei Zonen (MVZ2)	128
5.3.4	Masseverteilung in der Isochrone (MVI)	131
5.3.5	MVI mit aktuellem Lagerfüllgrad (MVI+)	137
5.3.6	MVI mit Toleranzfaktor r (MVIr)	141
5.3.7	MVI+ mit Toleranzfaktor r (MVI+r)	147
5.3.8	MVI+r unter Beachtung mehrerer Regalwände w (MVI+r/w) . . .	154
5.4	Diskussion der Ergebnisse und wirtschaftliche Bewertung	161
6	Zusammenfassung und Ausblick	168
6.1	Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse	168
6.2	Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten	171
	Literatur	174

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung)	4
2.1	Aufbau eines aHRL nach GUDEHUS (2010)	12
2.2	Beispiele von Paletten nach DIN EN ISO 445 (2010)	14
2.3	Quer- und Längseinlagerung nach TEN HOMPEL/ SCHMIDT/ NAGEL (2007)	18
2.4	Aufbau eines RBG nach DIN 15350 (1992)	19
2.5	Struktur eines Umrichterantriebs nach FISCHER (2011)	21
2.6	Konstruktionsprinzipien elektrischer Maschinen nach FISCHER (2011) . . .	22
2.7	aHRL mit Lagervorzone nach JÜNEMANN (1989)	23
3.1	<i>best practice</i> -Produktionsfunktion und technische Effizienz nach CANT- NER/ KRÜGER/ HANUSCH (2007)	29
3.2	Trapezförmiger (links) und dreiecksförmiger (rechts) Geschwindigkeits-Zeit- Verlauf in Anlehnung an ARNOLD/ FURMANS (2007)	33
3.3	Ansatzpunkte zur Reduzierung des Energiebedarfs von RBG (eigene Dar- stellung)	36
3.4	Bahnkurven bei Zwischenkreiskopplung nach ERTL/ GÜNTNER (2013) . .	41
4.1	Klassifikation von Modellen (eigene Darstellung)	67
4.2	Regelkreis der Simulation nach WENZEL/ AHRENS/ SCHÜRHOLOZ <i>et al.</i> (1993)	69
4.3	Ablauf einer Simulationsstudie nach VDI 3633-1 (2000)	72
4.4	Aufbau und Funktionsweise des Simulationsmodells (eigene Darstellung) .	79
4.5	Topologiediagramm eines Mehrkörpermodells nach VDI 3633-8 (2007) . . .	86
4.6	Kommunikationstopologien unter MICROSOFT WINDOWS nach SCHNELL/ WIEDEMANN (Hrsg.) (2006)	88
4.7	OPC- <i>client</i> in PLANT SIMULATION (eigene Darstellung)	90
4.8	OPC-Gruppe und Elemente (eigene Darstellung)	91
4.9	Zugriffshäufigkeiten bei bekannten Strategien (eigene Darstellung)	98
4.10	Fahrzeiten und Energiebedarfe bekannter Strategien im Basisszenario (ei- gene Darstellung)	99
5.1	Fahrzeit und Energiebedarf der LP einer Regalwand (eigene Darstellung) .	106
5.2	Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie ENM1 (eigene Darstellung)	108
5.3	Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie E-DYN (eigene Darstellung)	110
5.4	Mittlerer Energiebedarf der LP der Regalwand (eigene Darstellung)	111
5.5	Isochronen einer Regalwand (eigene Darstellung)	112
5.6	Umfang der Isochronen ($n_{LP, Iso}$) einer Regalwand (eigene Darstellung) . . .	112
5.7	Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie EMI (eigene Darstellung) .	114
5.8	Wirkung des Toleranzfaktors r (eigene Darstellung)	116

5.9 Auswirkung unterschiedlicher Werte des Toleranzfaktors r bei der Strategie EMIr auf Fahrzeit und Energiebedarf im Basisszenario mit Vergleich mit Strategie DYN (eigene Darstellung) 118

5.10 Zugriffshäufigkeiten bei Anwendung der Strategie EMIr und verschiedene Werte für den Toleranzfaktor r (eigene Darstellung) 120

5.11 Masseverteilung bei bekannten Strategien (eigene Darstellung) 122

5.12 Mittlerer Energiebedarf vs. Energiespannweite der LP einer Regalwand (eigene Darstellung) 124

5.13 Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie MVRW (eigene Darstellung) 126

5.14 Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVRW (eigene Darstellung) 127

5.15 Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie MVZ2 (eigene Darstellung) 130

5.16 Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie COL2 (eigene Darstellung) 130

5.17 Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVZ2 (eigene Darstellung) . 130

5.18 Masseverteilung bei Anwendung der Strategie COL2 (eigene Darstellung) . 130

5.19 Auswahl des aus Massesicht realen Soll-LP der aus Verweildauersicht optimalen Isochrone bei Anwendung der Strategie MVI (eigene Darstellung) . . 133

5.20 Sortieren der LP der Isochrone nach absteigender Energiespannweite 134

5.21 Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie MVI (eigene Darstellung) . 135

5.22 Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVI (eigene Darstellung) . . 136

5.23 Auswahl des aus Massesicht realen Soll-LP der aus Verweildauersicht optimalen Isochrone bei Anwendung der Strategie MVI+ (eigene Darstellung) . 138

5.24 Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie MVI+ (eigene Darstellung) 140

5.25 Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVI+ mit Hervorhebung der Masseverteilung in einer „übers Eck“ verlaufenden Isochrone (eigene Darstellung) 140

5.26 Auswirkung des Toleranzfaktors r auf die LP-Zuordnung für eine sehr schwere LE (eigene Darstellung) 143

5.27 Auswirkung unterschiedlicher Werte des Toleranzfaktors r bei der Strategie MVIr auf Fahrzeit und Energiebedarf (eigene Darstellung) 145

5.28 Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie MVI40 (eigene Darstellung) 146

5.29 Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVI40 (eigene Darstellung) 146

5.30 Auswirkung unterschiedlicher Werte des Toleranzfaktors r bei der Strategie MVI+r auf Fahrzeit und Energiebedarf (eigene Darstellung) 149

5.31 Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie MVI+35 (eigene Darstellung) 149

5.32 Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVI+35 (eigene Darstellung) 150

5.33 Masseverteilungen bei Anwendung der Strategie MVI+r und unterschiedlichen Werten für den Toleranzfaktor r (eigene Darstellung) 152

5.34 Mittlere Verfügbarkeit eines definierten LP in mehreren Regalwänden (eigene Darstellung)	155
5.35 Gesamtdarstellung der untersuchten Lagerstrategien (eigene Darstellung) .	162

Tabellenverzeichnis

2.1	Verweildauer von LE	15
2.2	Steuerungsaufbau in aHRL in Anlehnung an NIEKE (2010), VDI 2681 (1993) sowie VDI 3630 (2006)	24
4.1	Relevante Daten des untersuchten aHRL	75
4.2	Nachfrageverteilung anhand der Parameter α_1 und α_2 nach GLASS (2008) .	76
4.3	Daten der LP-Verwaltung	81
4.4	Untersuchte Szenarien	93
4.5	Fahrzeiten und Energiebedarfe bekannter Strategien im Basisszenario . . .	95
5.1	Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie ENM1 im Basisszenario	107
5.2	Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie E-DYN im Basisszenario	110
5.3	Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie EMI im Basisszenario	114
5.4	Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie EMIr im Basisszenario	118
5.5	Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie MVRW im Basisszenario	126
5.6	Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie MVZ2 im Basisszenario	129
5.7	Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie MVI im Basisszenario	135
5.8	Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie MVI+ im Basisszenario	139
5.9	Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie MVIr im Basisszenario	145
5.10	Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie MVI+r im Basisszenario	150
5.11	Einsparungen hinsichtlich Fahrzeit (ΔFZ) und Energiebedarf (ΔEB) sowie r_{opt} in allen Szenarien bei Anwendung der Strategie MVI+r gegenüber den Referenzstrategien	153
5.12	Fahrzeit (FZ) und Energiebedarf (EB) bei Anwendung der Strategie MVI+r/w im Basisszenario	158
5.13	Einsparungen hinsichtlich Fahrzeit (ΔFZ) und Energiebedarf (ΔEB) sowie r_{opt} in allen Szenarien bei Anwendung der Strategie MVI+r/w gegenüber den Referenzstrategien	159

Algorithmenverzeichnis

1	Ermittlung des Verweildauerquantils α der eingehenden LE	77
2	Ermittlung des Massequantils β der eingehenden LE	78
3	Strategie Ein-Zonen energieminimal (ENM1)	105
4	Strategie Energetische dynamische Zonierung (E-DYN)	109
5	Strategie energieminimal in der Isochrone (EMI)	113
6	Strategie energieminimal in der Isochrone mit Toleranzfaktor r (EMIr) . .	117
7	Strategie Masseverteilung in der Regalwand (MVRW)	125
8	Strategie Masseverteilung in zwei Zonen (MVZ2)	128
9	Strategie Masseverteilung in der Isochrone (MVI)	132
10	Strategie Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem Lagerfüllgrad (MVI+)	139
11	Strategie Masseverteilung in der Isochrone mit Toleranzfaktor r (MVIr) . .	144
12	Strategie Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem Lagerfüllgrad und Toleranzfaktor r (MVI+r)	148
13	Strategie Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem Lagerfüllgrad und Toleranzfaktor r unter Beachtung mehrerer Regalwände w (MVI+r/w) . .	157

Abkürzungsverzeichnis

aHRL	automatische(s) Hochregallager
AKL	automatisches Kleinbehälterlager bzw. automatisches Kleinteilelager
AP	Übergabepunkt(e) für ausgehende Ladeeinheiten
AT	Arbeitstag(e)
BVL	Bundesvereinigung Logistik e. V.
<i>chtzf</i>	<i>clear the highest turnover zone first</i>
<i>cnc</i>	<i>computerized numerical control</i>
<i>coi</i>	<i>cube per order index</i>
COL1	Ein-Zonen-Strategie mit LP-Zuodnung zur <i>closest open location</i> innerhalb der Zone
COL2	Zwei-Zonen-Strategie mit LP-Zuodnung zur <i>closest open location</i> innerhalb der Zonen
COL3	Drei-Zonen-Strategie mit LP-Zuodnung zur <i>closest open location</i> innerhalb der Zonen
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DYN	Dynamische Zonierung
E-DYN	Energetische Dynamische Zonierung
EAF	Ein- und Auslagerungsfahrt(en)
EMI	Energieminimal in der Isochrone
EMIr	Energieminimal in der Isochrone mit Toleranzfaktor r
EN	Europäische Norm
ENM1	Ein-Zonen Strategie mit energieminimaler LP-Zuordnung innerhalb der Zone
ENM3	Energetische ABC-Zonierung mit energieminimaler LP-Zuordnung innerhalb der Zonen bzw. Drei-Zonen Strategie auf Basis des mittleren Energiebedarfs der Lagerplätze mit energieminimaler LP-Zuordnung innerhalb der Zonen

EP	Übergabepunkt(e) für eingehende Ladeeinheiten
<i>erp</i>	<i>enterprise resource planning</i>
<i>et al.</i>	<i>et alii</i>
<i>etc.</i>	<i>et cetera</i>
FEM	<i>federation europeenne de la manutention</i>
<i>fifo</i>	<i>first in first out</i>
FU	Frequenzumrichter
GR	Gleichrichter
i-Punkt	Identifikationspunkt
IFT	Institut für Fördertechnik und Logistik
IPC	Industrie-PC
ISO	International Standardisation Organisation
kg	Kilogramm
kVA	Kilovoltampere
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde(n)
LAM	Lastaufnahmemittel
LE	Ladeeinheit(en)
LFG	Lagerfüllgrad
<i>lifo</i>	<i>last in first out</i>
LP	Lagerplatz/ Lagerplätze
LVS	Lagerverwaltungssystem
<i>mc</i>	<i>motion control</i>
M	Motor
mm	Milimeter

MR	Motorrückwirkung(en)
MVI+	Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem Lagerfüllgrad
MVI+r/w	Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem Lagerfüllgrad und Toleranzfaktor r unter Beachtung mehrerer Regalwände w
MVI+r	Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem Lagerfüllgrad und Toleranzfaktor r
MVI	Masseverteilung in der Isochrone
MVIr	Masseverteilung in der Isochrone mit Toleranzfaktor r
MVRW	Masseverteilung in der Regalwand
MVZ2	Masseverteilung in zwei Zonen
NR	Netzurückwirkung(en)
OLE	<i>Object Linking and Embedding</i>
OPC	<i>Object Linking and Embedding for Process Control</i>
PC	<i>personal computer</i>
RBG	Regalbediengerät(e)
<i>rhtif</i>	<i>restore the hightest turnover item first</i>
RND1	Ein-Zonen Strategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zone (<i>random</i>)
RND2	Zwei-Zonen-Strategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zonen
RND3	Drei-Zonen-Strategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zonen
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung(en)
ÜP	Übergabepunkt(e)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
<i>wms</i>	<i>warehouse management system</i>
WR	Wechselrichter

Kurzfassung

Automatische Hochregallager (aHRL) stellen eine weitverbreitete Lösung zur Lagerung großer Sortimente bei hohen Umschlägen dar. Infolge veränderter energiepolitischer Rahmenbedingungen, wie dem weltweit steigenden Energiebedarf, der Erschöpfung fossiler Primärenergieträger und den zunehmenden politischen Restriktionen stieg der Preis für Industriestrom in Deutschland zwischen den Jahren 2000 und 2013 stark an. AHRL müssen daher hinsichtlich ihrer Energieeffizienz stetig optimiert werden, um weiterhin eine wirtschaftliche Systemlösung darzustellen.

Erst in den letzten Jahren wurden in wissenschaftlichen Arbeiten Strategien zur energieeffizienten Lagerplatz-Zuordnung (LP-Zuordnung) vorgestellt. Mit Hilfe eines Simulationsmodells werden diese Strategien mit bereits bekannten umschlagsoptimierenden Strategien verglichen. Dabei wird der mittlere Energiebedarf der durchgeführten Ein- und Auslagerungsfahrten als Kennzahl zur Bewertung der Energieeffizienz von Lagerstrategien verwendet, während die entsprechende mittlere Fahrzeit als Maßstab für die Leistungsfähigkeit der Strategien hinsichtlich des Umschlags Anwendung findet. Wie die Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertation zeigen, bleiben die dabei entwickelten Strategien jedoch hinsichtlich Energieeffizienz und Umschlag hinter bereits bekannten umschlagsoptimierenden Strategien zurück.

Ziel dieser Arbeit ist es, Strategien zur LP-Zuordnung zu entwickeln und zu bewerten, die die Energieeffizienz von aHRL unter Berücksichtigung des Umschlags verbessern. Damit soll vermieden werden, dass zur Steigerung der Energieeffizienz eine unerwünschte Verminderung des Umschlags in Kauf genommen werden muss.

Die erste Kategorie dieser neuartigen Lagerstrategien basiert auf dem mittleren Energiebedarf der LP zur Ein- und Auslagerung von Ladeeinheiten (LE). Die zweite Kategorie der Strategien basiert auf der Energiespannweite der LP, d. h. auf der Differenz zwischen den Energiebedarfen zur Ein- und Auslagerung einer schweren LE und einer leichten LE. Hierbei wird angestrebt, eine optimale Masseverteilung innerhalb der Regalwand zu erreichen, d. h. schwere LE v. a. in dafür besonders geeignete LP einzulagern. In beiden Kategorien werden Lagerstrategien vorgestellt, die die bekannten Strategien hinsichtlich der Energieeffizienz deutlich übertreffen. Die beste neu entwickelte Strategie führt, je nach Szenario, zu einem um 7-15 % niedrigeren Energiebedarf als die beste bisher bekannte Strategie. Darüber hinaus konnte eine Reduktion der mittleren Fahrzeit erzielt werden. Langfristig hohe monetäre Vorteile der entwickelten Strategie werden in einer Beispielrechnung nachgewiesen. Weitere Effekte, wie die ökologische Positionierung auf Anbieter- und Betreiberseite sowie die Reduktion der CO₂-Kompensationszahlungen als Folge des reduzierten Energiebedarfs, steigern die Attraktivität der entwickelten Strategien.

Abstract

Automated storage and retrieval systems (AS/RS) are widely used to store large assortments when a high throughput is required. Dynamic conditions such as the global rise of energy demand, the exhaustion of fossil energy sources and the tightening of political restrictions have resulted in rising electricity prices for industrial customers in Germany since the year 2000. As a consequence, AS/RS have to be optimized regarding their energy efficiency in order to maintain their status as economical storage solutions.

Research in recent years has aimed to provide energy efficient storage location assignment policies. In this thesis, a simulation model is used to compare these new policies to state-of-the-art policies that focus on throughput maximization. The mean energy demand of storage and retrieval operations serves as a performance indicator for the energy efficiency of the policies, whereas the mean travel time is used to assess the throughput capacity of the policies. To conclude, no optimization in energy efficiency could be detected when switching from turnover-based policies to these energy-based policies.

Thus, this thesis aims to develop and assess storage location assignment policies in order to improve the energy efficiency of AS/RS while maintaining high system throughput. The throughput restriction is added to avoid negative effects on system performance when energy-based policies are applied.

The first category of new storage location assignment policies uses the mean energy demand of each storage location to store and retrieve a pallet. The second category uses the energy spread of each storage location, i. e. the difference between the energy demand to store and retrieve a heavy pallet and a light pallet. This indicator is used to assure an optimal mass distribution among the storage locations of the storage rack by storing heavy pallets exclusively in suitable storage locations. New storage policies are presented in both categories that outperform known policies in energy efficiency. The best performing new strategy induces a 7-15 percent reduction in energy demand compared to the best state-of-the-art policy. Furthermore, the energy savings are accompanied by travel time reductions. The economic feasibility of the best performing policy new policies is confirmed. Secondary effects, such as an improved green image of both suppliers and customers of AS/RS and the reduced payments for CO₂ compensation due to reduced energy demand, broaden the attractiveness of the new storage location assignment policies.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Automatische Hochregallager (aHRL) stellen eine weitverbreitete Lösung zur Lagerung großer Sortimente bei hohen Umschlägen dar. Die Vorteile von aHRL sind mannigfaltig: Die automatische Bedienung reduziert die Unfallgefahr und bietet so Sicherheit für das Lagergut und das Lagerpersonal auch in schwierigen Arbeitsumgebungen, z. B. im Tiefkühlbereich. Zudem ist eine einfache Anlagenüberwachung möglich, die mit einem Leitstand verknüpft werden kann. Dies gestattet eine Echtzeit-Auftragsverfolgung, eine einfache Inventarüberwachung und die Implementierung optimaler Steuerungsalgorithmen. Darüber hinaus sichert die Automatisierung eine hohe Wiederholgenauigkeit der Prozesse bei geringen Fehlerraten, wodurch die Soll-Leistung auch im Mehrschichtbetrieb erreicht wird. Ein hoher Flächennutzungsgrad und geringe Personalkosten qualifizieren aHRL für Standorte mit hohen Grundstücks- und Lohnkosten. Je nach Konfiguration und Steuerung ist zudem ein Einzelzugriff auf alle Ladeinheiten (LE) sowie ein Lagerfüllgrad (LFG¹) bis zu 100 % möglich. Nachteilig wirken sich der hohe Investitionsaufwand und die daraus folgende lange Amortisationsdauer aus. Zudem liegt ein hoher Instandhaltungsaufwand vor, der sich beispielsweise aus hohen Wartungs-, Ersatzteil- und Retrofit-Aufwendungen ergibt. Auch sorgt die auf bestimmte LE und Auftragslasten abgestimmte Anlagenkonfiguration für eine geringe Durchsatz- und Artikelflexibilität und hohe Anlagenfixkosten.²

Aus energetischer Sicht verringert der hohe Flächennutzungsgrad von aHRL den Flächenbedarf und somit die herzustellende und zu verbauende Betonmenge. Schmale Fahrwege erhöhen den Raumnutzungsgrad und senken somit den Kühlbedarf in Kühlanwendungen. Der automatische Betrieb der Regalbediengeräte (RBG) macht Bedienpersonal obsolet, wodurch nur eine geringe Heizlast und eine geringe Beleuchtungsstärke aufgebracht werden muss. Die hohe Wiederholgenauigkeit der Prozesse reduziert Beschädigungen und somit den Energiebedarf für Fehlerarbeit. Dem stehen energetische Nachteile gegenüber: RBG weisen infolge hoher bewegter Massen, langer Fahr- und Hubwege sowie hoher Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte einen beachtlichen Bedarf an mechanischer Energie auf. Die verbauten Antriebe, die Automatisierung, die Positionier- und Rechentechnik sowie der Leitstand sorgen für hohe elektrische Energiebedarfe sowohl während der Anlagenutzung als auch im Leerlauf.³

¹Der LFG beschreibt den Quotienten aus der Anzahl der belegten Lagerplätze geteilt durch die Gesamtanzahl an Lagerplätzen.

²Vgl. EGBELU/ WU (1993, S. 2515), GUDEHUS (2010, S. 581), HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 629), VIS (2002, S. 91) sowie ZOLLINGER (2001, S. 13f). Nach Untersuchungen von SCHEID (2004, S. 55f) existieren in Deutschland etwa 3.250 aHRL mit 9.100 Regalbediengeräten, wobei pro Jahr ca. 200 Neuanlagen installiert werden. Nach SCHEID (2008, S. 35f) werden im Mittel ca. sechs Regalbediengeräte pro aHRL verbaut.

³Vgl. MATERIAL HANDLING INDUSTRY OF AMERICA (Hrsg.) (2009).

Infolge veränderter energiepolitischer Rahmenbedingungen⁴, wie dem weltweit steigenden Energiebedarf, der zunehmenden Erschöpfung fossiler Primärenergieträger und den zunehmenden politischen Restriktionen, stieg der Preis für Industriestrom in Deutschland zwischen den Jahren 2000 und 2013 um 148 %.⁵ Diese externen Faktoren wirken, neben erhofften Kostensenkungen, als Treiber für eine Steigerung der Energieeffizienz industrieller Systeme und Anlagen.⁶ Konkretisiert werden diese Anforderungen beispielsweise in der Entscheidung der EU-Kommission, ein Energieeinsparungsziel von 30 % bis zum Jahr 2030 im Vergleich zum Jahr 2007 festzulegen.⁷ aHRL müssen daher hinsichtlich ihrer Energieeffizienz stetig optimiert werden, um weiterhin eine wirtschaftliche Systemlösung darzustellen.

1.2 Problemstellung

Bisherige industrienaher Ansätze zur Reduzierung der Energiekosten von aHRL umfassen die Reduzierung von Stromspitzen durch sequentielles Anfahren der RBG, eine geringere Auslegung der Transformatoren, die Zwischenkreiskopplung von Fahr- und Hubantrieb, die Energierückspeisung, sowie die Anpassung von Beschleunigungen und Geschwindigkeiten an Fahrwege und Auslastungen. Darüber hinaus wird der *stand by*-Modus bzw. die Abschaltung der RBG, die Durchführung von Umlagerungen zu Niedertarifzeiten, die Einlagerung schwerer Güter in obere Etagen zu Niedertarifzeiten sowie das Auslagern schwerer Güter aus hohen Etagen zu Hochtarifzeiten zur Ausnutzung der Energierückspeisung genutzt.⁸ Viele dieser Maßnahmen sind mit einem erhöhtem Investitionsaufwand für die Ausstattung und die Funktionalität des RBG und daher mit einer systemabhängigen Amortisationsdauer verbunden. Dem stehen energieeffiziente Lagerstrategien gegenüber, deren Implementierung lediglich Programmieraufwand erfordert.

Bisherige Studien zur Entwicklung von Lagerstrategien führen als Zielkriterium meist eine Maximierung des Umschlags von aHRL an.⁹ Die wachsende Bedeutung von energieeffizienten Systemen und Anlagen in intralogistischen Systemen machen es jedoch notwendig, den Energiebedarf als weiteres Zielkriterium zu betrachten. Hinsichtlich der Optimierung der Energieeffizienz von automatischen Lagersystemen durch den Einsatz von Lagerstrategien liegen bisher nur wenige Untersuchungen vor:

⁴Vgl. BAUERNHANSL (Hrsg.) (2014, S. 19-24), BLES/ KESSLER (2013, S. 4-9 und 313-316) sowie HERTEL (2014, S. 4-7).

⁵Gemäß dem BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT e.V. (BDEW) (Hrsg.) (2013, S. 16) betrug der durchschnittliche Strompreis für die Industrie inklusive Stromsteuer im Jahr 2000 0,0605 EUR und im Jahr 2013 0,1502 EUR. Dabei erhöhte sich der Preis für die Erzeugung, den Transport und den Vertrieb um 42 % auf 0,0776 EUR, während die EEG-Umlage um 2.539 % auf 0,05277 EUR stieg.

⁶Vgl. BOLTZ (2008, S. 309f), FREIS/ VOHLIDKA (2013, S. 21) sowie MÜLLER/ ENGELMANN/ LÖFFLER *et al.* (2009, S. 6 und 9f).

⁷Vgl. FRIEDRICH (2014, S. 7).

⁸Vgl. GRÜTTER (2010).

⁹Vgl. Abschnitt 3.3.5.

Während sich SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK auf die energetische Bewertung bekannter Strategien zur Lagerplatz-Zuordnung (LP-Zuordnung) fokussieren¹⁰, präsentieren SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* eigene Lagerstrategien, die eine Senkung des mittleren Energiebedarfs von Ein- und Auslagerungsfahrten anstreben.¹¹ Wie die Ausführungen in Abschnitt 4.4 zeigen werden, führen diese Strategien bei aHRL zu keinen signifikanten Energieeinsparungen im Vergleich zu etablierten Zonierungsstrategien auf zeitlicher Basis. Darüber hinaus bleiben die Strategien hinter bereits erforschten Lagerstrategien mit dynamischer Zonierung hinsichtlich der mittleren Fahrzeit und des mittleren Energiebedarfs zurück. MENEGHETTI/ MONTI erstellen ebenfalls eine Strategie zur energieeffizienten LP-Zuordnung und erproben diese im Bereich von aHRL. Diese Strategie bietet jedoch nur eine sehr geringe Energieeinsparung, die zudem durch eine steigende mittlere Fahrzeit erkauft wird. Darüber hinaus treffen die Autoren bei ihrer Strategie Annahmen, wie eine *a priori*-Festlegung der LP je Artikel sowie eine exklusive Zonierung, die einer Umsetzung der Strategie in Realsystemen entgegen stehen.

Das Ziel einer Erhöhung der Energieeffizienz bei gleichbleibendem Umschlag kann mit den bisher bekannten Strategien somit nicht erreicht werden. Im Bereich der Reihenfolge- und Spielbildung liegen bereits Strategien zur Reduktion des Energiebedarfs vor. Es fehlen somit geeignete Strategien zur LP-Zuordnung, die die Energieeffizienz von aHRL im Vergleich zu bisher bekannten Strategien deutlich verbessern, ohne negative Auswirkungen auf den Umschlag des aHRL auszuüben.

1.3 Zielstellung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, Strategien zur LP-Zuordnung zu entwickeln und zu bewerten, die die Energieeffizienz von aHRL unter Berücksichtigung des Umschlags verbessern. Damit soll vermieden werden, dass zur Steigerung der Energieeffizienz eine unerwünschte Verminderung des Umschlags in Kauf genommen werden muss. Hierzu ist ein adäquates Bewertungssystem zu entwickeln, das sowohl die Energieeffizienz als auch den Umschlag bei Anwendung definierter Lagerstrategien betrachtet. Ergebnis der Arbeit sollen Lagerstrategien sein, die die Energieeffizienz von Ein- und Auslagerungen reduzieren, ohne jedoch negative Auswirkungen auf den Umschlag des aHRL auszuüben.

1.4 Aufbau der Arbeit

Zur Erreichung dieses Ziels wird wie folgt vorgegangen (siehe Abbildung 1.1):

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit werden begriffliche (Abschnitt 2.1) und systemtechnische (Abschnitt 2.2) Grundlagen von aHRL gelegt. Darüber hinaus werden die Aufgaben

¹⁰Vgl. SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012 und 2012a) sowie Abschnitt 3.3.5.2.3.

¹¹Vgl. SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* (2013, S. 100-104) sowie SCHULZ (2014, S. 149-162).

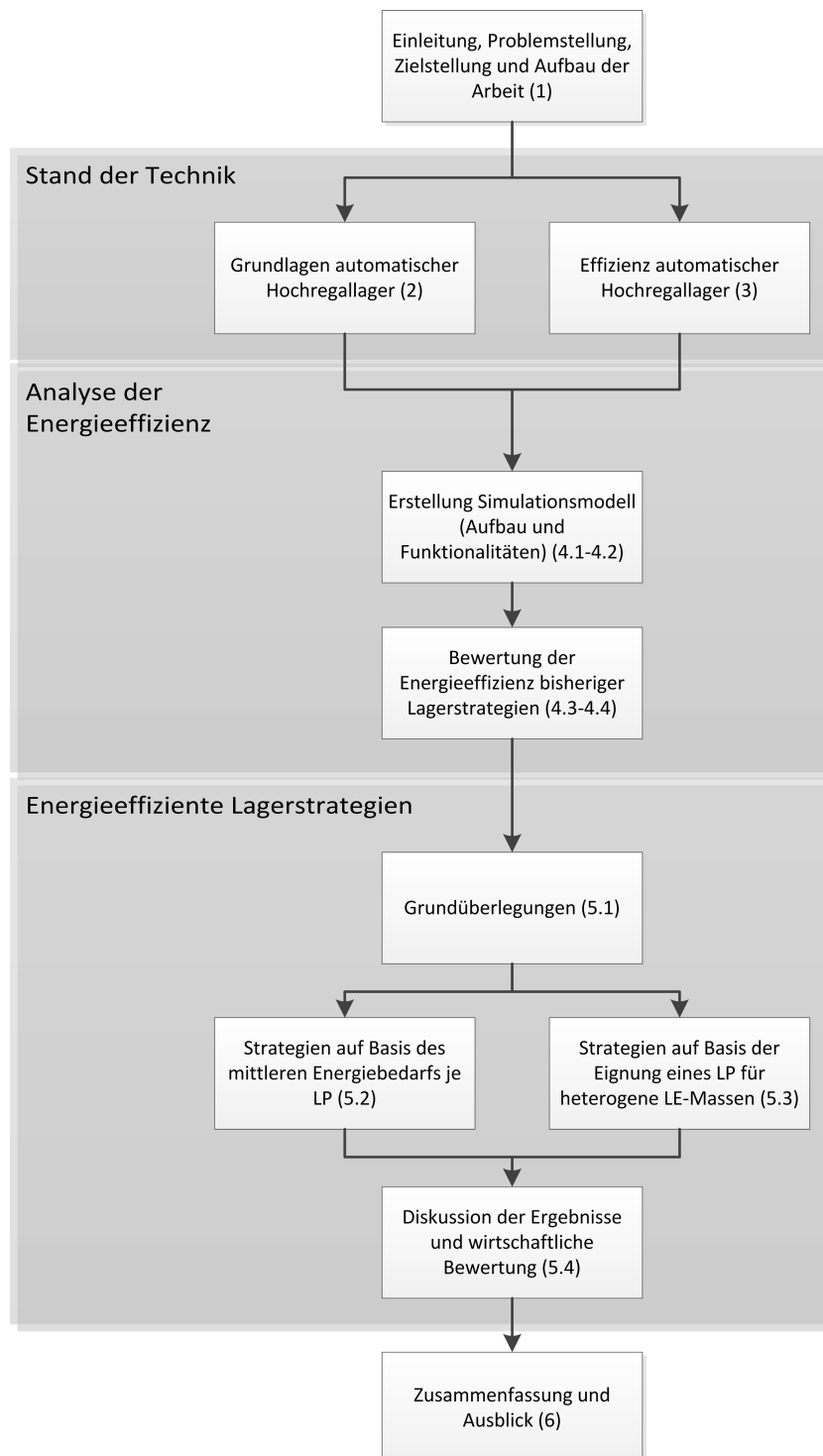


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung)

(Abschnitt 2.3), Elemente (Abschnitt 2.4) und Prozesse (Abschnitt 2.5) von aHRL beschrieben.

Im dritten Kapitel werden, ausgehend von einer Definition der Effizienz (Abschnitt 3.1), der Umschlag und die Energieeffizienz als Effizienzmaße von aHRL vorgestellt (Abschnitt 3.2). Daraufhin werden Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von aHRL (Abschnitt 3.3) zusammengetragen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf Lagerstrategien für aHRL: Nach einer Strukturierung von Lagerstrategien werden bekannte Lagerstrategien für die Funktionen Einlagerung, Auslagerung, Umlagerung, Reihenfolgebildung, Dringlichkeit sowie für den Befehlszyklus des RBG vorgestellt. Dabei werden bisherige wissenschaftliche Untersuchungen zur Wirkung der Lagerstrategien auf Fahrzeiten und Energiebedarfe dargestellt und Defizite abgeleitet.

Im vierten Kapitel wird ein Modell zur Bewertung von Lagerstrategien entwickelt, das auf einem real existierenden aHRL basiert.¹² Nach einer kurzen Einführung in die Simulationstechnik (Abschnitt 4.1) werden der Aufbau und die Erstellung des Simulationsmodells (Abschnitt 4.2) beschrieben. Im Anschluss wird die Durchführung der Simulationsexperimente erläutert (Abschnitt 4.3). Am Ende des vierten Kapitels werden Lagerstrategien aus Kapitel 3 mittels des erstellten Simulationsmodells hinsichtlich ihrer Fahrzeiten und Energiebedarfe bewertet (Abschnitt 4.4). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden anschließend die Grundlage zur Erstellung neuer Lagerstrategien für aHRL.

Im fünften Kapitel werden Strategien zur energieeffizienten LP-Zuordnung in aHRL entwickelt und bewertet. Hierzu werden zunächst Grundüberlegungen angestellt (Abschnitt 5.1). Die entwickelten Strategien (Abschnitte 5.2 und 5.3) werden anhand ihrer Fahrzeiten und Energiebedarfe mit den in Kapitel 4 untersuchten Strategien verglichen. Am Ende des Kapitels erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse sowie eine wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Lagerstrategien (Abschnitt 5.4).

Im sechsten Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse (Abschnitt 6.1). Zuletzt wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder im Bereich effizienter Lagerstrategien (Abschnitt 6.2) gegeben.

¹²Das Modell wurde im Rahmen des Projekts GREENRBG vom INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK UND LOGISTIK (IFT) und dem INSTITUT FÜR STEUERUNGSTECHNIK DER WERKZEUGMASCHINEN UND FERTIGUNGSEINRICHTUNGEN (ISW) der UNIVERSITÄT STUTTGART gemeinsam erstellt. Die vom ISW erstellten Modellbestandteile werden im Rahmen dieser Arbeit zur Bestimmung der mechanischen Leistungsaufnahme der RBG verwendet. Vgl. Abschnitt 4.2.4. Das Projekt GREENRBG (Laufzeit: 01.01.2011-31.08.2013) wurde von der BADEN-WÜRTTEMBERG STIFTUNG gGMBH gefördert und von der VDI/VDE INNOVATION + TECHNIK GMBH betreut.

2 Grundlagen automatischer Hochregallager

2.1 Logistik und Materialfluss

Nach DIN EN 14943 umfasst die Logistik die „Planung, Ausführung und Steuerung der Bewegung und der Bereitstellung von Menschen und/oder Waren und der unterstützenden Tätigkeiten in Bezug auf diese Bewegung und Bereitstellung innerhalb eines zum Erreichen spezieller Ziele organisierten Systems.“¹³ Dabei zielt jede logistische Aktivität nach SCHULTE auf die Optimierung des Logistikerfolgs ab, der sich aus den Komponenten Logistikleistung¹⁴ und Logistikkosten zusammensetzt.¹⁵

Horizontal wird die Logistik in die Beschaffungs-, die Produktions-, die Distributions- und die Entsorgungslogistik unterteilt.¹⁶ Entsprechend dem Kreislaufgedanken verbinden diese vorwärts gerichtet die Beschaffungsmärkte über die Produktionsstandorte mit den Absatzmärkten sowie rückwärts gerichtet die Absatzmärkte über Reparatur, Aufbereitung oder Recycling mit der Beschaffung oder der Produktion.¹⁷

Durch Verknüpfung unterschiedlicher Quellen und Senken entstehen logistische Netze, deren Knoten jeweils Intralogistiksysteme repräsentieren, die durch überbetriebliche Transporte, dargestellt durch Kanten, verbunden sind.¹⁸ Dabei bilden sich entweder vollständige Netzwerke oder Nabe-Speiche-Systeme.¹⁹ Die Intralogistik umfasst „die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschlags in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen.“²⁰

Dem Gedanken der Flussorientierung²¹ folgend lässt sich ein logistisches System²² als eine Verknüpfung von Material-, Informations-, Energie- und Finanzflüssen beschreiben, die einander vorausseilen, sich begleiten oder einander nacheilen können. Der Materialfluss ist die einzige physisch wahrnehmbare Komponente eines logistischen Systems. Er wird

¹³DIN EN 14943 (2006, S. 67). Zum Logistikbegriff siehe PFOHL (2010, S. 3-20).

¹⁴PAWELLEK (2007, S. 31-33) unterteilt die logistische Leistung in eine unternehmensinterne (Werkslogistik) und eine externe Leistung (Wirkung der Leistung aus Kundensicht) und beschreibt letztere durch den erzielten Servicegrad.

¹⁵Vgl. SCHULTE (2005, S. 2). Dieses abstrakte Ziel wird häufig in der Forderung konkretisiert, das richtige Objekt (z. B. Güter, Informationen) zum richtigen Zeitpunkt, in der richtigen Qualität und Menge am richtigen Bedarfsort wirtschaftlich bereitzustellen und verfügbar zu machen. Vgl. JETZKE (2007, S. 11f) sowie JÜNEMANN (1989, S. 18).

¹⁶PFOHL (2010, S. 169 sowie 210-218) erweitert diese Liste um die Ersatzteillogistik, die er von der Beschaffungs- bzw. der Distributionslogistik abgrenzt. An die Stelle der Entsorgungslogistik rückt inzwischen häufig der weiter gefasste Begriff *reverse logistics*, der zusätzliche Tätigkeiten (z. B. Inspektion, Reinigung, Bewertung, Reparatur und Wiederaufbereitung gebrauchter Güter) umfasst. Vgl. DEKKER/ FLEISCHMANN/ INDERFURTH *et al.* (Hrsg.) (2004).

¹⁷Vgl. JÜNEMANN (1989, S. 43) sowie PAWELLEK (2007, S. 13f).

¹⁸Vgl. BOZER (2012, S. XII) sowie HIGGINSON/ BOOKBINDER (2005, S. 67).

¹⁹Vgl. VAHRENKAMP/ MATTFELD (2007, S. 193-204).

²⁰ARNOLD (2006, S. 1) nach VDMA.

²¹Vgl. PFOHL (2010, S. 12f).

²²Vgl. Abschnitt 2.2.

definiert als „Richtung und Weg der Bewegung von Materialien und der Reihenfolge der Bereitstellung dieser Materialien in einer Lieferkette“ im Sinne einer „zielgerichtet[e]n Warenbewegung innerhalb von Raum und Zeit“ und beschreibt „den definierten Warenfluss [...] vom Eingang bis zum Ausgang eines Systems, wobei alle Arbeitsabläufe zum Produzieren, Bearbeiten und Benutzen sowie zum Verteilen der Waren miteinander verbunden werden.“²³ Der Materialfluss lässt sich durch sein räumliches und zeitliches Auftreten, durch die zu seiner Abwicklung eingesetzten Methoden²⁴ sowie durch seine Aufbau- und Ablauforganisation beschreiben.²⁵ Er dient nach ROCKSTROH der materiellen Ver- und Entsorgung von Objekten und findet ablaufbezogen in Form von Transport-, Umschlags-, Handhabungs-, Lager- und Speichervorgängen statt.²⁶

2.2 Systemtechnik und Kybernetik in der Logistik

Eine ganzheitliche Betrachtung der Logistik bedarf der Anwendung systemtechnischer und -theoretischer Prinzipien. Ein System beschreibt eine „Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente, die in einem bestimmten Zusammenhang als Ganzes gesehen und als von ihrer Umgebung abgegrenzt betrachtet werden“²⁷. Charakteristika eines Systems sind seine Zielsetzung, seine Elemente sowie seine Abgrenzung zu anderen Systemen, mit denen es in Verbindung steht.²⁸ Entsprechend ihrer Verknüpfung mit der Systemumwelt lassen sich offene und geschlossene Systeme unterscheiden: Bei offenen Systemen kommt es zu einem Austausch von Materie, Energie oder Information mit der Umgebung, während geschlossene Systeme ihre Erscheinungen zeigen, ohne mit ihrer Umwelt in Wechselwirkung zu stehen.²⁹ Zudem kann zwischen einer internen Beschreibung des Systemverhaltens, d. h. einer Beschreibung in mathematischer Gleichungsform, sowie einer externen, bei der zwar die *input-output*-Transformation bekannt ist, jedoch keine Kenntnis über die internen Systemzusammenhänge besteht, unterschieden werden.³⁰

Systeme können zerlegt werden (Dekomposition), um die Abhängigkeiten der einzelnen Subsysteme untereinander untersuchen und darstellen zu können. Das Zusammenführen der Subsysteme (Aggregation) erlaubt die Betrachtung des Verhaltens des Gesamtsystems

²³DIN EN 14943 (2006, S. 73). Ähnlich DIN 30781-1 (1989, S. 2) sowie ROCKSTROH (1982, S. 143). Im Englischen herrscht die Bezeichnung *material handling* vor, die von MEYERS/ STEPHENS (2000, S. 223-225) als „*art and science involving the moving, packaging, and storing of substances in any form*“ beschrieben wird und auf ein „*integrated system, where everything seems to fit together*“ abzielt. Vgl. auch VASIL/ TANG/ VASIL (2012, S. 160f).

²⁴LORENZ (1995, S. 876) definiert eine Methode als „ein nach Mittel und Zweck planmäßiges Verfahren, das zu technischer Fertigkeit bei der Lösung theoretischer und praktischer Aufgaben führt.“

²⁵Vgl. PAWELLEK (2007, S. 58f).

²⁶Vgl. ROCKSTROH (1982, S. 143-158).

²⁷DIN IEC 60050-351 (2009, S. 11). Ähnlich FORRESTER (1972, S. 9), STACHOWIAK (1973, S. 137f) sowie VON BERTALANFFY (1972, S. 18).

²⁸Vgl. DIN IEC 60050-351 (2009, S. 11f).

²⁹Vgl. HASSENSTEIN (1972, S. 37).

³⁰Vgl. VON BERTALANFFY (1972, S. 26). Im zweiten Fall wird das System als *black box* betrachtet.

bzw. dessen Interaktion mit anderen Systemen.³¹ Diese allgemeine Betrachtung von Systemen ermöglicht die Ableitung einer Systemhierarchie, bei der die Elemente eines Systems wiederum als eigene Systeme betrachtet werden können. So besteht beispielsweise ein Kommissioniersystem aus den Subsystemen Materialfluss, Information und Organisation, die sich ihrerseits wiederum in Subsysteme zerlegen lassen; das Materialflusssystem u. a. in die Subsysteme Bereitstellung, Transport und Entnahme.³² Die Betrachtung über- und untergeordneter Hierarchieebenen geht einher mit der Identifikation einer Hierarchie von Systemzielen.³³

Das in der Systemanalyse angewendete Systemdenken beruht auf dem Versuch, das wahrgenommene ganzheitliche Verhalten eines Systems durch die Eigenschaften seiner Elemente, deren Interaktion sowie seine Umwelteinflüsse zu erklären. Hierzu dient die Untersuchung

- der Systemstruktur, d. h. der Zahl und Art der Systemkomponenten, Teilsysteme und deren Verknüpfungen,
- der Hierarchie der Teilsysteme,
- der Systemattribute, die sowohl Ein- und Ausgangsgrößen als auch Systemzustände beschreiben sowie
- der Systemfunktionen, d. h. die Zuordnungen zwischen Ein- und Ausgangsgrößen eines Systems.³⁴

Im Systemdenken kommen Ansätze der allgemeinen Systemtheorie, d. h. der „Lehre vom Aufbau und der Klassifikation von Systemen“³⁵, zum Einsatz. Die allgemeine Systemtheorie versucht, unter Nutzung allgemeingültiger Grundvorstellungen, Erkenntnisse von einem Wissensgebiet auf andere zu übertragen.³⁶ Entsprechend der bisherigen Überlegungen können logistische Systeme als offene³⁷ Systeme charakterisiert werden, die gemäß

³¹LUNZE (2008, S. 62-68) beschreibt die Analyse der Kopplungen zwischen Teilsystemen.

³²Vgl. VDI 3590-1 (1994, S. 2f).

³³Die Auseinandersetzung mit interagierenden Systemelementen findet z. B. in der Betrachtung von Schwärmen, Bionen, Agenten, Holonen oder Fraktalen statt, wobei insbesondere die mögliche Emergenz im Systemverhalten Beachtung findet. Hierunter wird ein Verhalten des Gesamtsystems verstanden, das sich in Ausprägung oder Ausrichtung nicht aus dem Verhalten der granularen Subsysteme erklären lässt. Beispielhaft für Emergenz ist eine Ameisenkolonie, in der die Interaktion kognitiv und motorisch beschränkter Elemente (Ameisenindividuen) ein stabiles Überleben der ganzen Kolonie ermöglicht.

³⁴Vgl. KOŠTURIK/ GREGOR (1995, S. 10), PFOHL (2010, S. 25-27) sowie WIENDAHL (2010, S. 8).

³⁵ULRICH (2001, S. 244).

³⁶Vgl. BOULDING (1975, S. 16-20) sowie ähnlich NIEMEYER (1977, S. 1). Als pragmatische Richtungen der allgemeinen Systemtheorie gelten die Systemanalyse und Systemgestaltung bzw. im engeren Sinne das Systems Engineering sowie die Steuerungs- und Regelungstechnik.

³⁷Geschlossene Logistiksysteme bestehen nur in wenigen, idealisierten Fällen, z. B. für innerbetriebliche Behältersysteme bei Nichtbeachtung von Beschaffung, Austausch und Entsorgung.

ihrer Zielsetzung Güter, Informationen, Energie und Finanzmittel mit ihrer Umgebung austauschen.³⁸

HASELOFF weist darauf hin, dass offene Systeme zur Sicherung ihrer Lebensfähigkeit auf den Austausch mit ihrer Umgebung angewiesen sind, ihre Umgebung also aktiv verändern müssen. Weist das System kein ausreichendes Potential zur Veränderung seiner Umwelt auf, so muss das System in dem Maße, in dem es nicht fähig ist, seine Umwelt zu verändern, seine Struktur und/ oder seine internen Funktionsabläufe verändern, um einen stabilen Zustand (Homeostase) zu erreichen – was zwangsläufig zu laufenden Anpassungen führt.³⁹ ULRICH betont in diesem Zusammenhang, „dass wir das Funktionieren eines offenen Systems nicht verstehen können ohne Erfassung des Supersystems, in das es eingebettet ist.“⁴⁰

Während bei statischen Systemen der Wert der Ausgabegröße lediglich durch den Wert der Eingabegröße bestimmt wird, hängt bei dynamischen Systemen der Wert der Ausgabegröße vom Verlauf der Eingabegröße ab.⁴¹ Die Untersuchung dynamischer Systeme ist Betrachtungsgegenstand der Kybernetik, einem Teil der allgemeinen Systemtheorie, die ULRICH als die „Lehre von der Struktur und vom Verhalten dynamischer Systeme“⁴² beschreibt.⁴³ Sie erforscht nach PAWELLEK die Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten komplexer Systeme, so dass diese zielgerecht gesteuert oder autonom geregelt werden können.⁴⁴ Aufgrund der inhärenten Nichtlinearität und Dynamik komplexer⁴⁵ Systeme können diese ihr Verhalten im Zeitverlauf ändern und somit auf gleiche Eingabegrößen mit unterschiedlichen Ergebnissen reagieren. Die Untersuchung und Planung komplexer Systeme bedarf daher der Nutzung geeigneter Prinzipien und Methoden.

Die Logistik ist als Teilgebiet der Kybernetik zu sehen, denn es gilt, ein komplexes System aus Einzelkomponenten zielgerichtet zu steuern. Deren Interaktionen sind häufig

³⁸Eine Kategorisierung von Logistiksystemen bietet PFOHL (2010, S. 14-20). Für weitere Ausführungen zum Systemdenken in der Logistik und im Materialfluss sei auf APPLE (1977, S. 276-317), BUSCHER (2003, S. 7-11) sowie PFOHL (2010, S. 25-29) verwiesen.

³⁹Vgl. HASELOFF (1972, S. 57f) sowie NIEMEYER (1977, S. 6f).

⁴⁰ULRICH (2001, S. 28).

⁴¹Vgl. LUNZE (2008, S. 48f).

⁴²ULRICH (2001, S. 244). Eine ähnliche Auffassung wird in DIN IEC 60050-351 (2009, S. 21) vertreten, wonach Kybernetik der „Zweig der Wissenschaft, der Theorie und Untersuchungen über Kommunikations- und Leitsysteme in lebenden Organismen und in Maschinen vereinigt“, ist.

⁴³Ganzheitliche wissenschaftliche Betrachtungen von Systemen, ihren Elementen und ihrem Verhalten lassen sich bis in die 1920er Jahre zurückverfolgen. Als Wegbereiter der Systemtheorie, der Kybernetik und des systemischen Denkens gelten unter anderem CLERK MAXWELL, ALEXANDER MICHAJLOWITSCH LJAPUNOW, LUDWIG VON BERTALANFFY, WILLIAM ROSS ASHBY und NORBERT WIENER. Eine Übersicht über die Geschichte der Systemtheorie bietet VON BERTALANFFY (1972).

⁴⁴Vgl. PAWELLEK (2007, S. 112f).

⁴⁵ULRICH (2001, S. 316) definiert Komplexität als „Eigenschaft eines Systems [...], in einer gegebenen Zeitspanne eine sehr grosse Zahl unterschiedlicher Zustände annehmen zu können. Komplexität ist das Produkt der Kompliziertheit des Aufbaus eines Systems – es besteht aus vielen Elementen und Beziehungen – und der Dynamik, d. h. der Veränderlichkeit der Elemente und Wirkungsbeziehungen im Zeitablauf.“ PETERS/ SEIDEL/ LÄMMER *et al.* (2008, S. 120-127) bieten eine Diskussion der Ursachen und Effekte von Komplexität in logistischen Systemen.

von mangelnder Transparenz gekennzeichnet, was zu nicht-deterministischem Systemverhalten führen kann.⁴⁶ Aus diesen Überlegungen erwächst die Notwendigkeit adäquater Methoden für die Analyse und Gestaltung logistischer Systeme. Die systemtechnischen Grundlagen werden im Folgenden auf Lagersysteme übertragen.

2.3 Aufgaben von Lagersystemen

Ein Lager bezeichnet einen „Raum oder eine Fläche zum Aufbewahren von Stück- und/oder Schüttgut, das mengen- und/oder wertmäßig erfaßt wird“⁴⁷. Nach VAN DEN BERG/ ZIJM zählt das Lager neben dem Wareneingang, der Kommissionierung, der Konsolidierung/ Sortierung sowie dem Versand zu den Funktionsbereichen eines Distributionszentrums.⁴⁸ Nach WANNENWETSCH umfasst ein Lager „die Gesamtheit der zur Ausführung der Lagerfunktionen eingesetzten Fördermittel einschließlich der Lagertechnik und Informationsmittel“⁴⁹. Je nach Positionierung innerhalb eines Logistiknetzes unterscheiden ROODBERGEN sowie VAN DEN BERG/ ZIJM drei Arten von Lagern:⁵⁰ (1) In Distributionslagern werden Artikel verschiedener Lieferanten gesammelt und dann an die Kunden geliefert. (2) Produktionslager dienen der Lagerung von Rohmaterialien, Halbzeugen und Fertigwaren in einem Produktionssystem. (3) In Kontraktlagern werden im Namen von einem oder mehreren Kunden Waren gelagert.

Obwohl etablierte Strategien, wie z. B. *just in time* oder *cross docking*⁵¹, auf eine Reduzierung der Lagerungen entlang einer Lieferkette abzielen, können Lagerungen dennoch unerlässlich zur Erfüllung der nachfolgenden Aufgaben sein. Dabei sind jedoch die entstehenden Bestands- und Lagerungskosten gegen die realisierten Vorteile aufzurechnen:⁵²

Versorgungs- und Liefersicherheit: Ein logistisches Netz kann verschiedenen Risiken ausgesetzt sein, z. B. in Form der Insolvenz von Schlüssellieferanten. Daher werden Lager als geplante Puffer zur Reduzierung dieser Risiken installiert. In der Distributionslogistik dienen Bestände, v. a. der Sicherheitsbestand, dazu, eine hohe Lieferbereitschaft zu gewährleisten und Fehlmengenkosten, d. h. Kosten, die durch

⁴⁶Vgl. PAWELLEK (2007, S. 24). Ähnlich RAUCH (1997, S. 5-8).

⁴⁷JÜNEMANN (1989, S. 143). Ähnlich DIN EN 14943 (2006, S. 121) sowie DIN EN 62264-1 (2014, S. 13).

⁴⁸Vgl. VAN DEN BERG/ ZIJM (1999, S. 520f) sowie ähnlich ROUWENHORST/ REUTER/ STOCKRAHM *et al.* (2000, S. 516-522).

⁴⁹WANNENWETSCH (2010, S. 319).

⁵⁰Vgl. ROODBERGEN (2001, S. 4) sowie VAN DEN BERG/ ZIJM (1999, S. 520). Andere Einteilungsmöglichkeiten finden sich beispielsweise in JÜNEMANN (1989, S. 143f) sowie SCHULTE (2005, S. 222).

⁵¹„*Cross-Docking means to avoid placing materials or suppliers in storage by processing them as they are received [...]. In a distributions center, labeled and presorted loads arrive at the shipping dock for immediate rerouting, thereby avoiding formal receiving, stocking/sorting, and order-selection activities.*“ HEIZER/ RENDER (2011, S. 382). Ähnlich DE KOSTER/ LE-DUC/ ROODBERGEN (2007, S. 483), HAUSLADEN (2014, S. 164-167) sowie TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 69).

⁵²Vgl. BAKER/ CANESSA (2009, S. 425), FISCHER/ DITTRICH (2004, S. 131), PFOHL (2010, S. 87-89), TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 3-5) sowie WANNENWETSCH (2010, S. 35f und 307-309).

eine fehlende Lieferbereitschaft entstehen, zu minimieren.

Erzielung von Skaleneffekten: Sowohl bei ein- und ausgehenden Waren als auch bei der Durchführung lagerinterner Prozesse können durch sinkende Grenzkosten Mengeneffekte auftreten, wie z. B. durch Mengenrabatte bei Bestellungen. Lager dienen in diesem Fall dazu, die für Skaleneffekte notwendigen Mengen bereitzustellen oder im Anschluss zu puffern.

Erbringung zusätzlicher Wertschöpfung: Lager bieten die Möglichkeit, an eingehenden Waren *value added services* durchzuführen. Hierzu zählen beispielsweise Etikettierungen, (Vor-)Montageschritte oder die Bearbeitung von Rückläufer-Produkten. Diese zusätzlichen Prozessschritte sind integraler Bestandteil von *supply chain*-Strategien, wie z. B. dem *postponement* oder dem *channel assembly*.⁵³

Ausgleich von Bedarfs- und Liefermengen: Existieren Diskrepanzen zwischen ein- und ausgehenden Materialflüssen eines Logistiknetzes, so dienen Lager als Zeit- und Mengepuffer. Ein Beispiel hierfür sind Saisonartikel, deren Produktionszeitraum den Verkaufszeitraum übersteigt. Der Ausgleich von Bedarfs- und Liefermengen kann mit der Erzielung von Skaleneffekten (s. o.) verknüpft sein.

Veredelung: Hierbei wird Lagerung als eigenständiger Prozessschritt, als Produktivlagerung, verstanden, um eine Wertsteigerung an den gelagerten Waren zu erzielen, z. B. zur Reifung von Wein oder Käse.

Spekulation: Werden Preiserhöhungen auf den Beschaffungs- oder Absatzmärkten erwartet, so kann die Lagerung monetäre Vorteile ermöglichen.

Auf Basis der logistischen Ziele und der spezifischen Anforderung an das Lager wird eine leistungsfähige Prozessstruktur und Ressourcenkonfiguration⁵⁴ aufgebaut. Dabei liegt nach VAN DEN BERG/ ZIJM in der Distributionslogistik der Trend vor, dass viele kleine Lager durch wenige große ersetzt werden, die oftmals ganze Kontinente beliefern.⁵⁵

2.4 Elemente automatischer Hochregallager

Nach GUDEHUS besteht ein Lager aus sieben funktionspezifischen Lagergewerken: (1) Den Lagereinheiten und Ladungsträgern, (2) den Lagerplätzen und Regalen, (3) den

⁵³Vgl. HEIZER/ RENDER (2011, S. 287 und 462f). Bei beiden Strategien wird versucht, kundenspezifische Produktanpassungen von den Produktions- in die Distributionseinrichtungen zu verlagern.

⁵⁴Unter Ressourcen werden gemäß DIN SPEC 1001 (2010, S. 6) „Mittel, die notwendig sind um einzelne Vorgänge durchzuführen“, verstanden. Ähnlich DIN EN 14943 (2006, S. 105) sowie DIN EN 62264-1 (2014, S. 12).

⁵⁵Vgl. VAN DEN BERG/ ZIJM (1999, S. 519). Ähnlich DE KOSTER/ LE-DUC/ ROODBERGEN (2007, S. 481). Einzeluntersuchungen, wie etwa von GRAF (2009), können keine Skaleneffekte durch die Zentralisation von Lagersystemen nachweisen.

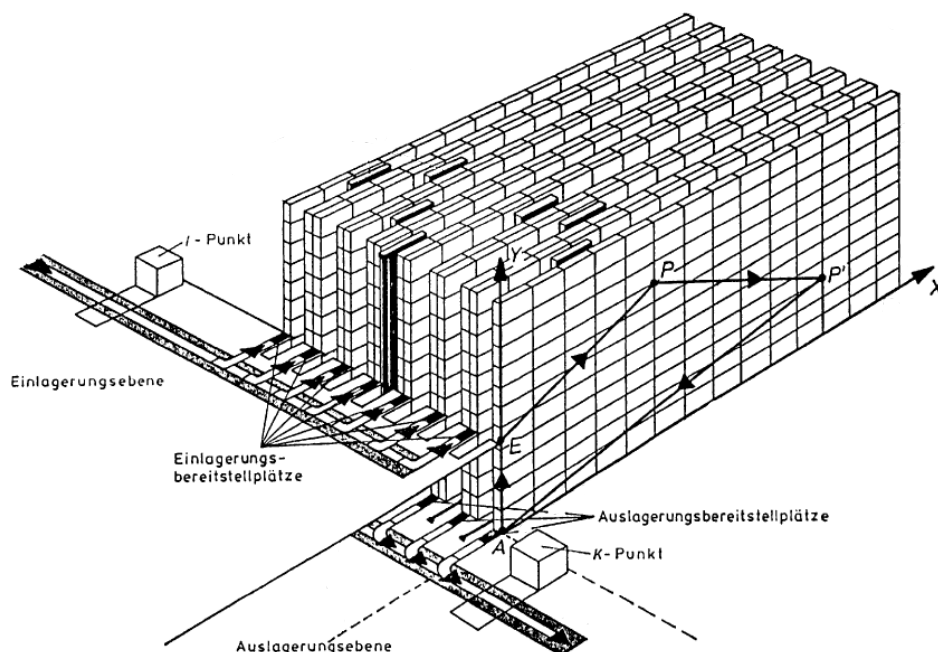


Abbildung 2.1: Aufbau eines aHRL nach GUDEHUS (2010)

Lagergeräten mit den Lastaufnahmemitteln, (4) dem Zu- und Abfördersystem, (5) der Lagersteuerung und -verwaltung, (6) dem Warenein- und -ausgang sowie (7) dem Lagerbau.⁵⁶ In ihrer Kombination bestimmen diese Subsysteme die Struktur und das Verhalten eines Lagers.⁵⁷ Im Rahmen dieser Arbeit werden aHRL betrachtet, die aus automatischen RBG⁵⁸ und Regalen zur Lagerung von palettierter Ware bestehen (siehe Abbildung 2.1⁵⁹).⁶⁰ Nachfolgend werden die für diese Arbeit relevanten Lagergewerke 1-5 von aHRL vorgestellt.

2.4.1 Ladeinheit

2.4.1.1 Begriffe und Beschreibung von Paletten

Die Gesamtmenge der Artikel, die von einem Unternehmen an die Kunden geliefert werden kann, wird als Sortiment bezeichnet.⁶¹ Ein Artikel ist die durch Nummer und Bezeichnung unterscheidbare,

⁵⁶Vgl. GUDEHUS (2010, S. 585f). Ähnlich WANNENWETSCH (2007, S. 269).

⁵⁷Vgl. GOETSCHALCKX (2012, S. 31).

⁵⁸Engl. *storage and retrieval machine* oder *stacker crane*. Soweit nicht anders angegeben, entstammen die folgenden englischen Übersetzungen FEM 9.001 (1997) bzw. FEM 9.101 (1997).

⁵⁹Bildquelle: GUDEHUS (2010, S. 572).

⁶⁰Im Englischen wird ein mehrgassiges aHRL als *multi-aisle automated storage/retrieval system (AS/RS)* bezeichnet. Vgl. VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000, S. 1339). Einteilungen von AS/RS finden sich in ROODBERGEN/ VIS (2009, S. 345) sowie in VASILII/ TANG/ VASILII (2012, S. 164-166). Eine Alternative zu RBG ist die Verwendung von automatischen Regalfahrzeugen und Aufzügen, die als *shuttle-Regallager* bezeichnet werden. Im Englischen wird ein *shuttle-Regallager* als *multi-aisle autonomous vehicle storage/retrieval system (AVS/RS)* bezeichnet.

⁶¹Vgl. TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 65).

kleinste Einheit des Sortiments. Die kleinste Verkaufseinheit eines Artikels ist die Artikel-einheit.⁶² Die Handhabungseinheit in Lagerprozessen ist die Lagereinheit.⁶³ Im Bereich von Stückgütern⁶⁴ wird das Ziel formuliert, Ladeeinheiten (LE) zu bilden.⁶⁵ Eine LE ist definiert als „Ladung, die [...] so zusammengefasst ist, dass sie als Einheit gehandhabt, transportiert, gestapelt und gelagert werden kann“⁶⁶. Das Konzept der LE integriert somit die Subkonzepte der Handhabungs-, Transport-, Stapel- und Lagereinheit. LE umfassen die entsprechenden Güter, ggf. Ladehilfsmittel/ Ladungsträger⁶⁷ sowie ggf. passende LE-Sicherungsmittel^{68, 69}. Werden die Artikel in Form von LE mit gleichen geometrischen Kontaktflächen zum Lagermittel und zu den Fördermitteln gelagert, so kann das Lager als Einheitenlager⁷⁰ bezeichnet werden.⁷¹ Gängige Ausführungen von LE sind nach DIN EN 15878 Pakete, Paletten sowie Behälter⁷², wobei diese Arbeit nur aHRL zur Lagerung von palettierter Ware behandelt. Nachfolgend wird anstelle des Begriffs Lagereinheit nur noch der Begriff LE verwendet.

Eine Palette ist eine „steife horizontale Plattform mit minimaler Höhe, die mit Gabelstaplern und/oder Gabelhubwagen sowie anderem geeignetem Gerät gehandhabt“ und „mit einem Aufbau konstruiert oder ausgerüstet sein“ kann.⁷³ Bei einer Palette handelt es sich um ein tragendes Ladehilfsmittel, das zusammen mit den auf der Palette angeordneten Waren eine LE bildet.⁷⁴ Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Palettentypen sind die in Distributionssystemen verbreiteten Flachpaletten, d. h. Paletten mit einem Oberdeck ohne Aufbauten (siehe Abbildung 2.2⁷⁵).⁷⁶ Dabei kommen Ein-⁷⁷ oder Doppeldeckpa-

⁶²Vgl. TEN HOMPEL (Hrsg.)/ HEIDENBLUT (2011, S. 14).

⁶³Vgl. TEN HOMPEL (Hrsg.)/ HEIDENBLUT (2011, S. 169).

⁶⁴Ein Stückgut ist nach DIN 30781-1 (1989, S. 2) ein „individualisiertes Gut, das stückweise gehandhabt wird und stückweise in die Transportinformation eingeht“. Ähnlich DIN SPEC 1001 (2010, S. 10). Stückgüter werden gegenüber Schüttgütern, die während der Bewegungsprozesse ihre Gestalt ändern, Gasen und Flüssigkeiten abgegrenzt. Vgl. PFOHL (2010, S. 124).

⁶⁵Vgl. GOETSCHALCKX (2012, S. 33).

⁶⁶DIN 55510-2 (2005, S. 5). Ähnlich DIN 30781-1 (1989, S. 2), GOETSCHALCKX (2012, S. 33), RÖPER (1963, S. 5) sowie TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2011, S. 21).

⁶⁷Es lassen sich tragende, umschließende und abschließende Ladehilfsmittel unterscheiden. Vgl. TEN HOMPEL (Hrsg.)/ HEIDENBLUT (2011, S. 165). Nach TEN HOMPEL (Hrsg.)/ HEIDENBLUT (2011, S. 169) werden die Begriffe Ladehilfsmittel und Ladungsträger häufig synonym verwendet. Streng genommen ist der Begriff Ladungsträger jedoch enger gefasst und beschreibt lediglich ein tragendes Ladehilfsmittel.

⁶⁸Hierzu gehören beispielsweise Schrumpffolien, Stretchfolien oder Umreifungen. Vgl. WEHKING/ MAREN-BACH/ SOMMER (2010, S. 44 und 48).

⁶⁹Vgl. GUDEHUS (2010, S. 586).

⁷⁰Engl. *unit load system*.

⁷¹Vgl. GOETSCHALCKX (2012, S. 33). Im Beitrag werden Vor- und Nachteile von Einheitenlagern diskutiert.

⁷²Vgl. DIN EN 15878 (2009, S. 18). Ähnlich GOETSCHALCKX (2012, S. 33) sowie GUDEHUS (2010, S. 419 sowie 586).

⁷³DIN EN ISO 445 (2010, S. 4). Ähnlich SULE (1994, S. 278) sowie VDI 2415 (2009, S. 2).

⁷⁴Vgl. DIN EN 15878 (2009, S. 10).

⁷⁵Bildquelle: DIN EN ISO 445 (2010, S. 5).

⁷⁶Vgl. DIN EN ISO 445 (2010, S. 7).

⁷⁷Eindeckpaletten sind Flachpaletten, deren untere Auflagefläche den in ISO 6780 festgelegten Prozentsatz unterschreitet.

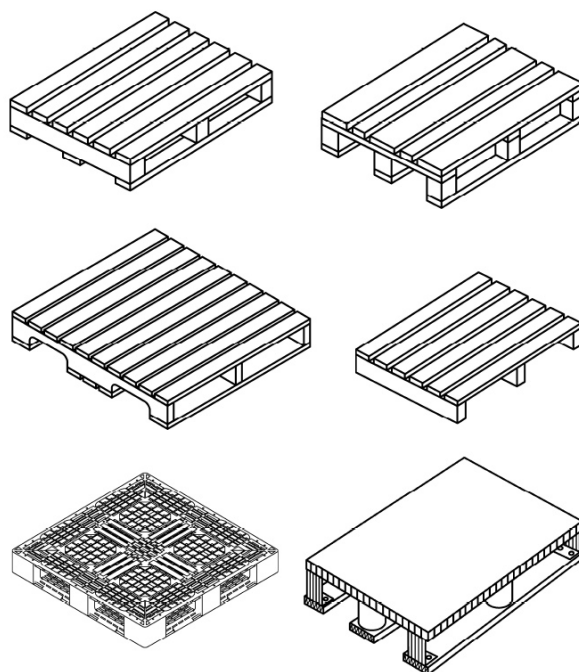


Abbildung 2.2: Beispiele von Paletten nach DIN EN ISO 445 (2010)

letten⁷⁸ zum Einsatz. Doppeldeckpaletten können in umkehrbare und nicht-umkehrbare Paletten untergliedert werden: Während bei ersteren Ober- und Bodendeck die gleiche Auflast aufnehmen können, kann bei letzteren nur das Oberdeck die Ladung aufnehmen. Flachpaletten können zwei gegenüberliegende Einfahröffnungen (Zweiwegepalette) oder vier Einfahröffnungen (Vierwegepalette) aufweisen.⁷⁹ Im europäischen Transportverkehr ist vor allem die nach DIN EN 13698-1 standardisierte Flachpalette stark verbreitet. Bei dieser so genannten „Europoolpalette“ handelt es sich um eine Vierwegepalette aus Holz mit den Dimensionen 1.200 mm × 800 mm × 144 mm und einer Tragfähigkeit von 1.500 kg⁸⁰, die im Tauschsystem des Europool zirkulieren kann.⁸¹

2.4.1.2 Verweildauer von Artikeln und Ladeeinheiten Die Verweildauer⁸² gibt die Zeitspanne vom Eintreffen der LE am Identifikationspunkt der Lagervorzone⁸³ bis zum

⁷⁸Doppeldeckpaletten sind Flachpaletten mit einem Oberdeck und einem Bodendeck.

⁷⁹Weitere Merkmale von Flachpaletten sind die Art der Einfahröffnung, die Palettsymmetrie sowie eventuelle Rücksprünge (überstehendes Ober- oder Bodendeck). Vgl. DIN EN ISO 445 (2010, S. 7-18).

⁸⁰Bei einer gleichförmig verteilten Last. Vgl. DIN EN 13698-1 (2004, S. 5).

⁸¹Vgl. DIN EN 13698-1 (2004). Das Nennmaß 1.200 mm × 800 mm ergibt sich aus dem in ISO 3394 definierten Flächenmodul M mit den Abmessungen 600 mm × 400 mm. Durch Kombination des ISO-Moduls ergeben sich die Palettennennmaße 800 mm × 600 mm (z. B. „Düsseldorfer Palette“, $2M$), 1.200 mm × 1.000 mm (z. B. „Industriepalette“, $5M$) sowie 1.200 mm × 1.200 mm ($6M$). Vgl. DIN EN 13382 (2003, S. 5). Zum Zwecke der „modularen Koordination“ in Distributionssystemen wird in DIN 55510-1 (2005, S. 11) die Verwendung von Transportverpackungen propagiert, „die sich in den genormten Flächenmodul 600 mm × 400 mm oder in einen Teiler (von 600 mm × 400 mm hinunter zu 100 mm × 150 mm) einfügen.“

⁸²Engl. *duration of stay*.

⁸³Vgl. Abschnitt 2.4.4.

geplanten Auslagerungszeitpunkt wieder. Tabelle 2.1 illustriert diese Zusammenhänge exemplarisch.

Nr. der LE	Ankunftszeitpunkt	Auslagerungszeitpunkt	Verweildauer
1	1	2	1
2	1	3	2
3	1	4	3
4	1	5	4
5	1	6	5

Tabelle 2.1: Verweildauer von LE

Die mittlere Verweildauer eines Artikels ist nicht zwangsläufig identisch mit der Verweildauer einzelner LE des Artikels. Die Diskrepanzen ergeben sich aus der Anwendung von Bestellpolitiken, die zu unterschiedlichen Mengen bei Zu- und Abgängen von LE eines Artikels führen: Unter der Prämisse optimaler Bestellmengen wird eine definierte Menge eines Artikels beim Lieferanten bestellt, aber vom Kunden ggf. in einer anderen Mengen nachgefragt.⁸⁴ In Tabelle 2.1 weist das eingehende Los des Artikels eine mittlere Verweildauer des Artikels in Höhe von $\frac{(1+2+3+4+5)}{5} = 3$ Tagen auf, während die individuelle Verweildauer der LE heterogen verteilt zwischen einem und fünf Tagen liegt.⁸⁵

Nach BRANDES lässt sich die mittlere Verweildauer \bar{t}_{VW} [Zeiteinheit] eines Artikels mit Formel 2.1 aus dem mittleren Bestand n [LE] und dem mittleren Durchsatz λ [$\frac{\text{LE}}{\text{Zeiteinheit}}$] bestimmen:⁸⁶

$$\bar{t}_{VW} = \frac{n}{\lambda} \quad (2.1)$$

Der Durchsatz entspricht der Nachfrage pro Periode und wird auch als Zugriffshäufigkeit des Artikels bezeichnet.⁸⁷

In der englischsprachigen Literatur herrscht die Bezeichnung *cube per order index* (*coi*) nach HESKETT vor. Er wird von HESKETT als der Quotient aus dem von einem Artikel beanspruchten Lagervolumen n_{LP} und der Zugriffshäufigkeit des Artikels λ beschrieben und wird in Formel 2.2 erläutert:⁸⁸

⁸⁴Vgl. GLASS (2008, S. 15-19 und 52-54), GOETSCHALCKX (2012, S. 47f), GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990, S. 1122-1124) sowie HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 631).

⁸⁵Eine Mehrzonenstrategie zur LP-Zuordnung (vgl. Abschnitt 3.3.5.2.3) auf Basis der Verweildauer des Artikels würde alle fünf LE in der gleichen Zone anordnen, während eine Strategie auf Basis der LE-Verweildauer die fünf LE evtl. in verschiedenen Zonen anordnen würde.

⁸⁶Vgl. BRANDES (1997, S. 89) nach LINN/ WYSK (1987, S. 70). Diese Formel ist auch als „Gesetz von LITTLE“ bekannt. Vgl. ARNOLD/ FURMANS (2007, S. 122).

⁸⁷Vgl. TEN HOMPEL (Hrsg.)/ HEIDENBLUT (2011, S. 353).

⁸⁸Vgl. KALLINA/ LYNN (1976, S. 42), MALMBORG (1995, S. 465) sowie MALMBORG/ KRISHNAKUMAR (1990, S. 87). Da die Originalpublikationen von HESKETT aus den Jahren 1963 und 1964 auch in internationalen Bibliotheksverbänden nicht mehr verfügbar sind, muss Sekundärliteratur als Informationsquelle verwendet werden. Auf diesen Umstand weisen bereits KALLINA/ LYNN (1976, S. 37) sowie später auch

$$coi = \frac{n_{LP}}{\lambda} \quad (2.2)$$

Die Bedeutung der Verweildauer von LE zur Maximierung des Umschlags⁸⁹ von aHRL wird von PIEPENBURG/ BRUNS nachgewiesen.⁹⁰ Allerdings hängt die Verwendbarkeit der Verweildauer stark von der Vorhersagbarkeit der Kundenaufträge, der Diskrepanz zwischen Ein- und Auslagerungen und der Bestandspolitik ab.⁹¹ Die Verweildauer der LE eines *push*-Bestands ist häufig bereits zum Zeitpunkt der Einlagerung bekannt oder absehbar. Die Lagerdauer der einzelnen LE eines *pull*-Bestands ist zum Zeitpunkt der Einlagerung jedoch nicht bekannt.⁹² BRANDES und GLASS stellen daher Ansätze zur Prognose der Verweildauer von LE vor.⁹³

Der reziproke Wert der mittleren Verweildauer eines Artikels ist die Umschlaghäufigkeit f $\left[\frac{1}{\text{Zeiteinheit}}\right]$ eines Artikels, die in Formel 2.3 aus dem mittleren Durchsatz λ $\left[\frac{\text{LE}}{\text{Zeiteinheit}}\right]$ und dem dem mittleren Bestand n [LE] spezifiziert wird:⁹⁴

$$f = \frac{\lambda}{n} \quad (2.3)$$

Ein Lager ist balanciert, wenn in jeder Periode die Anzahl eingehender LE der Anzahl ausgehender LE entspricht. Ein Lager ist perfekt balanciert, wenn in jeder Periode die Anzahl eingehender LE mit einer bestimmten Verweildauer gleich der Anzahl ausgehender LE mit der gleichen Verweildauer entspricht.⁹⁵

2.4.2 Palettenregal

Als Lagermittel werden Palettenregale behandelt, d. h. „Gerüstrahmen [...] zur Ablage einer Reihe von einzelnen Palettenladungen“⁹⁶. Der Gerüstrahmen setzt sich aus vertikalen Regalstützen⁹⁷ und horizontalen Regaltraversen bzw. winkelförmigen Auflagen zusammen, wobei Verstrebungen zur Stabilisierung der Konstruktion eingebracht werden können. Die LE wird dabei meist nur auf den beiden Stirnseiten gestützt.

GLASS (2008, S. 40) hin.

⁸⁹Vgl. die Ausführungen in Abschnitt 3.2 zum Umschlag in aHRL.

⁹⁰Vgl. PIEPENBURG/ BRUNS (2011, S. 148f).

⁹¹Vgl. GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990, S. 1127-1129).

⁹²Vgl. GUDEHUS (2010, S. 571).

⁹³Vgl. BRANDES (1997, S. 103-105) sowie GLASS (2005, S. 95-113).

⁹⁴Vgl. TEN HOMPEL (Hrsg.)/ HEIDENBLUT (2011, S. 319). Hierbei ist zu beachten, dass unterschiedliche Strategien für den Sicherheitsbestand und den allgemein durchlaufenden Bestand verwendet werden können. Daher kann die Formel umgestaltet werden zu *Umschlaghäufigkeit* = $\frac{\text{Nachfrage pro Periode}}{\text{Sicherheitsbestand+durchlaufender Bestand}}$.

⁹⁵Vgl. GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990, S. 1122) sowie GOETSCHALCKX (2012, S. 47-49).

⁹⁶DIN EN 14943 (2006, S. 86).

⁹⁷Regalstützen werden auch als Regalpfiler, -ständer oder -wange bezeichnet.

Ein Regal lässt sich folgendermaßen untergliedern.⁹⁸ Ein LP⁹⁹ bildet das Grundmodul eines Regals. Er setzt sich aus der LE und Zuschlägen für mögliche Überstände zusammen, die sich aus dem verwendeten Ladungsträger und dem verwendeten Stapelverfahren ergeben. Erfüllt ein LP die *factoring condition*, so sind die Kosten zur Ein- und Auslagerung einer LE in den LP unabhängig von der jeweiligen LE.¹⁰⁰ Um eine elektronische LP-Verwaltung zu ermöglichen, wird jeder LP mit einer eindeutigen Bezeichnung versehen (z. B. Koordinaten). Benachbarte LP können zu einem Regalfach¹⁰¹ zusammengefasst sein, das in der horizontalen Dimension jeweils von zwei Regalstützen und in der Höhe durch angrenzende Lastauflageebenen begrenzt wird. Besteht von der Zugriffsseite des Regalfachs Zugriff auf die Stirnseite der LE, liegt eine Längseinlagerung¹⁰² vor; bei Zugriff auf die Längsseite liegt eine Quereinlagerung vor (siehe Abbildung 2.3¹⁰³). Bei einer Längseinlagerung werden die LE durch horizontale Traversen abgestützt¹⁰⁴, so dass mehrere LP zu einem Regalfach zusammengefasst werden können und weniger Regalstützen benötigt werden. Dadurch ermöglicht die Längseinlagerung bei Regalen einen besseren Raumnutzungsgrad als die Quereinlagerung.¹⁰⁵ Befinden sich in einem Regalfach mehrere LP hintereinander, so liegt eine mehrfachtiefe Lagerung vor. Diese ermöglicht einen höheren Raumnutzungsgrad und kann somit vorteilhaft sein, wenn nur eine geringe Ein- und Auslagerungsleistung benötigt wird. Eine vertikale Stapelung von LE in einem Regalfach findet bei aHRL nicht statt.¹⁰⁶ Durch die Mehrfachanordnung von Regalfächern in vertikaler Richtung (y-Koordinate, siehe Abbildung 2.1) sowie horizontal entlang der Zugriffsseite (x-Richtung) wird eine Regalwand¹⁰⁷ gebildet.¹⁰⁸ Berücksichtigt man noch zusätzliche Anfahrmaße des RBG für dessen horizontale und vertikale Bewegung an einer

⁹⁸Vgl. DIN EN 15878 (2009, S. 19), TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 77f) sowie TEN HOMPEL/ SCHMIDT/ NAGEL (2007, S. 64-67).

⁹⁹Engl. *storage location* oder *pallet opening*.

¹⁰⁰Vgl. GOETSCHALCKX (2012, S. 37).

¹⁰¹Ein Regalfach wird auch als Fachmodul bezeichnet.

¹⁰²Der Begriff Längseinlagerung bezieht sich auf die Ausrichtung der LE zur Tiefe des Regalfachs.

¹⁰³Bildquelle: TEN HOMPEL/ SCHMIDT/ NAGEL (2007, S. 66). Die Bildunterschrift in der Quelle suggeriert eine Quereinlagerung in der linken Bildhälfte und eine Längseinlagerung in der rechten Bildhälfte, wobei sich im Text keine Erläuterung dazu findet. Dies widerspricht jedoch den Definitionen von Längs- und Quereinlagerung in TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 78f) sowie in TEN HOMPEL (Hrsg.)/ HEIDENBLUT (2011, S. 176: „Längseinlagerung ... bezeichnet die Lagerung einer Palette im Regal mit der Schmalseite zum Gang“), die in dieser Arbeit Verwendung finden. Dass die Verwendung beider Begriffe in der Literatur nicht einheitlich ist, verdeutlicht GUDEHUS (2010, S. 588), der die Längslagerung als „[d]ie Ladeeinheiten stehen mit der Längskante $l_{LE} > b_{LE}$ parallel zum Gang“ und die Querlagerung mit „[d]ie Ladeeinheiten stehen mit der Längskante $l_{LE} > b_{LE}$ senkrecht zum Gang“ beschreibt.

¹⁰⁴Bei der Quereinlagerung werden die LE nicht auf Traversen zwischen zwei vorderen Regalstützen platziert, sondern auf Winkelaufgaben zwischen einer vorderen und hinteren Regalstütze gestellt.

¹⁰⁵Vgl. TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 77f). Die Quereinlagerung bietet bei manueller Entnahme Vorteile, da der menschliche Greifradius (ca. 950 mm) Zugriff auf die ganze Palette ermöglicht.

¹⁰⁶Gründe hierfür sind der schwierige automatisierte Zugriff auf LE mit heterogener Höhe, der aufgehobene Einzelzugriff sowie Gefahren durch instabile LE.

¹⁰⁷Eine Regalwand wird von GUDEHUS (2010, S. 577) als Regalscheibe bezeichnet.

¹⁰⁸Zur Festlegung der Koordinatenachsen in Hochregallagern siehe VDI 2690-1 (1994, S. 5).

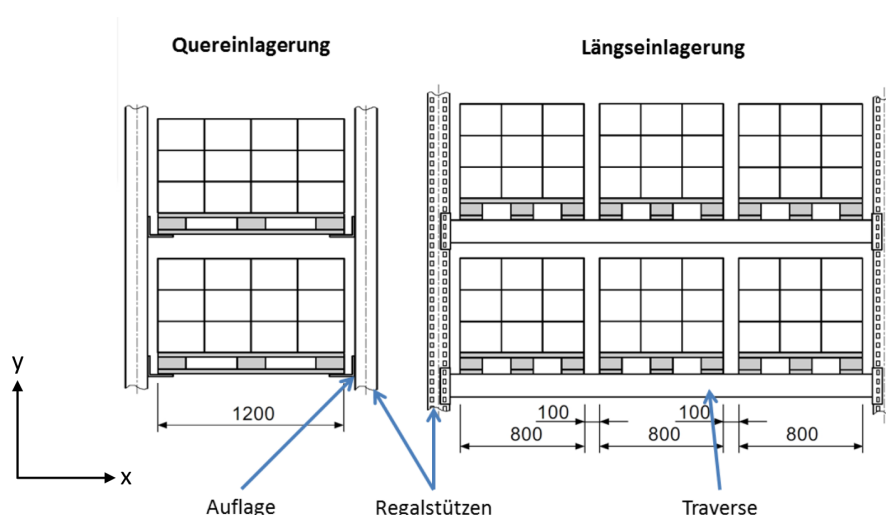


Abbildung 2.3: Quer- und Längseinlagerung nach TEN HOMPEL/ SCHMIDT/ NAGEL (2007)

Regalwand entsteht ein Gangmodul. Zwei Gangmodule bilden zusammen mit dem zugehörigen Bewegungsraum des RBG eine Gasse. Durch Mehrfachanordnung von Gassen in z-Richtung entsteht ein Lagermodul.

Ein Hochregal liegt dann vor, wenn die Höhe der Regalstützen 12 m überschreitet.¹⁰⁹ Wenn die Hochregale, Dachelemente und Wandregale eine einheitliche Struktur bilden, kann das System aus Hochregalen als Hochregallager bezeichnet werden.¹¹⁰

2.4.3 Regalbediengerät

Ein RBG wird in DIN EN 14943 als „Fördereinrichtung zur Lagerung und Auslagerung von Einheitsladungen auf bzw. aus Reihenregale(n)“¹¹¹ beschrieben. Nach LEE/ KIM hängt die Konfiguration des RBG von den physischen Eigenschaften (Größe, Form, Masse), den Beständen und den Umschlaghäufigkeiten der LE ab.¹¹² Abbildung 2.4¹¹³ illustriert die wesentlichen Bestandteile eines RBG: Die horizontale Fahrbewegung (x-Richtung) eines RBG wird durch angetriebene Räder realisiert, die den Mast entlang der oberen Führungs- und der unteren Fahrschiene bewegt.¹¹⁴ Die Räder sind aus Stahlguss mit zylindrischer, balliger oder konischer Lauffläche ausgeführt und je nach Führungsaufgabe

¹⁰⁹Vgl. DIN EN 14943 (2006, S. 56).

¹¹⁰Vgl. DIN EN 14943 (2006, S. 56).

¹¹¹DIN EN 14943 (2006, S. 101). Ähnlich FEM 9.101 (1997, S. 2). Ein Fördermittel ist nach DIN EN 15878 (2009, S. 4) eine „mechanische oder elektromechanische Einrichtung, die zum Transportieren, Anheben, Herausgreifen und Absetzen von Ladeinheiten eingesetzt wird.“

¹¹²Vgl. LEE/ KIM (1995, S. 3331).

¹¹³Bildquelle: DIN 15350 (1992, S. 2).

¹¹⁴Darüber hinaus sind RBG mit Laufrädern ausgestattet, die jedoch nicht angetrieben werden. Alternativ sind eine hängende Ausführung mit oberer Fahr- und unterer Führungsschiene oder eine Mischform mit mittlerer Einbringung der Kräfte denkbar. Vgl. FEM 9.101 (1997, S. 4f).

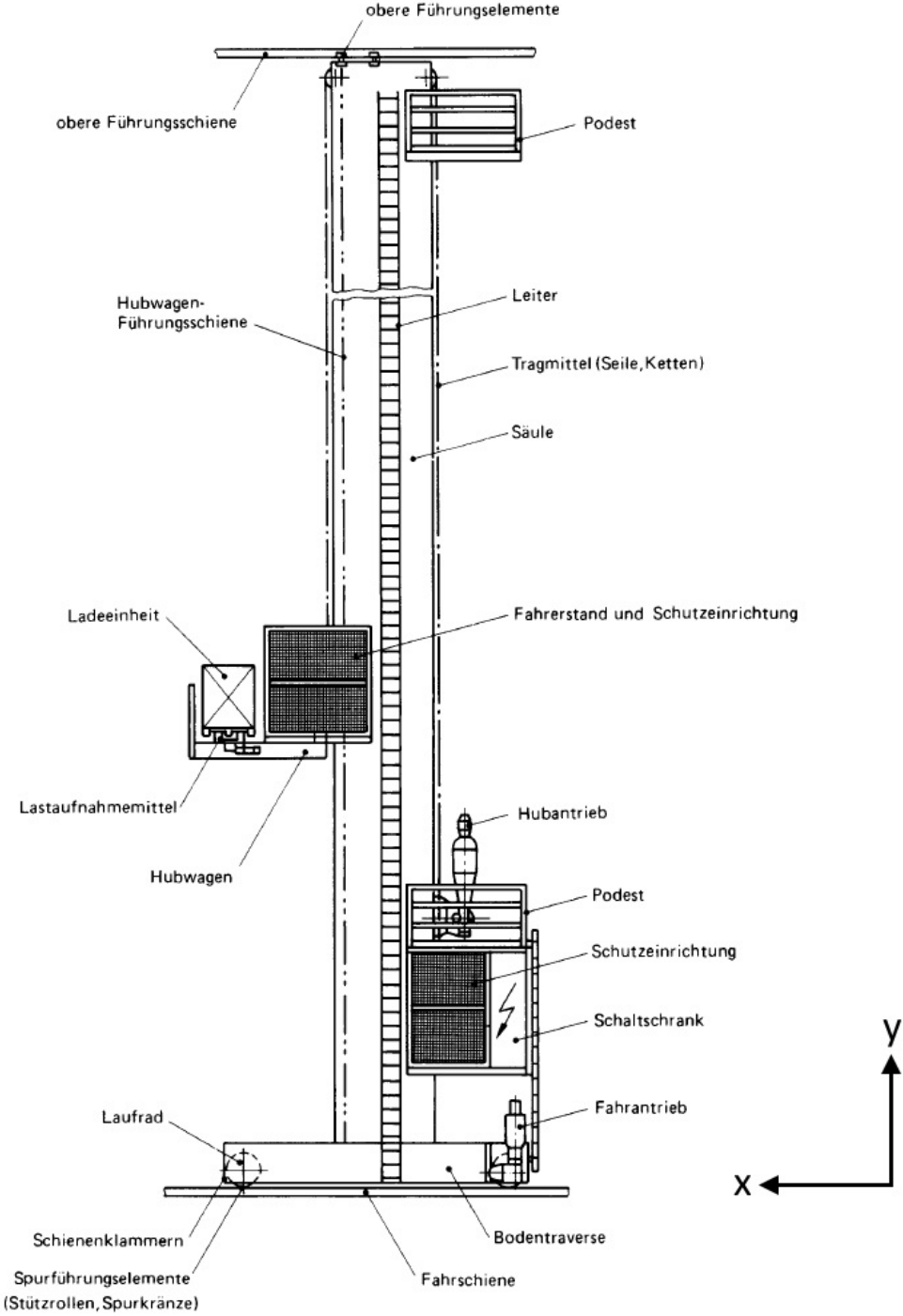


Abbildung 2.4: Aufbau eines RBG nach DIN 15350 (1992)

und Schienenprofil mit zweiseitigem, einseitigem oder ohne Spurkranz versehen.¹¹⁵

Hinsichtlich der Anzahl der Masten können Ein-, Zwei- und Mehrmast-Geräte unterschieden werden.¹¹⁶ Die vertikale Bewegung des Hubwagens¹¹⁷ (y-Richtung) wird durch das Hubwerk¹¹⁸ ermöglicht. Die Aufnahme und Abgabe der LE (z-Richtung) erfolgt durch das Lastaufnahmemittel¹¹⁹ (LAM) am Hubwagen.¹²⁰ LAM können ein umschlagreduzierendes¹²¹ Leerspiel aufweisen, z. B. beim Einsatz von Teleskopgabeln oder *shuttle*-Fahrzeugen, oder ohne Leerspiel operieren, z. B. beim Einsatz von Rollenböden oder Tragketten.¹²² Dabei hängt die Auswahl des LAM vom Ladungsträger, der LE-Masse, den Umschlaganforderungen und den räumlichen Verhältnissen ab. Die Lastaufnahmekapazität des RBG richtet sich nach der Anzahl und der Kapazität der angebrachten LAM.¹²³ Ein RBG kann eine der folgenden LAM-Konfigurationen aufweisen:

- Ein Einfach-LAM mit einer Kapazität von einer LE.
- Ein Mehrfach-LAM mit einer Kapazität von in der Regel zwei bis vier LE, die in z-Richtung, d. h. quer zur Fahrt- und Hubrichtung, angeordnet sind. Das RBG kann somit eine breitere Fahrgasse benötigen.
- Mehrere LAM, die entweder in Fahrtrichtung nebeneinander angeordnet werden oder bei Zweimast-RBG an unterschiedlichen Masten angebracht und einzeln in y-Richtung positionierbar sind.

RBG werden meist durch Elektromotoren angetrieben¹²⁴, wobei vorzugsweise Asynchronmotoren, d. h. Motoren mit 5-10 % Schlupf zwischen Drehfeld- und Motordrehzahl, eingesetzt werden.¹²⁵ Asynchronmaschinen besitzen einen einfachen und robusten Aufbau

¹¹⁵Illustrationen bietet TORKE/ ZEBISCH (1997, S. 152).

¹¹⁶DIN 15350 (1992) legt für schienengebundene RBG die Berechnung der Tragwerke fest.

¹¹⁷Engl. *lifting carriage*.

¹¹⁸Hubwerke dienen zum Heben, Senken und Halten von Lasten. Zu den Hubwerkelementen eines RBG gehören das Tragelement bzw. -mittel, das Lastaufnahmeelement, das die Verbindung zum Tragelement herstellt, die Triebwerkselemente als Träger der dynamischen Zweckfunktion des Hubwerks (Seilrollen, Seiltrommeln, Antriebsselemente) sowie die Tragwerkselemente, wie der Rahmen. Das Tragelement umfasst zum Hebezeug gehörige und mit diesem in der Regel fest verbundene und für seine Funktion unbedingt notwendige Elemente, wie Hubseile oder Hubketten. Vgl. TORKE/ ZEBISCH (1997, S. 85f). Zum mechanischen Aufbau von Hubwerken vgl. DRIEHAUS/ WEBER (2007, S. 305): Die Kraftübertragung erfolgt beim Einsatz von Winden vom Antrieb über eine Seiltrommel und ein Seil auf eine Last.

¹¹⁹Engl. *load handling unit* (LHU) oder *load handling device* (LHD).

¹²⁰Vgl. DIN EN 14943 (2006, S. 101).

¹²¹Vgl. Abschnitt 3.2.

¹²²Vgl. GUDEHUS (2010, S. 591).

¹²³Eine Erhöhung der Lastaufnahmekapazität des RBG bewirkt in der Regel keine lineare Erhöhung der Durchsatzkapazität des RBG. Grund hierfür ist, dass die Kundenaufträge häufig nicht derart in Fahraufträge für das RBG umgesetzt werden können, dass dessen Lastaufnahmekapazität optimal genutzt wird. Vgl. GUDEHUS (1973, S. 176-185).

¹²⁴Alternativ ist eine hydraulische oder pneumatische Energiebereitstellung denkbar.

¹²⁵Nach SCHUMACHER (2012, S. 224) werden bei kleineren RBG auch Servomotoren eingesetzt. Vgl. zu Servomotoren PLASSMANN/ SCHULZ (Hrsg.) (2009, S. 835f).

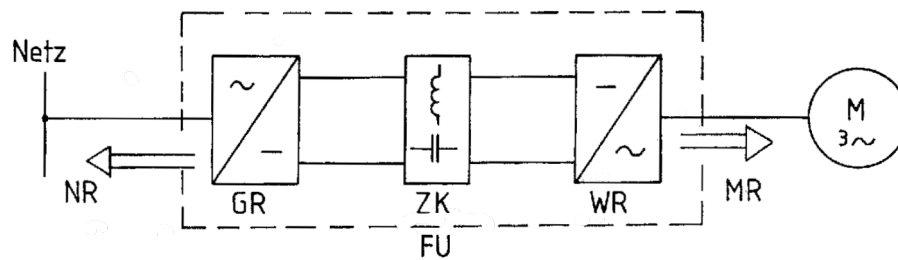


Abbildung 2.5: Struktur eines Umrichterantriebs nach FISCHER (2011)

und sind daher preisgünstig und wartungsarm. Die Bindung der Betriebsdrehzahl an die Frequenz der Ständerspannung schränkt jedoch die nutzbaren Drehzahlen ein. Durch den Einsatz von Frequenzumrichtern (FU) wird eine verlustarme Drehzahlsteuerung ermöglicht, da mit FU stufenlos Drehzahlen erreicht werden können, ohne sinkende Drehmomente in Kauf nehmen zu müssen und so insbesondere das Anlaufverhalten verbessert wird.¹²⁶ Abbildung 2.5¹²⁷ illustriert die Struktur eines Antriebssystems aus FU und Motor (M). Der FU ist aus einem Gleichrichter (GR), einem Zwischenkreis (ZK) und einem Wechselrichter (WR) aufgebaut und belastet das speisende Netz mit Netzurückwirkungen (NR, z. B. Blindströme) und den Motor mit Motorrückwirkungen (MR, z. B. Oberschwingungen). Als Antrieb für das Fahrwerk werden meist Käfigläufer eingesetzt, wohingegen beim Hubwerk Schleifringläufer Verwendung finden (siehe Markierung in Abbildung 2.6¹²⁸).¹²⁹ Die Stromzuführung lässt sich über Schleifleitungen, bewegliche Kabel, mitgeführte Akkumulatoren oder berührungslose Energieübertragung realisieren, wobei beim Fahrtrieb eines RBG vorzugsweise Draht- oder Schienenschleifleitungen zum Einsatz kommen.¹³⁰

Nach der Arbeitsweise unterscheidet man automatische RBG ohne Bedienpersonal, halbautomatische RBG mit Bedienpersonal zur Entnahme und Beschickung sowie handbetätigte RBG mit Fahrer.¹³¹ Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf automatischen RBG ohne Bedienpersonal. Damit entstehen aHRL, d. h. Hochregallager, in denen die Arbeitsabläufe zwischen dem Ein- und Ausgangspunkt des Systems durch Transport und Steuerungselemente begleitfrei und ohne manuelle Eingriffe abgewickelt werden. Die Automatisierung erstreckt sich auf den Informationsfluss sowie auf die Steuerung der Fördermittel und der RBG.¹³²

¹²⁶Vgl. FISCHER (2011, S. 170).

¹²⁷Bildquelle: FISCHER (2011, S. 248).

¹²⁸Bildquelle: FISCHER (2011, S. 15).

¹²⁹DIN 15349 bietet Kriterien und Berechnungsgrundlagen zur Auslegung und Auswahl der Triebwerke von RBG. Hierzu zählt z. B. die Auslegung der Antriebe für Fahr-, Hubwerk und LAM, die Getriebe- und Kupplungsauswahl und die Auslegung der Bremsen. Vgl. DIN 15349 (2003).

¹³⁰Vgl. FEM 9.101 (1997, S. 11) sowie MARTIN (2009, S. 99-104).

¹³¹Vgl. FEM 9.101 (1997, S. 5f).

¹³²Vgl. VDI 2690-2 (1994, S. 3).

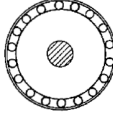
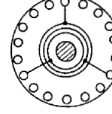
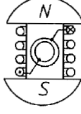
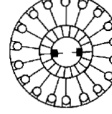
Läufer mit	Käfigwicklung	Drehstromwicklung mit Schleifringen	Einzelpole (auch Dauermagnete)	Stromwenderwicklung
Ständer mit				
Drehstromwicklung	Asynchron-Käfigläufer-Motor	Asynchron-Schleifringläufer-Motor	Innenpol-Synchronmaschine	Drehstrom-Kommutator-Maschine
Einzelpole auch als Dauermagnete	Spaltpolmotor	Außenpol-Synchronmaschine	Schrittmotor	Gleichstrom-Maschine

Abbildung 2.6: Konstruktionsprinzipien elektrischer Maschinen nach FISCHER (2011)

2.4.4 Lagervorzone

Das Lagermittel (Regal) und die Fördermittel zur Ein- und Auslagerung (RBG) werden durch Ressourcen zur Zu- und Abführung der LE ergänzt. Von besonderer Bedeutung sind die Lagervorzone und die Übergabepunkte (ÜP)¹³³ der LE:

Die Lagervorzone dient der Zu- und Abförderung der Lagereinheiten, wobei die Subsysteme für Zu- und Abförderung entweder getrennt, z. B. auf zwei Ebenen¹³⁴ oder an zwei Regalwandseiten, oder kombiniert in einer Ebene an einer Regalwandseite realisiert sein können. Gängige Ausführungen sind Verschiebewagen, Tragkettenförderer, Rollenbahnen, Vertikalförderer, Elektrohängebahnen und fahrerlose Transportsysteme.¹³⁵

Die ÜP bilden die Schnittstellen zwischen Lagervorzone und aHRL.¹³⁶ Hierzu gehören je Gasse der ÜP für eingehende LE (Einlagerungsbereitstellplatz, EP) sowie der ÜP für ausgehende LE (Auslagerungsbereitstellplatz, AP). Darüber hinaus finden Ressourcen zur Verknüpfung von Material- und Informationsfluss (z. B. *barcode*-Lesegeräte) in der Lagervorzone Verwendung. Abbildung 2.7¹³⁷ zeigt die Nutzung von Rollenbahnen und Drehtischen in der Vorzone eines aHRL mit einem kurvengängigen RBG. Nach BASILE/ CHIAC-

¹³³Engl. *pickup and deposit (P&D) station* oder *input/ output (I/O) point*.

¹³⁴Siehe Abbildung 2.1.

¹³⁵Vgl. GUDEHUS (2010, S. 592) sowie VDI 3646 (1994, S. 3-8).

¹³⁶Vgl. FEM 9.851 (2003).

¹³⁷Bildquelle: JÜNEMANN (1989, S. 642).

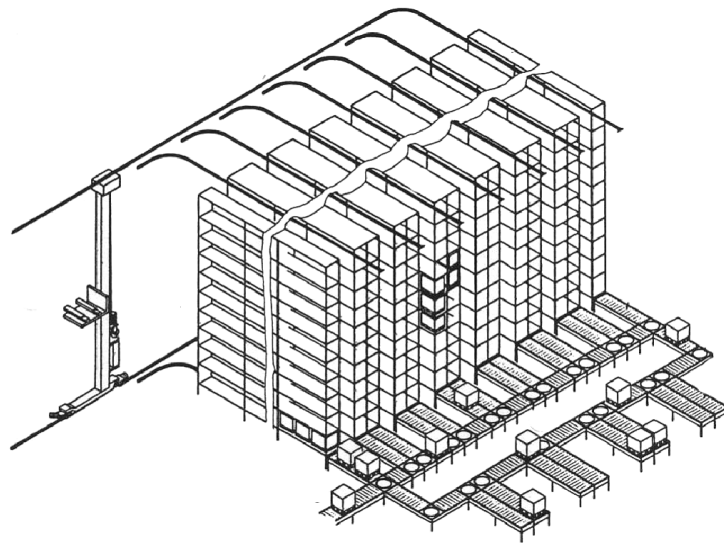


Abbildung 2.7: aHRL mit Lagervorzone nach JÜNEMANN (1989)

CHIO/ COPPOLA wird der Umschlag¹³⁸ von aHRL häufig durch unterdimensionierte bzw. mangelhaft gesteuerte Lagervorzonen eingeschränkt.¹³⁹

2.4.5 Lagersteuerung und -verwaltung

Tabelle 2.2¹⁴⁰ beschreibt den Aufbau zentraler, hierarchischer Materialflusssteuerungen. Darüber hinaus werden die Umsetzungen und die Aufgaben der Ebenen in aHRL dargestellt.

Die Feldebene umfasst Sensoren und Aktoren und bildet zusammen mit der mechanischen Konstruktion den ausführenden Teil der Materialflusssteuerung.

In der Steuerungsebene werden eingehende Signale der Feldebene verarbeitet und die Aktoren gesteuert. Gängige Ausführungen digitaler Steuerungen sind Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS¹⁴¹), numerische Steuerungen (*computerized numerical control, cnc*), Bewegungssteuerungen (*motion control, mc*), Steuerungen auf Basis von Mikrorechnern (*embedded controller*) und Industrie-PC (IPC) mit *soft-SPS* oder *soft-cnc*.¹⁴²

Der Materialflussrechner bildet die höchste Ebene der Materialflusssteuerung und sendet z. B. durchzuführende Transporte als Vorgabe an die Steuerungsebene, welche wiederum die erfolgreiche Durchführung des Transports an den Materialflussrechner zurückmeldet.

Der Materialflusssteuerung ist die Leitebene in Form eines Lagerverwaltungssystems

¹³⁸Vgl. Abschnitt 3.2.

¹³⁹Vgl. BASILE/ CHIACCHIO/ COPPOLA (2011, S. 201f). Ähnlich LUCAS (2007, S. 99).

¹⁴⁰In Anlehnung an NIEKE (2010, S. 17), VDI 2681 (1993, S. 2-5) sowie VDI 3630 (2006, S. 7-9).

¹⁴¹Nach DIN IEC 60050-351 (2009, S. 141) ist eine SPS eine „rechnergestützte Leiteinrichtung [...], deren [...] logischer Ablauf über eine [...] angeschlossene Programmierereinrichtung [...] veränderbar ist“.

¹⁴²Vgl. KIEL (2007, S. 49-59).

Ebene	Umsetzung	Aufgabe
Leitebene (Lagerverwaltungssystem, LVS)		Leiten des Lagerbetriebs, Kapazitätsoptimierung, Ressourceneinsatz, Bestands-, Stamm- und Auftragsdatenverwaltung
Materialfluss- rechner	Standalone-Rechner mit MICROSOFT WINDOWS oder LINUX als Betriebssystem	Informationsverteilung zwischen LVS und Maschinensteuerung, Prozedurkonverter bei unterschiedlichen Datenübertragungssystemen, Optimierung der RBG-Bewegung, z. B. Doppelspiel
Steuerungsebene (Maschinen- steuerung)	SPS oder PC-basiert (<i>soft-</i> oder <i>slot</i> -SPS, IPC), Steuerungsprogramm gemäß DIN EN 61131	Steuerung und Überwachung des Bewegungsablaufs von Fahrwerk, Hubwerk und LAM nach vorgegebenen Programmabläufen
Feldbus- Ebene	PROFIBUS-DP, CAN-Bus, Interbus-S <i>etc.</i>	Kommunikation zwischen den Sensoren und der Maschinensteuerung sowie zwischen der Maschinensteuerung und den Aktoren
Feldebene (Aktuator-/ Sensor-Ebene)	Antriebe, Waagen, optische Messverfahren	Einwirkung auf den physischen Einzelprozess, Aufnahme von Prozessgrößen

Tabelle 2.2: Steuerungsaufbau in aHRL in Anlehnung an NIEKE (2010), VDI 2681 (1993) sowie VDI 3630 (2006)

(LVS) übergeordnet. Ein LVS ist nach TEN HOMPEL/ SCHMIDT ein für gewöhnlich rechnergestütztes „System zur Verwaltung von Mengen und Orten (Lagerorten) und insbesondere deren Beziehung zueinander“¹⁴³. Die Autoren grenzen davon das *warehouse management system (wms)* ab, das weitergehende Funktionen zur Steuerung, Kontrolle und Optimierung komplexer Lager- und Distributionssysteme besitzt, u. a. die Funktionen Lagerverwaltung, Reorganisation, Fördermittelverwaltung, Datenverarbeitung und Inventur. Zur Lagerverwaltung gehören

- die Lagertypenverwaltung, d. h. die Zuweisung der Kompatibilität einzelner Elemente des Lagersystems,
- die LP-Verwaltung, d. h. die Abbildung der technischen Lagerstruktur, die Verwaltung der gelagerten Einheiten sowie die Statusangaben zur Verfügbarkeit der LP (verfügbar, reserviert, gesperrt),
- die Mengenverwaltung und Bestandsführung¹⁴⁴ sowie
- die Überwachung von Umweltparametern, wie z. B. die Temperaturen in Kühllagern und die Zugangskontrolle.

Die Reorganisation umfasst beispielsweise die Umlagerung eingelagerter Einheiten oder die Verdichtung angebrochener Einheiten. Die Datenverarbeitung beinhaltet die Datenerfassung, -aufbereitung und -visualisierung, z. B. für Betriebsmittelstatistiken.¹⁴⁵ Elementare Basisdaten von Lagersystemen sind Artikelstamm-, Bestands-, Bewegungs- und sonstige Systemdaten: Artikelstammdaten sind über einen längeren Zeitraum unveränderte Daten zur Beschreibung aller Artikel, z. B. Artikelabmessungen oder -nummern. Bestandsdaten geben Auskunft über die gelagerten und bereitgehaltenen Mengen der Artikel. Bewegungsdaten beschreiben die wesentlichen physischen Lagerprozesse, z. B. die Auslagerungen pro Tag oder die Auftragsdurchlaufzeit. Sonstige Systemdaten existieren z. B. in Form von Verpackungsstamm- oder Kostendaten.¹⁴⁶

Die Leitebene ist dem Warenwirtschaftssystem (*enterprise resource planning, erp*) untergeordnet, das übergreifende Geschäftsprozesse abbildet.¹⁴⁷

2.5 Prozesse in automatischen Hochregallagern

In aHRL findet der Material- und Informationsfluss in Form von Prozessen statt, die jeweils den Eingangszustand von Gütern oder Informationen in einen definierten Aus-

¹⁴³TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 8).

¹⁴⁴Die Auflistung aller belegten LP, also das Abbild des momentanen Lagerzustands, wird als Lagerspiegel bezeichnet. Der Lagerspiegel kann um die Art und Menge der Artikel ergänzt sein.

¹⁴⁵Vgl. TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 54-64) sowie TEN HOMPEL (Hrsg.)/ HEIDENBLUT (2011, S. 174).

¹⁴⁶Vgl. TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 65f).

¹⁴⁷Vgl. NIEKE (2010, S. 17f).

gangszustand transformieren.¹⁴⁸ Gemäß VDI 2681 beginnt der Systembereich Hochregallager mit der Übergabe einer LE vom EP auf das RBG und endet mit der Übergabe einer LE vom RBG auf den AP.¹⁴⁹ Materialflussprozesse in Lagersystemen sind daher das Einlagern, Lagern und Auslagern der LE:¹⁵⁰

Einlagern beschreibt den Transport der LE vom Identifikationspunkt (i-Punkt) zum Lagerplatz. Dabei wird das Transportziel, z. B. der Lagerbereich und -platz, festgelegt, das Arbeitsmittel und der Weg bestimmt und die Einlagerung überwacht.¹⁵¹ In DIN EN 14943 wird das Lagern als „Tätigkeit des Anordnens von Gütern in einem Lager bzw. der Zustand, in einem Lager zu sein“, definiert.¹⁵² JÜNEMANN greift auf, dass es sich beim Lagern um einen geplanten Prozess der Zeit- und Zustandsüberbrückung von Waren handelt.¹⁵³ Unter Auslagern wird der „Vorgang, bei dem gelagerte [LE] aus einem Lager entnommen, die [LE] am Lagerort geladen und bewegt und an den Entladepunkt geliefert wird“¹⁵⁴, verstanden.

Diese drei Prozesse beeinflussen die Gestaltung, den Betrieb und die Wirtschaftlichkeit von Lagersystemen, bilden jedoch erst durch vor- und nachgelagerte Materialflussprozesse sowie durch Ergänzung vorlaufender, begleitender und nachlaufender Informationsflussprozesse zusammenhängende Prozessketten und -netze. Zu den vorgelagerten Material- und Informationsflussprozessen, die hauptsächlich im Wareneingang und in der Lagervorzone durchgeführt werden, gehören beispielsweise das Entladen ankommender Transportmittel, die Eingangsprüfung, das Entfernen von LE-Sicherungen, das Bilden von Lagereinheiten vor der Einlagerung, die Verteilung auf die Lagerbereiche sowie die Identifikation der LE. Zu den nachgelagerten Material- und Informationsflussprozessen gehören beispielsweise die Kontrolle der LE nach der Auslagerung, die Konsolidierung von Kundenaufträgen, die Verteilung der Artikel auf die Warenausgangszonen, die Etikettierung von Versandeinheiten sowie der Versand. Beispiele für zeitlich parallele Informationsflussprozesse sind die LP-Verwaltung und die Prozess- und Anlagenüberwachung.¹⁵⁵

Während in der Prozessplanung die Anforderungen an Lager in betriebliche Abläufe umgesetzt werden, beinhaltet die Prozesssteuerung nach DIN EN 14943 „Regelungen oder

¹⁴⁸Vgl. hierzu die Definitionen des Prozessbegriffs in DIN EN 14943 (2006, S. 93), DIN EN ISO 9000 (2005, S. 8) sowie DIN IEC 60050-351 (2009, S. 20).

¹⁴⁹Vgl. VDI 2681 (1993, S. 2).

¹⁵⁰Vgl. GOETSCHALCKX (2012, S. 31) sowie GUDEHUS (2010, S. 565).

¹⁵¹Vgl. VDI 3629 (2005, S. 5f).

¹⁵²DIN EN 14943 (2006, S. 121). Vgl. Abschnitt 2.3.

¹⁵³Vgl. JÜNEMANN (1989, S. 143). JÜNEMANN setzt die Begriffe Lagern und Lagerung gleich. In DIN EN 14943 (2006, S. 121) existiert eine separate Definition für die Lagerung als „Vorgang, Waren vorrätig oder in geeigneten Räumen zu halten, um die Zeit zwischen deren Ankunft und Einsatz zu überbrücken“.

¹⁵⁴DIN EN 14943 (2006, S. 106). Das sprachliche Synonym Auslagerung wird darin (S. 37) als „Abgang von Rohstoffen, Bestandteilen oder anderen Artikeln aus einem Lagerraum oder Warenlager heraus und Aufzeichnung dieser Bewegungen“ beschrieben. Während die Definition für das Auslagern also den Materialflussaspekt betont, fokussiert sich letztere Definition ebenso auf den Informationsaspekt des Vorgangs.

¹⁵⁵Vgl. TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 23-53), VDI 2690-1 (1994, S. 3) sowie VDI 3629 (2005, S. 3-8).

Mechanismen, die sicherstellen, dass die Prozesse entsprechend der Planung verlaufen”¹⁵⁶. Bei dieser Definition wird die in der Steuerungs- und Regelungstechnik etablierte Trennung zwischen den Begriffen Steuerung und Regelung¹⁵⁷ jedoch unscharf angewendet. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher die folgende Beschreibung Verwendung finden: Die Aufgabe einer Prozesssteuerung in Lagern ist es, vorgegebene Kosten- und Leistungszielgrößen im Betriebsablauf effizient umzusetzen.

¹⁵⁶DIN EN 14943 (2006, S. 28).

¹⁵⁷In DIN IEC 60050-351 (2009, S. 56f) wird die Regelung beschrieben als „Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße, erfasst, mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf [...]“ Die Steuerung wird hingegen definiert als „Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere variable Größen als Eingangsgößen andere variable Größen als Ausgangsgößen auf Grund der dem System eigenen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. [...] Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsweg [...]“ Der Unterschied zwischen beiden Prinzipien liegt daher in der Betrachtung der realen Ausgangsgößen im Entscheidungsprozess. Vgl. auch PLASSMANN/ SCHULZ (Hrsg.) (2009, S. 689 und 719-721).

3 Effizienz automatischer Hochregallager

3.1 Effizienz und Produktivität

Der Begriff Effizienz verknüpft einen erzielten Nutzen bzw. einen Zielertrag mit einem dazu notwendigen Aufwand zu einer relativen Bewertungszahl gemäß Formel 3.1:¹⁵⁸

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Zielertrag}}{\text{erforderliche Mittel zur Zielerreichung}} \quad (3.1)$$

Zur Maximierung der Effizienz sind, ausgehend vom ökonomischen Prinzip, im Wesentlichen drei Herangehensweisen denkbar, die sich insbesondere in der Betriebswirtschaftslehre als Paradigmen etabliert haben: Gemäß dem Maximum-Prinzip kann ein definierter Aufwand angesetzt werden, mit dem ein möglichst hoher Nutzen generiert werden soll. Die zweite Möglichkeit ist die Anwendung des Minimum-Prinzips, wonach ein definierter Nutzen mit möglichst geringem Aufwand erreicht werden soll. Als dritte Variante wird das Maximin-Prinzip postuliert, wonach mit einem möglichst geringen Aufwand ein möglichst hoher Nutzen erzielt werden soll. Das Maximin-Prinzip ist dabei eng mit dem mikroökonomischen Prinzip der Grenzkosten und -erträge und den sich daraus ergebenden Elastizitäten von Kostenfunktionen verknüpft: Stehen einem Grenzertrag geringere Grenzkosten gegenüber, so ist die Erzeugung einer weiteren Leistungseinheit mit einem steigenden Durchschnittsertrag verbunden. Dadurch steigt ebenso die Gesamteffizienz der erzeugten Leistung. Effizienz kann der Effektivität gegenüber gestellt werden, d. h. dem Grad einer Zielerreichung. Die Effektivität ist rein *output*-bezogen und berücksichtigt nicht die zur Verwirklichung der Ziele eingesetzten Mittel.¹⁵⁹

Stellt man reale Ein- und Ausgabegrößen gegenüber, so konkretisiert sich die Effizienz zur Produktivität.¹⁶⁰ Die in der Mikroökonomie bekannte Arbeitsproduktivität stellt eine partielle Faktorproduktivität dar und bezeichnet die Anzahl an Einheiten der Ausgabegröße y , die mit einer Einheit der Eingabegröße L produziert werden (siehe Formel 3.2).¹⁶¹

$$\text{Arbeitsproduktivität} = \frac{y}{L} \quad (3.2)$$

Im Rahmen einer Produktivitätsanalyse können die Beziehungen zwischen Ein- und Ausgabegrößen eines Prozesses ermittelt und quantifiziert werden, wobei aus empirisch beobachteten Produktionspunkten (beobachtete Kombinationen aus Ein- und Ausgabegrößen) eine relative *best practice*-Produktionsfunktion gebildet werden kann. Der Abstand

¹⁵⁸Vgl. CANTNER/ KRÜGER/ HANUSCH (2007, S. 3) sowie DIN EN 14943 (2006, S. 41).

¹⁵⁹Vgl. CANTNER/ KRÜGER/ HANUSCH (2007, S. 1-3) sowie DIN EN 14943 (2006, S. 41).

¹⁶⁰In der Mikroökonomie bezeichnet die Produktivität das Verhältnis aus einem Produktionsergebnis und den eingesetzten Produktionsfaktoren. Vgl. CANTNER/ KRÜGER/ HANUSCH (2007, S. 1f).

¹⁶¹Vgl. CANTNER/ KRÜGER/ HANUSCH (2007, S. 44f).

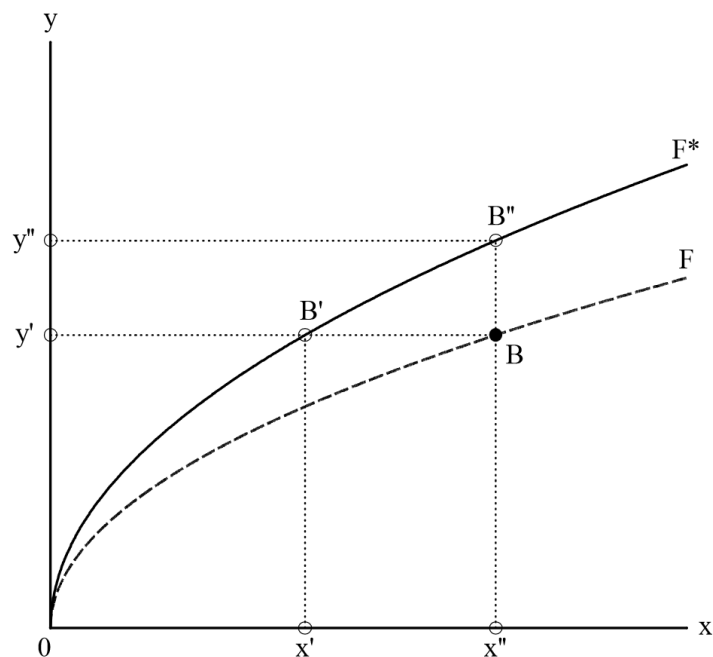


Abbildung 3.1: *best practice*-Produktionsfunktion und technische Effizienz nach CANTNER/ KRÜGER/ HANUSCH (2007)

eines beobachteten Produktionspunkts B (z. B. ein Lagersystem) von der *best practice*-Produktionsfunktion F^* ist dabei das Maß für die technische Ineffizienz des Produktionspunkts. Durch Reduktion des Faktoreinsatzes von x'' auf x' oder durch Erhöhung der Ausgabegröße y' auf y'' kann sich der Produktionspunkt entsprechend an die *best practice*-Produktionsfunktion annähern und die Punkte B' respektive B'' einnehmen (siehe Abbildung 3.1¹⁶²).¹⁶³

Zur Beurteilung der Effizienz eines Vorgangs kann eine Gegenüberstellung seiner eingehenden und ausgehenden Flüsse erfolgen. Beide Flüsse lassen sich durch die Kategorien Stoff, Energie und Information beschreiben. Unter Stoffen lassen sich hier die eingesetzten Betriebsmittel, Ersatzteile und Betriebsstoffe subsumieren. Energie wird definiert als die Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten.¹⁶⁴ Energie kann gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik zwischen Systemen ausgetauscht werden; sie kann jedoch weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden. In einem abgeschlossenen System ist die Gesamtheit der Energie daher immer gleich. Energie kann in den Formen thermische, elektrische, magnetische, chemische, Kern-, Strahlungs- und mechanische Energie auftreten. Mechanische Energie lässt sich wiederum in kinetische Energie, d. h. die in der bewegten Masse eines Körpers enthaltene Energie, und in potentielle Energie, d. h. die durch seine Position und Lage in

¹⁶²Bildquelle: CANTNER/ KRÜGER/ HANUSCH (2007, S. 7).

¹⁶³Vgl. CANTNER/ KRÜGER/ HANUSCH (2007, S. 6-12).

¹⁶⁴Vgl. MÜLLER/ ENGELMANN/ LÖFFLER *et al.* (2009, S. 67).

einem Kraftfeld (z. B. Gravitationsfeld) definierte Energie eines Körpers, einteilen. Dabei kann Primärenergie, d. h. der Energieinhalt von natürlich vorkommenden Energieträgern, z. B. Wind oder Kohle, in Sekundärenergie transformiert werden, z. B. in Elektroenergie oder Heizöl. Die Endenergie, also der Energieinhalt jener Energieträger, die dem Nutzer letztendlich zur Verfügung gestellt werden, gleicht in ihrer Form der Sekundärenergie, ist jedoch am Ort und zu der Zeit gemessen, wenn der Energieträger physisch in den Besitz des Nutzers übergeht, z. B. an der Einspeisestelle für Strom an der Grundstücksgrenze. Die letzte Form der Umwandlungskette nimmt die Nutzenergie ein, d. h. die Energie, die unmittelbar für die vom Nutzer gewünschte Anwendung/ Leistung eingesetzt wird, z. B. mechanische Energie, Kälte oder Licht.¹⁶⁵ Zum Endenergiebedarf von aHRL zählen die erforderliche elektrische Energie, die Heizungs-/ Kühlenergie sowie die Lüftungs- und die Beleuchtungsenergie. Diesen Eingabegrößen stehen Ausgabegrößen in Form von Abwärme, Lärm, Schwingungen sowie innere Energie von Körpern gegenüber.

3.2 Umschlag und Energieeffizienz automatischer Hochregallager

Nach BRANDES lassen sich die Ziele, die in der Planung eines aHRL anzustreben sind, wie folgt zusammenfassen:¹⁶⁶

- Erstens soll eine termingerechte Auslagerung benötigter LE erfolgen, um einen zu Grunde liegenden Bedarf an einer benötigten Artikelmenge zu decken. Verzögerungen sind hierbei zu vermeiden, damit keine Terminüberschreitungskosten entstehen. Gleichwohl können verfrühte Auslagerungen notwendige Zwischenpufferungen, beispielsweise in der Fertigung oder im Warenausgang, erfordern.
- Zweitens sollen Einlagerungen schnell durchgeführt werden, um Staueffekte in der zuführenden Lagervorzone¹⁶⁷ zu vermeiden.
- Drittens soll eine optimale Lagerraumnutzung erreicht werden, d. h. ein hoher LFG ist anzustreben.¹⁶⁸
- Viertens soll der Energiebedarf der Lageroperationen minimiert werden.
- Fünftens soll eine hohe Verfügbarkeit angestrebt werden, um zu gewährleisten, dass Einlagerungen jederzeit durchführbar sind und Bedarfe zu jeder Zeit gedeckt werden können.

¹⁶⁵Vgl. MÜLLER/ ENGELMANN/ LÖFFLER *et al.* (2009, S. 74).

¹⁶⁶Vgl. BRANDES (1997, S. 42-49).

¹⁶⁷Vgl. Abschnitt 2.4.4.

¹⁶⁸Wie die späteren Ausführungen zeigen werden, führt jedoch ein hoher LFG dazu, dass Lagerstrategien in ihrer Wirkungsweise eingeschränkt werden und somit ihr Potential zur Senkung der Fahrzeiten oder der Energiebedarfe nur bedingt entfalten können. Ähnlich PETERMANN (1995, S. 49). Daher ist fallspezifisch eine Untersuchung der *trade-offs* zwischen einer Erhöhung der Lagerkapazität und den somit entstehenden Einsparungen hinsichtlich Fahrzeit und Energiebedarf der Lageroperationen denkbar.

- Als sechstes Ziel soll eine ungünstige statische Belastung der Regale¹⁶⁹ vermieden werden.

Der Umschlag beschreibt die Anzahl der Ein- und/ oder Auslagerungen von LE pro Zeiteinheit eines Lagersystems (siehe Formel 3.3) und stellt demnach das Maß dar, in dem das aHRL befähigt ist, die ersten beiden o. g. Ziele umzusetzen.¹⁷⁰

$$\text{Umschlag} = \frac{\text{Einlagerungen und/ oder Auslagerungen}}{\text{Zeiteinheit}} \quad (3.3)$$

Er wird durch eine hohe Verfügbarkeit der Elemente des aHRL, z. B. durch geringe Ausfallzeiten der RBG, und kurze Spielzeiten positiv beeinflusst.¹⁷¹ Die Verfügbarkeit beschreibt die Wahrscheinlichkeit, ein „Element zu einem beliebigen Zeitpunkt während der Betriebszeit in einem Zustand anzutreffen, der eine störungsfreie und korrekte Ausführung der betrachteten Funktion erlaubt“¹⁷², und wird gemäß Formel 3.4 ermittelt:

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{\text{gesamte Einschaltzeit} - \text{Summe der Ausfallzeiten}}{\text{gesamte Einschaltzeit}} \quad (3.4)$$

Die mittlere Spielzeit, d. h. der „Mittelwert aller Arbeitsspiele bezogen auf eine Regalzeile“¹⁷³, ist zu minimieren, um einen maximalen Umschlag zu gewährleisten.¹⁷⁴ Sie wird von (1) der Artikelstruktur (Anzahl, Art und Bestände der zu lagernden Artikel *etc.*), (2) der Auftragsstruktur (Auftragseingänge pro Periode, Artikelanzahl und Fälligkeit der Aufträge *etc.*), (3) der physischen Gestaltung der Lager- und Fördermittel (Lagerkapazität, Zugänglichkeit der LP, Anzahl der Fördermittel *etc.*), (4) der informationstechnischen Ausrüstung (LVS, Maschinensteuerung *etc.*)¹⁷⁵ und (5) den Lagerstrategien bestimmt.¹⁷⁶ Die mittlere Spielzeit in aHRL lässt sich statisch, d. h. durch Anwendung analytischer Berechnungsvorschriften, sowie dynamisch, d. h. durch Auswertung von Simulationsexperimenten, ermitteln. Analytische Berechnungsvorschriften legen ein bestimmtes Arbeitsspiel zu Grunde, d. h. eine „Anzahl von hintereinander auszuführenden Arbeitsoperationen, die einen geschlossenen Bewegungsablauf bilden [...]. Bei einem Arbeitsspiel wird zwischen Einzel- und Doppelspiel unterschieden.“ Ein Einzelspiel¹⁷⁷ ist ein „Arbeitsspiel,

¹⁶⁹Vgl. Abschnitt 2.4.2.

¹⁷⁰Vgl. VDI 2516 (2003, S. 4) sowie ähnlich FEM 9.221 (1981, S. 1).

¹⁷¹Vgl. FEM 9.221 (1981, S. 1 und 4).

¹⁷²FEM 9.221 (1981, S. 1).

¹⁷³VDI 2516 (2003, S. 3).

¹⁷⁴LINN/ WYSK (1990, S. 39) führen neben einer minimalen mittleren Spielzeit weitere Kenngrößen zur Beurteilung der Leistung von aHRL an, z. B. eine minimale durchschnittliche Warteschlangenlänge bei Einlagerungen, eine minimale durchschnittliche Warteschlangenlänge bei Auslagerungen, eine minimale Warteschlangenlänge unerledigter Einlagerungen sowie eine minimale Warteschlangenlänge unerledigter Auslagerungen. Ähnlich WANG/ YIH (1997, S. 491).

¹⁷⁵Vgl. Abschnitt 2.4.5.

¹⁷⁶Vgl. GOETSCHACKX (2012, S. 32), GUDEHUS (2010, S. 588) sowie SARKER/ BABU (1995, S. 174f).

¹⁷⁷Engl. *single command cycle*.

das entweder einen Einlagerungs- oder einen Auslagerungsvorgang umfasst“, während ein Doppelspiel¹⁷⁸ „sowohl einen Einlagerungs- als auch einen Auslagerungsvorgang“ beinhaltet.¹⁷⁹ Doppelspiele führen zu geringeren mittleren Spielzeiten als die entsprechende doppelte Menge an Einzelspielen, da die Leerfahrten geringer ausfallen.¹⁸⁰ Aus dem gewichteten Mittel der mittleren Einzel- und Doppelspielzeit wird anschließend die mittlere Spielzeit errechnet. Gängige Berechnungsvorschriften finden sich in VDI 2516, VDI 3561, FEM 9.851 sowie in den Ansätzen von GUDEHUS und BOZER/ WHITE.¹⁸¹ Die Spielzeit setzt sich aus den Fahrzeiten (inkl. Positionier-/ Ausschwingzeiten), den Totzeiten (Schaltzeiten, Sensorik) und der Dauer der Lastspiele zusammen.¹⁸² Die wirksame Fahrzeit des RBG zwischen zwei Punkten einer Regalwand kann vereinfacht über folgende Beziehungen berechnet werden: RBG ermöglichen eine überlagerte Bewegung der LE in x- und y-Richtung der Regalwand. Die wirksame Fahrzeit t_i für die Bewegung von Punkt 1 (x_1, y_1) zu Punkt 2 (x_2, y_2) bemisst sich gemäß der TSCHEBYSCHOW-Metrik aus der längeren Komponente aus der Zeit $t_{x,i}$ für die horizontale Bewegung von x_1 nach x_2 sowie der Zeit $t_{y,i}$ für die vertikale Bewegung von y_1 nach y_2 gemäß Formel 3.5:

$$t_i = \text{MAX}(t_{x,i}; t_{y,i}) \quad (3.5)$$

Die Werte $t_{x,i}$ und $t_{y,i}$ können abhängig von der jeweiligen Fahrstrecke $s_{x/y,i}$, der Nenngeschwindigkeit $v_{x/y}$ und der Nennbeschleunigung $a_{x/y}$ gemäß Formel 3.6 approximiert werden:

$$t_{x/y,i} = \begin{cases} \frac{s_{x/y,i}}{v_{x/y}} + \frac{v_{x/y}}{a_{x/y}} & s_{x/y,i} > \frac{v_{x/y}^2}{a_{x/y}} \\ 2\sqrt{\frac{s_{x/y,i}}{a_{x/y}}} & s_{x/y,i} \leq \frac{v_{x/y}^2}{a_{x/y}} \end{cases} \quad (3.6)$$

Im ersten Fall ist die Fahrstrecke ausreichend lang, um die Nenngeschwindigkeit in x- bzw. y-Richtung zu erreichen, wodurch sich ein trapezförmiger Geschwindigkeitsverlauf ergibt (siehe linke Hälfte der Abbildung 3.2¹⁸³). Im zweiten Fall ist die Fahrstrecke zu kurz, um die Nenngeschwindigkeit zu erreichen. Daher liegt hier ein dreiecksförmiger

¹⁷⁸Engl. *dual command cycle*.

¹⁷⁹VDI 2516 (2003, S. 3). Zusätzlich zu Einzel- und Doppelspielen können noch Mehrfachspiele gebildet werden, indem nach einer Einlagerung zunächst Umlagerungen durchgeführt werden, bevor das Spiel mit einer Auslagerung abgeschlossen wird. Vgl. Abschnitt 3.3.5.7.1.

¹⁸⁰Vgl. GRAVES/ HAUSMAN/ SCHWARZ (1977, S. 943): Das Doppelspiel weist nur drei Fahrtzeitanteile auf (Hin-, Zwischen-, Rückfahrt), während zwei konsekutive Einzelspiele (Ein- und Auslagerung) aus insgesamt vier Fahrtzeitanteilen (je 2x Hin- und Rückfahrt) bestehen.

¹⁸¹Vgl. VDI 2516 (2003), VDI 3561 (1973), FEM 9.851 (2003), GUDEHUS (2010, S. 622-625), BOZER/ WHITE (1984) sowie für eine Bewertung LIPPOLD (2003, S. 23). Dabei werden für eine Regalwand in Abhängigkeit von der Konfiguration der Übergabepunkte charakteristische Referenzpunkte festgelegt, für die anschließend die Spielzeit berechnet wird. Für einen Vergleich weiterer Berechnungsvorschriften siehe CORMIER (2005, S. 98-100), ROODBERGEN/ VIS (2009, S. 355-358) sowie SARKER/ BABU (1995).

¹⁸²Vgl. ARNOLD/ FURMANS (2007, S. 202f).

¹⁸³Bildquelle: In Anlehnung an ARNOLD/ FURMANS (2007, S. 13).

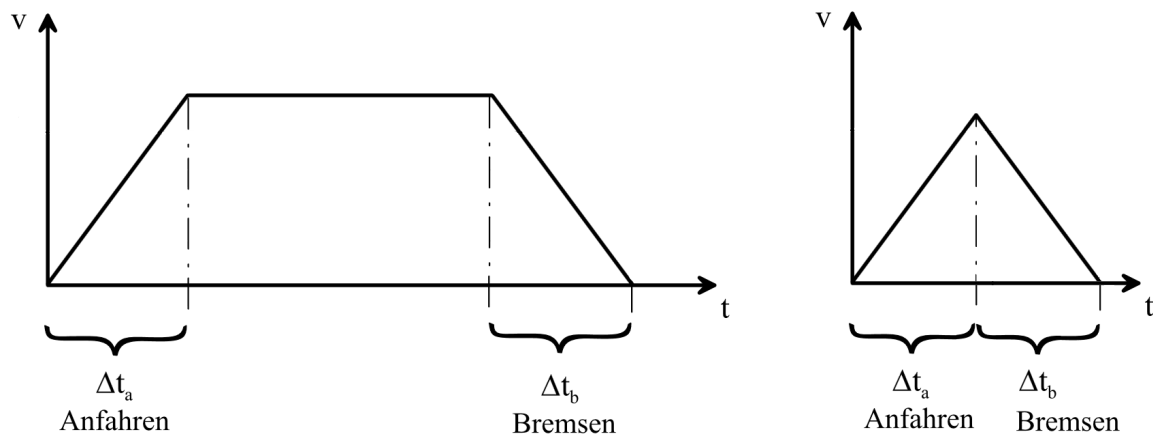


Abbildung 3.2: Trapezförmiger (links) und dreiecksförmiger (rechts) Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf in Anlehnung an ARNOLD/ FURMANS (2007)

Geschwindigkeitsverlauf vor (siehe rechte Hälfte der Abbildung).¹⁸⁴

Statische Berechnungsvorschriften lassen eine Berücksichtigung von Lagerstrategien nur unzureichend zu. Dynamische Ansätze zur Spielzeitberechnung basieren auf Simulationsmodellen von Lagermitteln und RBG, bei denen eine definierte Anzahl an Arbeitsspielen simuliert wird.¹⁸⁵ Aus den Simulationsergebnissen lassen sich Mittelwerte für die Dauer von Arbeitsspielen bilden. Dynamische Ansätze weisen den Vorteil auf, dass sich in den Simulationsmodellen detaillierte Angaben zu den verwendeten Lagerstrategien sowie zu den technischen Eigenschaften der Lager- und Fördermittel berücksichtigen lassen, weswegen im Rahmen dieser Arbeit die dynamische Spielzeitberechnung verwendet wird.

Energieeffizienz beschreibt eine Gegenüberstellung von erzieltm Nutzen und der dafür eingesetzten Energie. Energieeffizienz heißt, „einen gewünschten Nutzen [...] mit möglichst wenig Energieeinsatz herzustellen oder aus einem bestimmten Energieeinsatz möglichst viel Nutzen zu ziehen.“¹⁸⁶ In Anlehnung an die mikroökonomischen Betrachtungen in Abbildung 3.1 kann die Energieeffizienz eines Prozesses entweder dadurch erhöht werden, dass die zur Erreichung eines definierten *output* aufzuwendende Energie reduziert wird, oder dadurch, dass mit einer gleichbleibenden Energie ein höherer *output* generiert wird.

¹⁸⁴Vgl. ARNOLD/ FURMANS (2007, S. 202-205) sowie GUDEHUS (2010, S. 622f). In dieser Betrachtung wird vereinfacht von gleichen Werten für Beschleunigung und Verzögerung ausgegangen und beide Werte werden ohne Berücksichtigung des Rucks beschrieben. Zur Berücksichtigung des Rucks bei Fahrprofilen von RBG vgl. SCHULZ (2014, S. 63-84).

¹⁸⁵Vgl. Abschnitt 4.1.1.

¹⁸⁶MÜLLER/ ENGELMANN/ LÖFFLER *et al.* (2009, S. 2). In DIN V 18599-1 (2011, S. 12) wird Energieeffizienz als „Bewertung der energetischen Qualität von Gebäuden durch Vergleich der Energiebedarfskennwerte mit Referenzwerten [...] oder durch Vergleich der Energieverbrauchswerte mit Vergleichswerten [...]“ definiert. Dabei umschreibt ein Energiebedarf eine berechnete Energiemenge (S. 11), während ein Energieverbrauch eine gemessene Energiemenge darstellt. Diese Definition bezieht sich auf die Bewertung von Gebäuden, impliziert aber den notwendigen Vergleich zwischen unterschiedlichen Untersuchungsobjekten zur Feststellung der Rangfolge ihrer Energieeffizienz und stellt damit eine Anwendung des Minimum-Prinzips dar.

Im Bereich von aHRL wird dem Umschlag (siehe Formel 3.3) die Energieeffizienz gegenübergestellt, die die Anzahl an Ein- und/ oder Auslagerungen pro Energieeinheit beschreibt (siehe Formel 3.7):

$$\text{Energieeffizienz} = \frac{\text{Einlagerungen und/ oder Auslagerungen}}{\text{Energieeinheit}} \quad (3.7)$$

3.3 Optimierung der Energieeffizienz automatischer Hochregallager

3.3.1 Systematisierung der Ansätze

Die Optimierung der Energieeffizienz gemäß des Minimum-Prinzips würde je nach gewähltem Zeithorizont entweder den Energieeinsatz (*input*) zur Durchführung einer einzelnen Ein- oder Auslagerung (*output*) oder - bei langfristiger Ausrichtung - die mittlere Menge an Energieeinheiten pro Ein- und/ oder Auslagerung reduzieren. Im Sinne des Minimum-Prinzips gilt es demnach, einen definierten Nutzen mit einem möglichst geringen Energiebedarf zu erzielen.¹⁸⁷ Die EUROPÄISCHE KOMMISSION beschreibt Energieeffizienz als Anspruch, „weniger Energie für die Aufrechterhaltung eines gleichen Grades wirtschaftlicher Tätigkeit“¹⁸⁸ zu benötigen. Nach MÜLLER/ ENGELMANN/ LÖFFLER *et al.* lässt sich die einem System zur Erzielung eines definierten Nutzens zugeführte Energie durch folgende Maßnahmen in den drei Bereichen Energiezuführung, Verlustenergie und Nutzenergie reduzieren:¹⁸⁹

1. Im Bereich Energiezuführung: Substitution der eingesetzten Energieträger, Optimierung der Energieumwandlung/ -übertragung sowie Optimierung der Energiebereitstellung.
2. Im Bereich Verlustenergie¹⁹⁰: Reduktion der Verlustenergie, Energierückgewinnung (Netzurückspeisung von Bremsenergie aus elektrischen Antrieben) sowie Wieder- und Weiternutzung der Verlustenergie, z. B. der Abwärme von Betriebsmitteln als Heizungsunterstützung.

¹⁸⁷In VDI 4707-1 (2009, S. 4) wird zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten unterschieden, wobei „Bedarfs- werte berechnete Erwartungswerte sind, die auf bestimmten Vorgaben beruhen, während Verbrauchswerte tatsächliche, gemessene Verbräuche sind.“

¹⁸⁸EUROPÄISCHE KOMMISSION (Hrsg.) (2011, S. 2).

¹⁸⁹Vgl. MÜLLER/ ENGELMANN/ LÖFFLER *et al.* (2009, S. 72).

¹⁹⁰Der Energieverlust bezeichnet den nicht genutzten Teil der zugeführten Energie. Vgl. VDI 4661 (2003, S. 14f). Die Abgabe von Verlustenergie des RBG geschieht hauptsächlich durch Konvektion in Form von Wärme (Reibung, Blindleistung, Bremswiderstand), was insbesondere bei Kühllagern einem unerwünschten Energieeintrag in das Lager entspricht, der durch zusätzliche Kühlarbeit kompensiert werden muss. Maßnahmen zur Reduzierung der energetischen Verluste an RBG, Hubwagen und LAM sind also gerade in Kühllager-Szenarien von besonderer Bedeutung.

3. Im Bereich Nutzenergie: Verringerung der erforderlichen Nutzenergie, z. B. durch optimierte Auftrags- und Anlagensteuerung.

Der letzte Punkt zielt auf ein optimiertes Prozessmanagement sowie eine „zweckmäßige Betriebsführung“¹⁹¹ ab und steht im Fokus dieser Arbeit. Hierbei sind „stets ganzheitliche Betrachtung und Optimierung der gesamten Prozessketten und ihrer Wechselwirkungen“ wichtig, da „die einzelnen Prozessschritte und Bilanzebenen miteinander in Wechselwirkungen stehen“¹⁹². Im Bereich von aHRL bedeutet diese ganzheitliche Sichtweise, dass Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz des aHRL nicht zu einem energetischen Mehraufwand in anderen Betriebsbereichen führen dürfen.¹⁹³

Die zum Betrieb von RBG benötigte elektrische Energie wird dem System extern bereitgestellt.¹⁹⁴ Entsprechende Stromlieferverträge beinhalten neben allgemeinen Angaben zu Vertragsdauer, Tariftyp und Zahlungsmodalitäten zumeist Vereinbarungen zu Anschlussleistung, Jahreshöchstleistung, -verbrauch, Spannung, Frequenz, Lastgang (Leistung bei verschiedenen Betriebszuständen) und Toleranzen. Darüber hinaus werden Vergütungsmodalitäten festgehalten, zu denen neben einer Grundgebühr (Bereitstellungstarif) ein Arbeitspreis¹⁹⁵ pro Energieeinheit [kWh], eine Blindleistungsvergütung sowie ein Leistungspreis gehören, der beim Auftreten von definierten Leistungsspitzen eine Vergütung $[\frac{\text{EUR}}{\text{kW}}]$ angibt.¹⁹⁶ Zur Reduzierung des Strombedarfs ist die elektrische Leistung der eingesetzten Betriebsmittel sowie ihre Einschaltdauer zu reduzieren: Die Wirkarbeit $[\frac{\text{EUR}}{\text{kWh}}]$ ist dabei durch die Momentanleistung und die Betriebszeit; die Blindarbeit $[\frac{\text{EUR}}{\text{kvarh}}]$ durch die Blindleistung und die Betriebszeit beeinflussbar. Die Reduktion der Leistungsspitzen dient der Reduktion der Leistungsspitzenvergütung. Darüber hinaus kann beim Ausbleiben ausgeprägter Leistungsspitzen die Maximalleistung reduziert und die Energiebereitstellung geringer dimensioniert werden. Zudem kann der Strombedarf von Haupttarif-Zeiten in Nebentarif-Zeiten verschoben werden.¹⁹⁷

¹⁹¹KOENIGSDORFF/ BECKER/ FLOSS *et al.* (2010, S. 228f).

¹⁹²KOENIGSDORFF/ BECKER/ FLOSS *et al.* (2010, S. 228f). FREIS/ VOHLIDKA (2013) stellen einen Ansatz zur Bewertung der energetischen Wechselwirkungen zwischen intralogistischen Betriebsmitteln und dem Gebäude vor.

¹⁹³Nach SANTARIUS (2012, S. 5-8) rufen Verbesserungen der Energieeffizienz technischer Anlagen häufig eine Mehrnachfrage nach Energie hervor: So können z. B. die energetischen Vorteile des Austauschs von Glühlampen durch Energiesparlampen durch ein anschließend häufigeres „Brennenlassen“ des Lichts reduziert werden. Das gesamtwirtschaftliche Ausmaß dieser *rebound*-Effekte beziffern vier vom Autor untersuchte Metastudien auf mindestens 50 % der Einsparungen. Ähnlich BLES/ KESSLER (2013, S. 334f).

¹⁹⁴BRUNS/ GÜNTNER/ FURMANS (Hrsg.) *et al.* ermitteln die Umweltauswirkungen von Fördermitteln (z. B. von RBG), zu denen neben dem beispielsweise in Luftemissionen und Ressourcenverbrauch umgerechneten Energiebedarf auch Bodenemissionen, Wasseremissionen und entstehender Abfall zählen. Vgl. BRUNS/ GÜNTNER/ FURMANS (Hrsg.) *et al.* (2013) sowie SCHILLING/ BRUNS/ AMBERGER *et al.* (2014).

¹⁹⁵Der Arbeitspreis kann im Tagesverlauf variieren.

¹⁹⁶Darüber hinaus werden Modalitäten zu Umlagen, Steuern sowie Netznutzungsentgelten und ggf. ein Blindleistungsanteil festgelegt. Vgl. BÖNING (2013, S. 8).

¹⁹⁷Vgl. BÖNING (2013, S. 9 und 13) sowie MÜLLER/ ENGELMANN/ LÖFFLER *et al.* (2009, S. 96 und 107f).

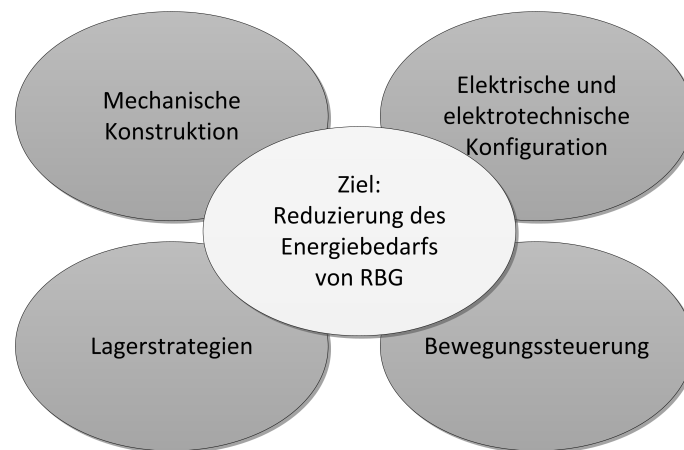


Abbildung 3.3: Ansatzpunkte zur Reduzierung des Energiebedarfs von RBG (eigene Darstellung)

RBG zeichnen sich durch einen hohen Anteil benötigter mechanischer Nutzenergie aus. Gründe hierfür sind hohe bewegte Massen und hohe kinematische Parameter der durchgeführten Ein- und Auslagerungen. Daher eignen sich die folgenden Maßnahmen, um die notwendige mechanische Energie zu verringern:¹⁹⁸

- Minderung der Masse von bewegten Körpern,
- Reduktion der Radien von rotierenden Körpern,
- Verringerung der Reibung,
- Minderung der Geschwindigkeit von bewegten Körpern,
- Energierückspeisung oder -weaternutzung sowie
- Verkürzung der Wege, die ein Körper zurücklegen muss.

Die genannten Punkte dienen der Optimierung der Energieeffizienz von aHRL und lassen sich zur Umsetzung in die Kategorien „mechanische Konstruktion“, „elektrische und elektrotechnische Konfiguration“, „Bewegungssteuerung“ und „Lagerstrategien“ gliedern (siehe Abbildung 3.3). Dabei wird dem Umstand Rechnung getragen, dass sich alle genannten Maßnahmen auf die RBG im aHRL fokussieren. Nachfolgend werden die Kategorien spezifiziert.

¹⁹⁸Vgl. MÜLLER/ ENGELMANN/ LÖFFLER *et al.* (2009, S. 106). Durch eine optimale Antriebsdimensionierung, eine effiziente Antriebstechnik (z. B. durch den Einsatz frequenzgesteuerter Motoren) oder eine Abschaltung temporär nicht benötigter Motorenden können die Transformationsverluste von elektrischer in mechanische Energie generell verringert werden. Nach SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012, S. 2) eignen sich Elektromotoren hoher Energieeffizienzklassen (IE2 und 3) aufgrund ihres hohen Anfahrmoments nicht für RBG.

3.3.2 Mechanische Konstruktion

Im Bereich der mechanischen Konstruktion können die Minderung der Masse bewegter Körper, die Reduktion der Radien rotierender Körper sowie die Verringerung der Reibung zur Senkung des Energiebedarfs von RBG beitragen.

Massenreduktionen lassen sich beispielsweise beim RBG-Masten, dem Hubwagen oder dem LAM realisieren. Nachteilig für die Gesamtenergieeffizienz von aHRL wirkt sich das ungünstige Totlastverhältnis von RBG aus (siehe Formel 3.8). Die Totmasse umfasst dabei alle Massen des RBG, die bei einer Ein- oder Auslagerung zusätzlich zur jeweiligen Nutzlast bewegt werden müssen¹⁹⁹:

$$\text{Totlastverhältnis} = \frac{\text{Nutzmasse}}{\text{Nutzmasse} + \text{Totmasse}} \quad (3.8)$$

Bei einer RBG-Masse (Totmasse) von 16,8 t und einer LE-Masse (Nutzmasse) von 750 kg ergibt sich für die Fahrbewegung ein Totlastverhältnis von 0,043. Die Reduzierung der Totmasse bewirkt eine geringere Energieaufnahme zur Erreichung der Nenngeschwindigkeit des RBG. Zudem wird die Radlast gesenkt, was bei einem konstanten Reibungskoeffizienten zu einer Reduktion der Reibungsenergie führt. Daher wird versucht, die Eigenmasse von RBG, insbesondere der Masten, durch Leichtbau zu reduzieren, um die Totmasse zu minimieren. Ein entsprechender Ansatz wird von FURMANS/ LINSEL vorgestellt. Infolge hoher finanzieller Aufwände von Leichtbaumaßnahmen verweisen die Autoren jedoch auf die lange Amortisationsdauer von Leichtbau-Masten.²⁰⁰

GÜNTNER/ SCHIPPLICK/ ERTL *et al.* untersuchen den Einsatz eines Gegengewichts zum Hubwagen, um die Hublast bei Hebebewegungen zu senken. Das Gegengewicht hat dabei die Masse des Hubwagens plus der halben Nutzlast und erhöht damit die zu beschleunigende Masse bei Fahrbewegungen des RBG. In simulativen Untersuchungen können für aHRL Einsparungen in Höhe von 27-35 % der eingebrachten Energie erzielt werden. Bei einem ebenfalls untersuchten automatischen Kleinbehälterlager²⁰¹ (AKL) beträgt die Einsparung 8-10 %.²⁰²

Zur Reduktion der Rotationsradien bewegter Körper werden von WEHKING/ ERNST Optimierungen an den Hubseilen und den Umlenkrollen von RBG präsentiert. Der Ersatz von Stahlseilen durch Kunststoffseile im Hubwerk ermöglicht eine Reduktion des Radius' und des Trägheitsmoments J der Umlenkrolle. Die sich ergebenden energetischen

¹⁹⁹Vgl. MARTIN (2009, S. 115).

²⁰⁰Vgl. FURMANS/ LINSEL (2011, S. 23f). Ein ähnlicher Ansatz wird von ERTL/ GÜNTNER/ FISCHER *et al.* (2012) vorgestellt.

²⁰¹Auch als automatisches Kleinteilelager bezeichnet.

²⁰²Vgl. GÜNTNER/ SCHIPPLICK/ ERTL *et al.* (2011a, S. 328). Die eingebrachte Energie umfasst nach Aussage der Autoren die Hub- und Fahrbewegung, den Lastwechsel sowie die Grundlast. Das Simulationsmodell ist dabei in MATLAB/ SIMULINK implementiert. Vg. ERTL/ GÜNTNER/ FISCHER *et al.* (2012, S. 65).

Einsparpotentiale gehen einher mit der Möglichkeit, den Antriebsstrang geringer zu dimensionieren und den oberen Totraum zu reduzieren.²⁰³

Reibungen können z. B. bei Umlenkungen, Lagern und in den Antriebselementen verringert werden. SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK geben einen energetischen Wirkungsgrad von 80 % bei einem AKL an, d. h. 80 % der aufgenommenen elektrischen Energie wird in kinetische Energie des RBG umgesetzt.²⁰⁴ Die Autoren schlagen zudem vor, den EP vertikal nach oben zu setzen und die LE dorthin mit einem energieeffizienten Vertikalförderer durchzuführen. Der AP sollte hingegen in einer unteren Zeile der Regalwand verbleiben. Untersuchungen bezüglich entsprechender Lagerstrategien²⁰⁵ oder zur Bewertung der energetischen Effekte dieser Maßnahme erfolgen jedoch nicht.²⁰⁶

3.3.3 Elektrische und elektrotechnische Konfiguration

Maßnahmen zur energetischen Optimierung von RBG im Bereich der elektrischen und elektrotechnischen Konfiguration umfassen die Zwischenkreiskopplung, die Energierückspeisung sowie die Energiespeicherung.²⁰⁷ Ziel dabei ist es, frei werdende Energie, die von den verbauten Antrieben im Generatormodus (z. B. beim Senken einer Last oder beim Verzögern) erzeugt wird, weiterzuverwenden.

Durch eine Zwischenkreiskopplung von Fahr- und Hubantrieb kann, wenn einer der Antriebe im Generatorbetrieb agiert, die erzeugte Energie dem anderen Antrieb zur Verfügung gestellt werden. So wird z. B. beim Absenken einer Last die generierte Energie in Fahrenergie des Fahrmotors umgewandelt. Werden Umrichter im Zwischenkreis gekoppelt, sind mehrere Gleichstromzwischenkreise zusammengeschaltet.²⁰⁸

Generierte Energie, die vom RBG nicht benötigt wird, kann in das Netz zurückgespeist werden. Hierfür werden eine Rückspeiseeinheit, bestehend aus einem Wechsel- und einem Gleichrichter, sowie eine Umrichtereinheit, bestehend aus einem Wechselrichter, eingesetzt. Der Zwischenkreis der Umrichtereinheit wird direkt mit der Spannung des Netzurückspeisemoduls versorgt.²⁰⁹ SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK können bei einem im Jahr 2010 errichteten Labor-AKL Rückspeiseraten von 45-60 % beim Fahr- und 60-70 %

²⁰³Vgl. WEHKING/ ERNST (2010).

²⁰⁴Vgl. SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012, S. 4).

²⁰⁵Vgl. Abschnitt 3.3.5.

²⁰⁶Vgl. SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012, S. 5).

²⁰⁷Darüber hinaus lassen sich auch Optimierungen am Antriebssystem durchführen, zu denen z. B. die richtige Dimensionierung des Motors, der Einsatz effizienter Motoren und Getriebe sowie der Einsatz von Frequenzumrichtern gehören. Vgl. BLESL/ KESSLER (2013, S. 48).

²⁰⁸Hierzu entnimmt der Energie benötigende Antrieb zur Verfügung stehende Energie aus dem Gleichstrom-Zwischenkreis, der sich zwischen Gleich- und Wechselrichter befindet. Die generatorische Energie durchläuft anschließend einen Wechselrichter und wird dem Antrieb zur Verfügung gestellt. Nach SCHUMACHER (2012, S. 226) lassen sich durch eine Zwischenkreiskopplung die Herstellungskosten eines RBG senken, da nur noch ein Bremswiderstand (statt zwei) für das Antriebssystem benötigt wird.

²⁰⁹Vgl. HESSELBACH (2012, S. 185f) sowie KIEL (Hrsg.) (2007, S. 151-159).

beim Hubantrieb messen, d. h. 45-60 % bzw. 60-70 % der errechneten mechanischen Energie konnte als elektrische Energie rückgespeist werden.²¹⁰

Energiespeicher weisen den Nachteil auf, dass sie nur Gleichstrom speichern können. Somit muss überschüssiger Drehstrom erst verlustbehaftet gleichgerichtet werden, bevor er in Akkumulatoren oder Kondensatoren gespeichert werden kann. Ein mitgeführter Energiespeicher erhöht zudem die Totmasse des RBG.

3.3.4 Bewegungssteuerung

Die Fahrsteuerung umfasst alle Freiheitsgrade der Bewegung des RBG, legt also Bewegungsparameter in x-Richtung (Fahrtrichtung), in y-Richtung (Hubrichtung) sowie in z-Richtung (Bewegung zwischen den Gassen bei nicht gassengebundenen RBG bzw. Ein- und Ausfahren des/ der LAM) fest.²¹¹ Vor allem die Festlegung der zweidimensionalen Bewegung in x- und y-Richtung kann genutzt werden, um den Energiebedarf, den Verschleiß, das Schwingungsverhalten und die Spielzeiten optimal zu gestalten. Durch die zeitvariable Bestimmung der Bewegungsparameter in x- und y-Richtung wird die Bahnkurve des RBG determiniert. Die entsprechende Programmierung der Steuerung erlaubt es, die Bewegungsparameter Geschwindigkeit v und Beschleunigung a in x- und y-Richtung an die momentane Belastung anzupassen (belastungsorientierte Regelung), um den Energiebedarf und den mechanischen Verschleiß zu reduzieren.²¹² Die Belastung umfasst dabei sowohl mechanische Lasten²¹³ als auch geforderte Umschläge. Die Anpassung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen erfordert Eingriffe in die Steuerung von Fahr- und Hubbewegung und beeinflusst direkt die erzielten Spielzeiten. Eine Reduktion der Geschwindigkeiten und der Beschleunigungen hat damit eine Verringerung des maximal möglichen Umschlags des RBG und damit des aHRL zur Folge.

SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK weisen experimentell die zu erwartende Reduktion des Energiebedarfs von RBG bei verringerter Fahrgeschwindigkeit nach.²¹⁴ Darüber hinaus wurden unterschiedliche Geschwindigkeiten des Hubwerks untersucht: Hier ergaben sich

²¹⁰Vgl. SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012, S. 3). SCHUMACHER (2012, S. 225) nennt Rückspeiseraten von bis zu 60 % beim Hub- und „knapp unter 50 %“ beim Fahrtrieb, jeweils bezogen auf die aufgewendete Energie. Von SCHMIDT/ SCHULZE (2011, S. 153) ausgewertete Quellen beziffern die Rückspeiseraten auf 32-59 %.

²¹¹Vgl. VDI 2681 (1993, S. 2).

²¹²Vgl. TEN HOMPEL (Hrsg.)/ HEIDENBLUT (2011, S. 28).

²¹³Nach DIN 15350 (1992, S. 5) wirken Hauptlasten (Eigen-, Hublasten, Massenkräfte aus betriebsmäßigen Bewegungen und statische Führungskräfte), Zusatzlasten (Schräglauf, Temperatureinwirkungen, Lasten auf Laufstegen, Treppen, Podesten und Geländern) und Sonderlasten (Pufferkräfte, Prüf-, Fanglasten und Lasten aus Notbremsungen) auf das Tragwerk eines RBG.

²¹⁴Vgl. SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012, S. 7), SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012a, S. 3) sowie SCHULZ/ MAHRENHOLZ/ ZADEK (2013, S. 177-179). Ähnlich ERTL/ HABENICHT/ GÜNTNER (2014 und 2014a), die bei energiebedarfsminimierenden Fahrgeschwindigkeiten eine Einsparung von bis zu 33 % des Energiebedarfs im Vergleich zur durchsatzmaximierenden Fahrgeschwindigkeit erzielen. Die Spielzeit der durchgeführten Doppelspiele erhöht sich dabei jedoch um bis zu 41 % (2014a, S. 139).

jedoch kaum Unterschiede.²¹⁵ Der Einfluss verringerter kinematischer Parameter auf den Verschleiß von RBG wurde jedoch nicht untersucht.

Im Abschnitt 3.2 wurde auf die Überlagerung der Bewegung in x- und y-Richtung eingegangen, die bei der Anfahrt jedes LP einer Regalwand entsteht. Da die Fahrzeit durch eine der beiden Bewegungen bestimmt wird²¹⁶, erreicht die nicht-zeitbestimmende Bewegung bei einem gleichen Bewegungsbeginn ihre Sollposition bereits vor Ende der wirksamen Fahrzeit. MENEGHETTI/ MONTI weisen in diesem Zusammenhang auf mögliche Maßnahmen hin, um den zeitlichen Leerlauf des Antriebs der nicht-zeitbestimmenden Achse zu nutzen. Im Wesentlichen lassen sich drei Handlungsmöglichkeiten, die auch kombiniert werden können, unterscheiden:

1. Späterer Beschleunigungsbeginn, um gleichzeitiges Anfahren, d. h. überlagerte Leistungsspitzen, zu vermeiden,
2. kürzere Beschleunigungsdauer bei gleichbleibender Nennbeschleunigung, um auf eine geringere Endgeschwindigkeit zu beschleunigen, sowie
3. geringere Nennbeschleunigung bei verlängerter Beschleunigungsdauer, um die Leistungsaufnahme in der Beschleunigungsphase zu reduzieren.

Im ersten Fall, d. h. bei einer Synchronisierung der Endzeitpunkte der horizontalen und der vertikalen Bewegung, verringert sich nach Untersuchung der Autoren die mittlere Energie zur Durchführung der Ein- und Auslagerungs-Einzelspiele über alle LP der untersuchten Regalwand des aHRL um 28 %.²¹⁷ Bei einer kürzeren Beschleunigungsdauer (zweiter Fall) verlängert sich bei einem trapezförmigen Geschwindigkeitsverlauf²¹⁸ die Fahrzeit mit konstanter Geschwindigkeit. Um bei gleichzeitigem Beginn und gleichem Ende der Simultanbewegungen die notwendige Beschleunigungsdauer der nicht-zeitbestimmenden Bewegung zu ermitteln, muss nachfolgendes Gleichungssystem gelöst werden (siehe Formeln 3.9 und 3.10). Dabei bezeichnet s_y den Hubweg, a_y die Hubbeschleunigung, $t_{a,y}$ die Beschleunigungsdauer, $t_{r,y}$ die Zeit, in der mit Nenngeschwindigkeit gefahren wird, und t_x die gesamte Fahrzeit in x-Richtung.²¹⁹

$$s_y = 0,5 \cdot a_y t_{a,y}^2 \cdot 2 + a_y t_{a,y} t_{r,y} \quad (3.9)$$

²¹⁵Vgl. SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012a, S. 5).

²¹⁶Eine Ausnahme bildet hier die Anfahrt von LP auf der Synchronfahrgeraden des RBG.

²¹⁷Vgl. MENEGHETTI/ MONTI (2011a, S. 4).

²¹⁸Siehe Abbildung 3.2.

²¹⁹Vgl. MENEGHETTI/ MONTI (2011a, S. 3). Ähnlich SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012a, S. 7), wobei die Autoren nicht auf die Arbeiten von MENEGHETTI/ MONTI (2011a) eingehen. SCHULZ (2014, S. 96f) stellt ein verfeinertes Kalkül vor, das im Gegensatz zu den Arbeiten von MENEGHETTI/ MONTI nicht von einer konstanten Beschleunigung ausgeht, sondern den Ruck explizit in die Berechnungen integriert. Dabei stellt er fest, dass sich lediglich bei Anpassung der Fahrzeit an die zeitbestimmende Hubzeit Energieeinsparungen realisieren lassen (S. 98f), während eine Anpassung der Hubzeit an die zeitbestimmende Fahrzeit zu keinen signifikanten energetischen Veränderungen führt (S. 100).

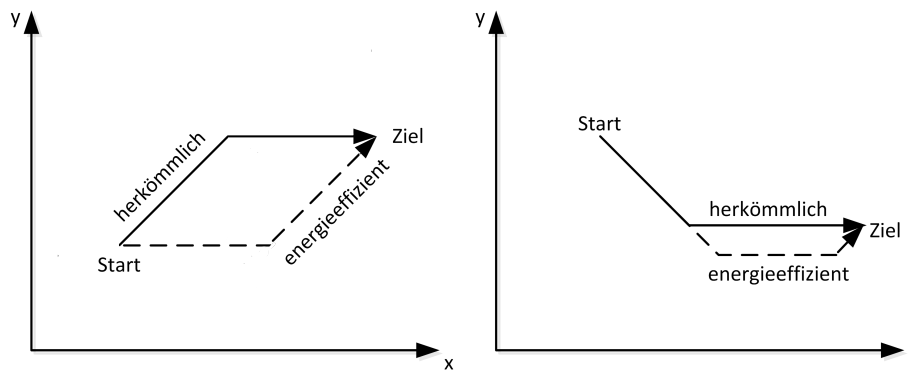


Abbildung 3.4: Bahnkurven bei Zwischenkreiskopplung nach ERTL/ GÜNTNER (2013)

$$t_x = 2t_{a,y} + t_{r,y} \quad (3.10)$$

In diesem Kalkül wird angenommen, dass $t_x > t_y$ gilt, d. h. die Horizontalbewegung ist zeitbestimmend.²²⁰ Wenn nun die Beschleunigungsdauer berechnet werden soll, so sind die Werte s_y , t_x und a_y gegeben und die Werte für $t_{a,y}$ und $t_{r,y}$ müssen berechnet werden.²²¹ Durch die reduzierte Geschwindigkeit sinkt die kinetische Energie, die v. a. beim Beschleunigen in x-Richtung eingebracht werden muss.

ERTL/ GÜNTNER weisen darauf hin, dass die Ausstattung eines RBG mit einer Zwischenkreiskopplung eine Adaption der Bahnkurve erforderlich macht, um den Energieausgleich zwischen Fahr- und Hubantrieb wirkungsvoll einzusetzen (siehe Abbildung 3.4²²²).

Dabei wird beim Anfahren eines höher liegenden LP das Ende der Fahr- und Hubbewegung synchronisiert, so dass während der Bremsphase des Fahrantriebs, in der der Antrieb im Generatormodus arbeitet, ein Energiebedarf des Hubantriebs vorliegt („Hubzeitverzögerung“, siehe linke Seite der Abbildung 3.4²²³). Beim Anfahren eines niedriger gelegenen LP wird ein Absenken des Hubwagens unter die Höhe des Ziel-LP vorgeschlagen, um dem Fahrtrieb während der Senkphase des Hubwagens Energie bereitstellen zu können und um vom oben beschriebenen Energieausgleich während des Abbremsvorgangs des Fahrantriebs zu profitieren („Badewanne“, siehe rechte Seite der Abbildung 3.4). Die durch Adaption der Bahnkurve möglichen Energieeinsparungen für eine Bewegung zwischen zwei LP beziffern ERTL/ GÜNTNER auf bis zu 9%.²²⁴ In einer späteren Veröffentlichung sprechen GÜNTNER/ HABENICHT noch von Energieeinsparungen von maximal 6,9% durch Einsatz der Hubzeitverzögerung bzw. von maximal 2,6% Einsparung beim Einsatz der

²²⁰Ist die Vertikalbewegung zeitbestimmend, so sind die Variablen x und y zu tauschen.

²²¹Soll der Beschleunigungswert reduziert werden (Handlungsmöglichkeit #3), sind die Gleichungen entsprechend umzustellen.

²²²Bildquelle: ERTL/ GÜNTNER (2013, S. 27).

²²³Vgl. die Ausführungen über MENEGHETTI/ MONTI (2011a) weiter oben.

²²⁴Vgl. ERTL/ GÜNTNER (2013) sowie GÜNTNER/ SCHIPPLICK/ ERTL *et al.* (2011 und 2011a).

„Badewanne“, wobei diese Einsparungen lediglich bei AKL-RBG mit Zwischenkreiskopplung gelten. Im Falle eines aHRL-RBG tritt jedoch ein Energiemehrbedarf von bis zu 3,9 % ein. Ist das RBG zusätzlich mit einer Energierückspeiseeinheit ausgestattet, sinken auch beim AKL-RBG die Einsparpotentiale deutlich.²²⁵

BÖNING stellt einen Ansatz vor, um durch optimierte Reihenfolgeplanung von Aufträgen Leistungsspitzen zu vermeiden. Dabei zielt der Algorithmus auf eine Nivellierung der Leistungsaufnahme bei der Nutzung von Fertigungsmaschinen ab. Als Zielfunktion wird eine Minimierung der Energie- und der Logistikkosten (Maschinenleerzeit-, Bestands- und Zwischenpufferungskosten) angestrebt. Durch Einbeziehung der Logistikkosten sollen die Nachteile einer alleinigen energetischen Optimierung vermieden werden. Zur Bestimmung einer optimalen Reihenfolgeplanung wird ein hybrider genetischer Algorithmus verwendet.²²⁶ Zur Prognose der Energiebedarfe der modellierten Maschinen werden mittlere Leistungsaufnahmen über 15 Minuten gewählt. Dieses Vorgehen ist jedoch nur bei Maschinen mit geringen Schwankungen der Leistungsaufnahme innerhalb dieser Periode ratsam. Schwanken die Leistungsaufnahmen bereits im Bereich von Sekunden oder Sekundenbruchteilen, so erhöhen sich die Anzahl der Planungsperioden sowie die Rechenlast. Im Bereich von aHRL könnte der erarbeitete Algorithmus zur Reduktion von Leistungsspitzen beim Anfahren von RBG verwendet werden. Hierfür ist jedoch eine erhebliche Reduktion des Planungshorizonts notwendig, was die Berechnungsdauer zur Erzielung einer Belegungsplanung deutlich verlängert.

3.3.5 Lagerstrategien

3.3.5.1 Funktionen von Lagerstrategien Um den effizienten Betrieb von aHRL gemäß den vordefinierten Zielen zu gewährleisten, können Lagerstrategien²²⁷ angewendet werden. Hierbei handelt es sich um Betriebsstrategien in Materialflusssystemen, die von BRANDES als „heuristische Entscheidungsregeln, die die Ableitung von Operationsanweisungen bei der Verknüpfung logistischer Objekte mit logistischen Subjekten mit dem Ziel der Optimierung der Erfüllung der logistischen Aufgabe beschreiben“²²⁸, definiert werden.

²²⁵Vgl. GÜNTNER/ HABENICHT (2013, S. 76-79 und 104). Für diese Werte wurden jeweils 1.000 Doppelspiele ausgewertet. Die Autoren führen des Weiteren an, dass sich durch eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeiten deutliche Energieeinsparungen realisieren lassen. Dabei erfolgt jedoch kein Verweis auf die o. g. Vorarbeiten von MENEGHETTI/ MONTI (2011a). SCHUMACHER (2012, S. 226) beziffert die energetischen Einsparungen durch Abgleich der Anfahrzeitpunkte des Fahr- und Hubantriebs im Rahmen einer „intelligenten Zwischenkreiskopplung“ auf bis zu 25 %.

²²⁶Vgl. BÖNING (2013).

²²⁷Engl. *storage policies*.

²²⁸BRANDES (1997, S. 30). Nach STREIM (1975, S. 151f) besitzt eine Heuristik drei konstituierende Merkmale: (1) Die Verfahren verwenden nichtwillkürliche Entscheidungsoperatoren, (2) potentielle Lösungen werden aufgrund dieser Operatoren vom Suchprozess ausgeschlossen und (3) es fehlt ein Konvergenzbeweis, weshalb keine Lösungsgarantie im Sinne des Auffindens einer Optimallösung gegeben werden kann. Zudem besitzt eine Heuristik drei akzessorische Merkmale: (1) Es werden subjektiv festgesetzte Abbruchkriterien verwendet, (2) es existieren in der Regel Steuerungsmöglichkeiten und (3) Heuristiken,

Lagerstrategien in aHRL umfassen die folgenden Funktionen:²²⁹

1. Einlagerung²³⁰:
 - (a) Ladungsträgerzuordnung²³¹,
 - (b) Gassenzuordnung²³²,
 - (c) LP-Zuordnung²³³,
2. LE-Auswahl bei Auslagerung²³⁴,
3. Umlagerung²³⁵,
4. Reihenfolgebildung²³⁶:
 - (a) Erfassung der Aufträge für Ein- und Auslagerungen²³⁷,
 - (b) Auswahl der Warteschlange (Ein- oder Auslagerungen)²³⁸,
 - (c) Reihenfolgebildung innerhalb der beiden Warteschlangen²³⁹,
 - (d) Dringlichkeitsregeln²⁴⁰,
5. Befehlszyklus der Fördermittel²⁴¹:
 - (a) Spielbildung²⁴²,
 - (b) Verweilpunkt²⁴³,

Diese Darstellung der Funktionen folgt keinem konsekutiven Ablauf. Vielmehr existieren zwischen den Funktionen vielfältige Abhängigkeiten²⁴⁴, die in den nachfolgenden Abschnitten thematisiert werden.

die für Extremwertaufgaben konzipiert sind, betrachten im Allgemeinen besonders das Kriterium der Zuverlässigkeit eines Ergebnisses.

²²⁹Vgl. BRANDES (1997, S. 81-162), HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 629), LINN/ WYSK (1990, S. 38f), ROODBERGEN/ VIS (2009, S. 345f), VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000, S. 1342-1346), VASIL/ TANG/ VASIL (2012, S. 168f) sowie WANG/ YIH (1997, S. 489).

²³⁰Engl. *storing*.

²³¹Engl. *pallet assignment*.

²³²Engl. *aisle assignment*.

²³³Engl. *storage location assignment*.

²³⁴Engl. *retrieval location selection*.

²³⁵Engl. *restoring*.

²³⁶Engl. *request sequencing*.

²³⁷Engl. *job queueing*.

²³⁸Engl. *queue selection*.

²³⁹Engl. *job sequencing within queue*.

²⁴⁰Engl. *urgency rules*.

²⁴¹Engl. *stacker mode*.

²⁴²Engl. *command cycle*.

²⁴³Engl. *dwell point*.

²⁴⁴BRANDES (1997, S. 163-171) stellt die Abhängigkeiten zwischen einigen der nachfolgend beschriebenen Lagerstrategien dar und schlägt darauf aufbauend eine Reihenfolge für die Einbeziehung der Lagerstrategien zur Erfüllung der o. g. Funktionen dar.

3.3.5.2 Einlagerung

3.3.5.2.1 Ladungsträgerzuordnung Grundsätzlich lassen sich auf einem Ladungsträger unterschiedliche Artikel in der jeweiligen Menge anordnen. Im Falle von mehr als einem Artikel auf dem Ladungsträger ist eine Strategie festzulegen, nach welchen Regeln die Artikel determiniert werden, die auf einem Ladungsträger zusammengefasst werden sollen. Mögliche Kriterien hierzu sind die Mindesthaltbarkeitsdaten bei verderblichen Waren oder die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Auslagerung mehrere auf dem Ladungsträger angeordnete Artikel gleichzeitig nachgefragt werden. Durch Anordnung mehrerer Artikel auf einem Ladungsträger (Mischpalette oder -behälter) kann der Stellplatzbedarf im Lagersystem gegenüber sortenreinen Paletten reduziert werden. Negative Auswirkungen auf den Umschlag des aHRL sind dem jedoch gegenüberzustellen. In der Literatur wird die Ladungsträgerzuordnung meist aus der Perspektive des Packproblems, jedoch nicht als explizite Lagerstrategie behandelt.²⁴⁵

3.3.5.2.2 Gassenzuordnung Bei mehrgassigen aHRL ist die Zielgasse für eine eingehende LE zu bestimmen. Die Gassen unterscheiden sich in der Entfernung vom Ein- und Ausgang der Lagervorzone, den freien LP und dem Ist-Bestand an Artikeln der eingehenden LE. Darüber hinaus können sich die Gassen in ihrer technischen Ausstattung sowie in ihrer organisatorischen Funktion unterscheiden: Zur technischen Ausstattung gehören beispielsweise die Abmessungen, die Fahrparameter der RBG sowie die Brandschutz- oder die Klimatisierungseinrichtungen. Die organisatorische Funktion kann beispielsweise festlegen, dass bestimmte Gassen für Schnellläufer oder für Sicherheitsbestände reserviert werden.

Strategien zur Gassenzuordnung wurden bisher in der Literatur nur selten behandelt. Grundsätzlich ist aus den vorhandenen Gassen zunächst eine Menge an zulässigen Gassen für die einzulagernde LE auszuwählen, aus der in einem zweiten Schritt eine optimale Gasse bestimmt werden muss.

Zulässige Gassen ergeben sich aus den vorgenannten technischen und organisatorischen Restriktionen der Gassen. So kann eine LE im Falle heterogener LP-Größen nur in bestimmten Gassen einlagerbar sein. Zur Auswahl einer zulässigen Gasse können die Strategien freie Gassenwahl, exklusive Zonen und feste Zuordnung genutzt werden. Bei exklusiven Zonen kann beispielsweise in Kühl- und Nichtkühlbereiche eines aHRL unterschieden werden. Bei einer festen Zuordnung können Artikel mit hohen Umschlaghäufigkeiten in Schnellläufergassen zusammengefasst werden, die ggf. durch ein RBG mit höherem maximalen Umschlag bedient werden.

Bei der Auswahl einer optimalen Gasse aus der Menge an zulässigen Gassen kann z. B.

²⁴⁵Vgl. GUDEHUS (2010, S. 426-437).

eine Zufallsauswahl durchgeführt werden. Des Weiteren können Gassen bevorzugt werden, die nahe am Ausgang der Lagervorzone liegen, um die Bereitstellzeiten der LE bei Auslagerungen zu verringern. Darüber hinaus kann die Querverteilung angewendet werden: Dabei werden die LE eines Artikels in verschiedenen Gassen gelagert, um die Verfügbarkeit des Artikels bei Ausfall einer Gasse zu gewährleisten. Zudem kann die Bereitstellzeit eines Artikels durch parallele Ein- und Auslagerung verringert werden.²⁴⁶ Des Weiteren können eingehende LE derart auf die Gassen verteilt werden, dass die Pufferkapazitäten der Einlagerungsstiche der jeweiligen Gassen nicht überschritten werden, um Staueffekte in der Lagervorzone zu vermeiden.²⁴⁷

3.3.5.2.3 Lagerplatzzuordnung Die freien LP einer Gasse unterscheiden sich in ihrer Verfügbarkeit (frei, vorreserviert oder belegt), im horizontalen und vertikalen Abstand zum Übergabepunkt (EP/AP) und damit in der Zeit, die das RBG zum Anfahren des jeweiligen LP benötigt²⁴⁸, und ihren konstruktiven Merkmalen, z. B. Massebegrenzungen und Abmessungen.²⁴⁹ Bei der LP-Zuordnung ist für eine eingehende LE aus einer Anzahl n an freien LP einer Gasse der nach definierten Kriterien optimale LP auszuwählen. Je nach den Anforderungen der LE an den LP²⁵⁰ kann es zu Inkompatibilitäten kommen, so dass bei der LP-Zuordnung für jede LE zunächst zulässige LP ermittelt werden müssen. Anschließend kann aus den zulässigen Optionen ein nach definierten Kriterien optimaler LP ausgewählt werden.²⁵¹

Als Bewertungskriterium zur LP-Auswahl wird meist die zur Einlagerung notwendige Fahrzeit herangezogen.²⁵² Das somit entstehende Zuordnungsproblem kann häufig nicht analytisch optimal gelöst werden, da die Größe realer Lager und die Menge an Ein- und Auslagerungen pro Periode die Modellkomplexität massiv erhöhen und inakzeptable Rechenzeiten verursachen.²⁵³ Dabei wird das Problem der LP-Zuordnung als *offline*-Problem behandelt, d. h. die Problemstellung ändert sich nicht, während die Lösung vollständig

²⁴⁶Vgl. TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 32).

²⁴⁷Vgl. BRANDES (1997, S. 147-149).

²⁴⁸Im Folgenden wird die Fahrzeit des RBG vom EP zum LP sprachlich dem LP zugeordnet, daher ist z. B. von „schnellen“ oder „langsamen“ LP die Rede. Vgl. VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000, S. 1343).

²⁴⁹Vgl. GLASS (2008, S. 23f).

²⁵⁰Nach BRANDES (1997, S. 84, nach BAUMGARTEN/ BÖCKMANN/ GAIL (1978)) ergeben sich die Anforderungen der LE an den LP aus ihren Eigenschaften, zu denen beispielsweise die Artikelnummer, die physischen Eigenschaften (z. B. Masse), das Gefährdungspotential, das Produktions- bzw. Zugangsdatum oder die voraussichtliche Verweildauer gehören.

²⁵¹Vgl. VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000, S. 1342).

²⁵²Vgl. GOETSCHALCKX (2012, S. 34f). Die Fahrzeiterparnisse der einzelnen Strategien können nicht direkt in Umschlagsteigerungen umgerechnet werden, da fixe Spielzeitanteile, z. B. bei der LE-Abgabe, durch Lagerstrategien nicht reduziert werden können.

²⁵³Die mathematischen Optimierungsmodelle werden als Lagermodelle (Engl. *storage model*) bezeichnet. Vgl. GOETSCHALCKX (2012, S. 34f sowie S. 39). Der Autor bietet eine Übersicht über bestehende analytische Modelle und Einlagerungen. Vgl. GOETSCHALCKX (2012, S. 34-50).

umgesetzt wird.²⁵⁴ Daneben existieren unterschiedliche heuristische Lösungsverfahren, die gemeinhin als Strategien zur LP-Zuordnung bezeichnet werden. Diese Heuristiken generieren zwar nicht zwangsläufig optimale LP-Zuordnungen, lassen sich jedoch einfach in bestehende Systeme zur Lagersteuerung implementieren.²⁵⁵ Die nachfolgend vorgestellten Heuristiken behandeln die LP-Zuordnung als *online*-Problem, d. h. nur ein Teil der Informationen über den Planungszeitraum ist zum Zeitpunkt der LP-Zuordnung bekannt.²⁵⁶ Etablierte Strategien zur Anordnung von LE in Regalwänden lassen sich anhand von sechs Kriterien klassifizieren:²⁵⁷

- Erstes Kriterium ist die Anzahl disjunkter²⁵⁸ Zonen, in die eine Regalwand untergliedert wird: Eine Zone entspricht einer Menge von LP, denen LE mit bestimmten Attributsausprägungen zugeordnet werden können. Die Bandbreite reicht von einer einzelnen Zone bis hin zu einem festen Stellplatz je LE. Varianten mit zwei oder drei Zonen je Regalwand bzw. einer Zone je Artikel ordnen sich dazwischen ein. Im Falle einer einzelnen Zone je Regalwand entfallen die Kriterien 2-5.²⁵⁹
- Zweites Kriterium ist das Attribut der LE, das für die Zuordnung zu einer der Zonen ausschlaggebend ist: Varianten hierfür sind die mittleren Verweildauern der LE eines jeden Artikels²⁶⁰ oder die individuellen Verweildauern der LE.²⁶¹ Ein weiteres Attribut der Zonenzuordnung liegt vor, wenn eine LE in der Zone der nächsten Auslagerung eingelagert wird. Dafür ist es jedoch notwendig, dass die Reihenfolge der Auslagerungen *a priori* bereits bestimmt wurde.²⁶²

²⁵⁴Vgl. GUTENSWAGER (2002, S. 50f).

²⁵⁵Vgl. GOETSCHALCKX (2012, S. 34f).

²⁵⁶Vgl. ASCHEUER/ GRÖTSCHEL/ ABDEL-HAMID (1999, S. 507) sowie GUTENSWAGER (2002, S. 50f). Entsprechende Strategien werden von GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990, S. 1125) als adaptive Strategien bezeichnet und statischen Strategien, die bereits zu Beginn der Planungsperiode alle für die LP-Zuordnung relevanten Information besitzen, gegenübergestellt.

²⁵⁷In Anlehnung an GLASS (2008, S. 46-49). Andere Gliederungsschemata vermengen mehrere der folgenden Kriterien, was häufig zu Missverständnissen beim Strategievergleich führt, z. B. BRANDES (1997, S. 85f), LINN/ WYSK (1990, S. 38f) oder SCHUMANN (2008, S. 78f). Die Quellen der Strategien sind DIN EN 14943 (2006, S. 101), GLASS (2008, S. 38f), GOETSCHALCKX (2012, S. 38-50), GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990, S. 1120-1122), GUDEHUS (2010, S. 598-600), HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 631-635), ROODBERGEN/ VIS (2009, S. 349-351), TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 32) sowie VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000, S. 1342-1346).

²⁵⁸In der Mengenlehre werden zwei Mengen A und B als disjunkt bezeichnet, wenn sie kein gemeinsames Element besitzen. Vgl. KOHN/ ÖZTÜRK (2012, S. 7).

²⁵⁹Eine Zonierung (Engl. *class-based storage assignment*) bedeutet, dass für n Artikel bzw. LE m Zonen existieren, wobei $n \geq m$ gilt. GOETSCHALCKX (2012, S. 46f), KOUVELIS/ PAPANICOLAOU (1995), MUPPANI/ ADIL (2008) sowie ROSENBLATT/ EYNAN (1989) widmen sich der Bestimmung optimaler Zonengrenzen.

²⁶⁰An Stelle der mittleren Verweildauer der LE eines Artikels wird häufig der reziproke Wert, d. h. die Umschlaghäufigkeit der Artikel, verwendet. Engl. *turnover based storage assignment*.

²⁶¹Vgl. Abschnitt 2.4.1.2. Nach GOETSCHALCKX (2012, S. 40) handelt es sich beim *cross docking* ebenfalls um eine verweildauerbasierte Einlagerungsstrategie mit zwei Klassen: Schnellläufer werden gleich zum Versand gebracht, nur Langsamläufer werden eingelagert.

²⁶²Vgl. LINN/ WYSK (1990, S. 38f) sowie Abschnitt 3.3.5.5.

- Drittes Kriterium ist die Datengrundlage für die genannte Attributsausprägung: Möglich ist die Nutzung von Produktions- bzw. Absatzplänen zur Bestimmung der Verweildauern der Artikel oder LE. Alternativ hierzu bietet sich die Extrapolation von Vergangenheitsdaten an. Physische Daten, z. B. die LE-Masse, können im Betrieb gewonnen werden. Hierbei ist zu beachten, dass durch die alleinige Nutzung von Vergangenheitsdaten zukünftige Zusammenhänge, wie eine erwartete Nachfrageerhöhung durch eine Preissenkung für einen bestimmten Artikel, in der LP-Zuordnung nicht berücksichtigt werden.²⁶³
- Viertes Kriterium ist die Methode zur Anpassung der Zonen: Aufgrund von Sortimentsveränderungen können prognostizierte Umschlaghäufigkeiten oder Verweildauern ihre Gültigkeit verlieren²⁶⁴, so dass beispielsweise die benötigte Menge an LP für Schnellläufer die für diese Zone bereitgestellte Gesamtkapazität übersteigt. In diesem Fall ist entweder eine Neuordnung der Zonenkapazität nötig oder die Grenzwerte der Attributsausprägungen, die ausschlaggebend für eine Zonenzuordnung sind, müssen verändert werden.
- Fünftes Kriterium ist die Exklusivität der Zonen: In einer exklusiven Zone²⁶⁵ (feste LP-Zuordnung) dürfen nur LE gelagert werden, die die definierten Attributsausprägungen der Zone erfüllen. Eine Einlagerung in eine andere Zone ist nicht gestattet.²⁶⁶ Alternativ bieten sich geteilte Zonen²⁶⁷ an, d. h. im Falle einer gefüllten Zone kann eine LE in einer benachbarten Zone eingelagert werden.
- Sechstes Kriterium ist die LP-Zuordnung innerhalb einer zulässigen Zone: Als Möglichkeiten bieten sich die zufallsbasierte Zuordnung sowie die Auswahl des Stellplatzes mit der kürzesten Fahrzeit oder dem kürzesten Fahrweg (COL²⁶⁸) an, d. h. diese Strategien sind unabhängig von den Attributen der LE und lediglich durch die Regalwandgeometrie und die Fahrparameter des RBG bedingt. Des Weiteren

²⁶³So mahnt GUDEHUS (2010, S. 134): „Die Renner von heute sind nicht die Renner von morgen. Das wird oftmals nicht beachtet und führt zu falschen Schlüssen.“

²⁶⁴Vgl. HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 635).

²⁶⁵Engl. *dedicated storage zones*.

²⁶⁶Dies führt dazu, dass sich die temporär benötigte LP-Anzahl der einzelnen Artikel (Minimal- und Maximalbestände der Artikel) in ihren Schwankungen nur noch innerhalb ihrer Zone ausgleichen können anstatt über die gesamte Regalwand hinweg. Der Fall einer eigenen Zone je Artikel bei exklusiver Zonierung stellt den Extremfall dar, da LP für den Maximalbestand je Artikel vorgehalten werden müssen und kein Ausgleich zwischen den Artikeln möglich ist. Bei exklusiven Zonen steigt der Platzbedarf mit der Anzahl an Zonen an. Dies kann dazu führen, dass der Zugriff auf entfernt eingelagerte LE die mittleren Fahrzeit der Regalwand erhöht und so die Einsparungen in anderen Zonen nivelliert. Der Stellplatzbedarf bei geteilten Zonen beläuft sich auf $n_{LP, frei} = \max_t \sum_{i=1}^N I_{it}$ mit I_{it} als der Lagermenge des Artikels i in der Periode t . Das Pendant bei exklusiven Zonen ist $n_{LP, fest} = \max_t \sum_{i=1}^N \max_t I_{it}$ wobei $n_{LP, frei}$ generell niedriger ist als $n_{LP, fest}$. Vgl. MALMBORG (1996, S. 364).

²⁶⁷Engl. *shared storage zones*.

²⁶⁸Engl. *closest open location* (COL). Durch Multiplikation des Fahrwegs oder der Fahrzeit mit einem Kostenfaktor können auch die Bewegungskosten einer Einlagerung als Kriterium genutzt werden.

bietet sich die Anordnung aufgrund der Verweildauer des Artikels bzw. der LE an. Ebenfalls möglich ist die Anwendung einer Suchmuster-Methode, die beispielsweise die unterste Zeile der Zone auf freie LP hin untersucht und bei Nichterfolg innerhalb einer Zeile in die jeweils höhere Zeile wechselt (*lowest tier first*). Bei der *clustering*-Strategie werden häufig kombinierte Artikel nebeneinander angeordnet, um bei gemeinsamen Auslagerungen die Anschlusswege zu minimieren.²⁶⁹

Bisherige Untersuchungen von Strategien zur LP-Zuordnung gehen von artikelreinen LE, vollständiger Kompatibilität aller LE mit allen LP, einem gassengebundenen RBG pro Gasse, ÜP (EP/AP) in der untersten Zeile der gleichen Seite der Regalwand, überlagerter Bewegung des RBG an einer *square in time*-Regalwand²⁷⁰, Nichtbeachtung der Zeiten zur LE-Übergabe sowie bekannten Verweildauern der Artikel bzw. LE aus. Als Kriterium zur Beurteilung der Strategien wird meist die mittlere Fahrzeit der Hinfahrt vom EP zu den LP über einen längeren Zeitraum betrachtet, wobei die Übergabezeiten ignoriert werden.²⁷¹

Generell verspricht eine 1-Zonen-Strategie mit verweildauerbasierter LP-Zuordnung vor allem bei heterogenem Nachfrageverhalten die geringsten mittleren Fahrzeiten.²⁷² Dabei wird der *coi* als Anordnungskriterium verwendet und Artikel mit kurzen Verweildauern werden auf schnellen LP angeordnet.²⁷³ Der Vorsprung der verweildauerbasierten LP-Zuordnung gegenüber einer 1-Zonen-Strategie mit COL-Zuordnung innerhalb der Zone (nachfolgend als COL1 bezeichnet) hinsichtlich der erzielten Fahrzeiten ist vor allem bei schiefen Nachfrageverteilungen gegeben, bei denen eine geringe Artikelanzahl einen

²⁶⁹Anzumerken ist, dass die *clustering*-Strategie lediglich bei RBG mit einer Förderkapazität von > 1 LE praktikabel ist, also beispielsweise mit mehreren LAM oder Mehrfach-LAM.

²⁷⁰Bei einer *square in time*-Regalwand ist die horizontale Fahrzeit des RBG vom EP zu einem LP in der letzten Spalte der Regalwand (t_x) identisch mit der vertikalen Fahrzeit des Hubwagens vom EP zu einem LP in der höchsten Zeile der Regalwand (t_y), d. h. $b = \frac{t_y}{t_x} = 1$. Vgl. CORMIER (2005, S. 96). CHANG/ WEN (1997) weisen analytisch nach, dass bei gegebener LP-Anzahl und bei der Durchführung von Einzelspielen eine *square in time*-Regalwand die zu erwartenden Fahrzeiten minimiert. Im Falle von Doppelspielen gilt dieser Zusammenhang nicht ausnahmslos; dennoch bildet auch hier eine *square in time*-Regalwand zumindest eine fast optimale Lösung (S. 530).

²⁷¹Vgl. beispielsweise BRANDES (1997, S. 24f), CHANG/ WEN (1997, S. 525f), GAGLIARDI/ RENAUD/ RUIZ (2012, S. 880), HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 630) sowie MALMBORG/ KRISHNAKUMAR (1987, S. 169).

²⁷²Vgl. WANG/ YIH (1997, S. 491), GLASS (2008), GOETSCHALCKX (2012, S. 36), HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 635-638), SARKER/ BABU (1995, S. 176) sowie SCHWARZ/ GRAVES/ HAUSMAN (1978, S. 267).

²⁷³Vgl. Abschnitt 2.4.1.2, GOETSCHALCKX (2012, S. 45) sowie MENEGHETTI/ MONTI (2011, S. 1669). HARMATUCK (1976, S. 284) weist analytisch die Optimalität einer *coi*-basierten LP-Zuordnung für Einzelspiele nach. MALMBORG/ KRISHNAKUMAR (1990, S. 95) belegen, dass dieser Zusammenhang nicht nur bei Einzelspielen, sondern auch bei Doppelspielen gilt. MALMBORG (1995) weist die Optimalität einer *coi*-basierten LP-Zuordnung auch für zonierte Regalwände nach. Während eine ABC-Einteilung nur den Umsatz- oder Auftragsanteil der Artikel berücksichtigt, beinhaltet das *coi*-Kriterium auch den Platzbedarf der Artikel. HARMATUCK (1976, S. 284) zieht aus dem *coi*-Kriterium daher die Folgerung: „[T]he optimal location of an item is independent of its popularity.“ MALMBORG (1996, S. 466) definiert jedoch abweichend, dass eine umschlagsbasierte Zuordnung nur auf der Nachfrage (*transaction demand*) beruhe, ohne den Platzbedarf des Artikels zu beachten.

hohen Anteil an den Ein-/Auslagerungen verursacht: Je schiefere die Nachfrageverteilung ist, umso häufiger können bei einer verweildauerbasierten LP-Zuordnung schnelle LP angefahren werden und umso geringer sind die erzielten mittleren Fahrzeiten, während bei der Strategie COL1 schnelle LP, die mit lange verweilenden LE belegt werden, lange nicht mehr zur Verfügung stehen.²⁷⁴ Bei homogener Nachfrageverteilung kann die Strategie COL1 hingegen zu kürzeren mittleren Fahrzeiten führen. Grund hierfür ist, dass die aus der verweildauerbasierten Anordnung der LE in der Regalwand kein signifikanter Vorteil gezogen werden kann, während die Strategie COL1 von der Nichtnutzung langsamer LP profitiert.²⁷⁵ YU/ DE KOSTER schlagen vor, bei einem LFG < 1 keine langsamen LP zu vergeben, sondern eingehende LE nur in einer *effective storage area* der Regalwand anzuordnen. Hierunter verstehen die Autoren die benötigte Menge der schnellsten LP einer Regalwand plus eine zu bestimmende Menge zusätzlicher LP. Durch die zusätzlichen LP stehen eingehenden LE eine größere Anzahl freier LP gegenüber, die zur Bildung von Doppelspielen genutzt werden können. Die Autoren präsentieren einen Algorithmus²⁷⁶ zur Dimensionierung der *effective storage area*.²⁷⁷

Die Strategie COL1 führt nur bei einem LFG $\ll 1$ zu signifikant geringeren mittleren Spielzeiten als die zufallsbasierte Auswahl (Strategie RND1), während sich bei sehr hohen LFG die Ergebnisse beider Strategien angleichen.²⁷⁸ Wird eine Mehrzonenstrategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zonen gewählt (Strategien RND2...RNDn), reduzieren sich die mittleren Spielzeiten gegenüber einer 1-Zonen-Strategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung.²⁷⁹ So lassen sich bei einer schiefen Nachfrageverteilung durch 2-3 Zonen mit zufallsbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zonen etwa 75-83 % der Ersparnis einer verweildauerbasierten Zuordnung erreichen.²⁸⁰

GOETSCHALCKX/ RATLIFF weisen nach, dass eine LP-Zuordnung mit Zonierung auf

²⁷⁴Vgl. HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 635).

²⁷⁵Vgl. HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 631): Unter der Annahme eines konstanten Lagerfüllgrads über die Zeit entspricht die kürzeste-Fahrzeit-Strategie einer zufallsbasierten LP-Zuordnung in einer Teilmenge der schnellsten LP einer Regalwand, da eine eingehende LE immer in den LP der zuletzt ausgelagerten LE eingelagert wird. Die Teilmenge entspricht dem Lagerfüllgrad multipliziert mit der Menge an LP der Regalwand. Vgl. auch SCHUMANN (2008, S. 98-100).

²⁷⁶Ein Algorithmus ist nach EIGNER/ GERHARDT/ GILZ *et al.* (2012, S. 187) „eine eindeutige, endliche Beschreibung eines allgemeinen, endlichen Verfahrens zur schrittweisen Ermittlung gesuchter Größen aus gegebenen Größen“ und besteht aus Eingabegrößen, Verarbeitungsvorschriften, Datentypen, Datenstrukturen sowie Ausgabegrößen (S. 190).

²⁷⁷Vgl. YU/ DE KOSTER (2009, S. 4 und 12f).

²⁷⁸Vgl. GAGLIARDI/ RENAUD/ RUIZ (2012, S. 887-889) sowie WANG/ YIH (1997, S. 491). Die Strategie COL1 stellt nach HAN/ MCGINNIS/ SHIE *et al.* (1987, S. 57) eine einfach zu implementierende Strategie dar und findet daher häufigen Einsatz in der industriellen Praxis.

²⁷⁹Vgl. hierzu die analytischen Untersuchungen von GRAVES/ HAUSMAN/ SCHWARZ (1977) und HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976) sowie die Simulationsstudien von BRANDES (1997), GAGLIARDI/ RENAUD/ RUIZ (2012), KULTUREL/ OZDEMIREL/ SEPIL *et al.* (1999), MALMBORG (1996), SCHUMANN (2008) und VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000). Häufig wird eine 1-Zonen-Strategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung als chaotische Lagerung bezeichnet.

²⁸⁰Vgl. HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 637).

Basis der individuellen Verweildauer der LE geringere Fahrzeiten als auf Basis der Verweildauern der Artikel ermöglicht, und stellen eine entsprechende Strategie namens ADAPTIVE vor.²⁸¹ Da für jeden Artikel jedoch die maximal notwendige LP-Kapazität vorgehalten werden muss, maximiert die Strategie gleichzeitig die Lagergröße. Erst durch Aufhebung der Zonenexklusivität, d. h. im Falle einer vollen Zielzone kann eine LE auch in einer anderen Zone eingelagert werden, kann die notwendige Lagergröße signifikant reduziert werden.²⁸² GOETSCHALCKX/ RATLIFF belegen, dass eine LP-Zuordnung in der falschen Zone v. a. bei LE mit geringer Verweildauer nachteilig ist. Für LE mit langer Verweildauer, die daher langsamen LP zugeordnet werden, sind die Auswirkungen hingegen vernachlässigbar.²⁸³

Um den Aufwand für die Zonenbildung und -anpassung zu vermeiden schlägt GLASS eine dynamische Zonenbildung vor und erweitert so den Ansatz von GOETSCHALCKX/ RATLIFF: Bei der Strategie DYN von GLASS wird das Verweildauerquantil²⁸⁴ der einzulagernden LE ermittelt, indem die Verweildauer der LE mit den Verweildauern aller bisher eingelagerten LE verglichen wird. Die LP der Regalwand werden anschließend nach aufsteigender Fahrzeit sortiert. Der eingehenden LE wird der LP zugeordnet, dessen Fahrzeitquantil²⁸⁵ dem Verweildauerquantil der LE betragsmäßig am nächsten kommt. Ist der LP belegt, wird der freie Platz in der Liste gesucht, der den geringsten Mehraufwand bedeutet.²⁸⁶ Die analytisch ermittelten mittleren Fahrzeiten liegen im theoretischen Idealfall eines perfekt balancierten Lagers²⁸⁷ um 21% unter denen bei artikelbezogener Betrachtung und 42% unter denen der Strategie RND1, wobei nach GLASS der Effekt der LE-bezogenen Betrachtung der Verweildauer etwa gleich groß ist wie der positive Effekt durch die dynamische Zonierung.²⁸⁸ Wie Simulationen von GLASS zeigen bietet die Strategie DYN im Vergleich zur Strategie ADAPTIVE von GOETSCHALCKX/ RATLIFF²⁸⁹ nur geringe Einsparungen der mittleren Fahrzeit, erleichtert jedoch das Zonenmanagement. Anzumerken ist, dass GLASS in der Bewertung seiner Strategie DYN eine verfälschende Vereinfachung der Fahrzeitberechnung vornimmt: So berücksichtigt er keine Zuschläge für Beschleunigungs- und Bremszeiten, sondern geht stets von einer permanenten Fahrt mit

²⁸¹Vgl. GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990, S. 1127-1130).

²⁸²Vgl. GOETSCHALCKX (2012, S. 45) sowie das auf S. 47 genannte fünfte Kriterium.

²⁸³Vgl. GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990, S. 1126). Nach SCHWARZ/ GRAVES/ HAUSMAN (1978, S. 268) kann die Einteilung in mehrere Zonen auch größere Fehler in der notwendigen Diskriminierung der Artikel (bzw. LE) ertragen, ohne die mittlere Spielzeit erheblich zu erhöhen.

²⁸⁴Vgl. Abschnitt 4.2.3.2.

²⁸⁵Das Fahrzeitquantil beschreibt die Rangfolge der LP hinsichtlich ihrer Fahrzeiten zum ÜP. In einer fiktiven Regalwand mit 100 LP hat der zehntschnellste LP ein Fahrzeitquantil von $\frac{10}{100} = 0,1$, der langsamste LP ein Fahrzeitquantil von $\frac{100}{100} = 1$ und der schnellste LP ein Fahrzeitquantil von $\frac{1}{100} = 0,01$.

²⁸⁶Vgl. GLASS (2008, S. 58f).

²⁸⁷Vgl. Abschnitt 2.4.1.2.

²⁸⁸Vgl. GLASS (2008, S. 87f).

²⁸⁹Vgl. GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990, S. 1126f).

der Maximalgeschwindigkeit aus.²⁹⁰ Dadurch werden die Fahrzeiten zu LP nahe dem EP überdurchschnittlich verkürzt. Da DYN bzw. ADAPTIVE eine Maximierung der Anfahrschneller LP anstreben, werden durch diese Vereinfachung die erzielten Fahrzeiteinsparungen beider Strategien gegenüber der Strategie RND1 überbewertet.

Bisher liegen nur wenige Untersuchungen zur energieeffizienten LP-Zuordnung in automatischen Lagersystemen vor. Hervorzuheben sind die Arbeiten von MENEGHETTI/ MONTI für aHRL sowie von Forschern der OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG und der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DRESDEN um ZADEK/ SCHMIDT²⁹¹ für AKL:

MENEGHETTI/ MONTI stellen eine Strategie vor, bei der die LP nach aufsteigender Verweildauer den nach aufsteigendem mittleren Energiebedarf (für die Fahrt zum ÜP) sortierten LP zugeordnet werden. Mittels eines aHRL-Simulationsmodells²⁹² vergleichen die Autoren diese Strategie mit einer entsprechenden verweildauerbasierten LP-Zuordnung auf Basis der nach der Fahrzeit sortierten LP. Beide Strategien basieren auf exklusiven Zonen je Artikel, d. h. es wird eine Festplatzlagerung durchgeführt und die LP je Artikel werden *a priori* bestimmt. Die energiebedarfsbezogene Strategie führt im Vergleich zur fahrzeitbezogenen Strategie nach Aussage der Autoren zu einer Reduktion des Energiebedarfs in Höhe von 2 %, der jedoch eine um 2 % erhöhte Fahrzeit gegenübersteht.²⁹³ Jedoch schränken drei Gründe die Attraktivität und Umsetzbarkeit der vorgestellten Strategie ein: Erstens sind bei dieser Festplatzlagerung die LP je Artikel fix zu bestimmen. Bei Sortiments- oder Bestandsveränderungen sind die Zonen je Artikel jedes Mal neu zu spezifizieren, womit es sich um eine sehr inflexible Strategie handelt, was die Praxistauglichkeit dieser Strategie deutlich einschränkt.²⁹⁴ Zweitens muss aufgrund der exklusiven Zonen für jeden Artikel die maximal notwendige LP-Kapazität je Artikel vorgehalten werden, wodurch die Strategie die notwendige Lagergröße maximiert.²⁹⁵ Wie DE KOSTER/ LE-DUC/ ROODBERGEN bemerken, führt die Exklusivität der Zonen dazu, dass selbst für Artikel ohne aktuellen Bestand LP vorgehalten werden müssen, wodurch in Realsituationen nur ein geringer Raumnutzungsgrad erzielt werden kann.²⁹⁶ Drittens er-

²⁹⁰Vgl. GLASS (2008, S. 82).

²⁹¹Nach Aussage von SCHULZ (2014, S. 3) werden die Energiebedarfe der durchgeführten Untersuchungen mit einem an der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DRESDEN entwickelten Modell ermittelt, während die vorgestellten Lagerstrategien von SCHULZ stammen.

²⁹²In der Studie wird ein mechanisches Energiemodell des RBG ohne Zwischenkreiskopplung oder Energierückspeisung verwendet. Dabei betrachten die Autoren LE mit einer Masse von 1.000 kg.

²⁹³Vgl. MENEGHETTI/ MONTI (2011a).

²⁹⁴Vgl. GLASS (2008, S. 51).

²⁹⁵Vgl. Fußnote 266 und die darin aufgeführte Begründung: Der Fall einer eigenen Zone je Artikel bei exklusiver Zonierung stellt den Extremfall dar, da LP für den Maximalbestand je Artikel vorgehalten werden müssen und kein Ausgleich zwischen den Artikeln möglich ist. Bei exklusiven Zonen steigt der Platzbedarf mit der Anzahl an Zonen an. Dies kann dazu führen, dass der Zugriff auf entfernt eingelagerte LE die mittlere Fahrzeit der Regalwand erhöht und so die Einsparungen in anderen Zonen nivelliert. Eine exklusive Zonierung führt somit unmittelbar zu einem maximal großen Lager sowie mittelbar zu steigenden mittleren Fahrzeiten.

²⁹⁶Vgl. DE KOSTER/ LE-DUC/ ROODBERGEN (2007, S. 489).

folgt in der Strategie die LP-Zuordnung auf Basis der mittleren Verweildauer der Artikel anstatt auf Basis der individuellen Verweildauer der LE je Artikel. Wie bereits GOETSCHALCKX/ RATLIFF²⁹⁷ und später auch GLASS²⁹⁸ feststellen, führt eine artikelbezogene LP-Zuordnung zu höheren Fahrzeiten als eine LE-bezogene LP-Zuordnung. Aus diesen Gründen wird die von MENEGHETTI/ MONTI vorgestellte Strategie im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

SCHULZ/ MAHRENHOLZ/ ZADEK bewerten Strategien zur LP-Zuordnung durch Messungen in einem eingassigen Labor-AKL. Hierbei werden der Energiebedarf und die Fahrzeit der Strategien RND1 und RND3, d. h. einer 1-Zonen Strategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zone (RND1) und einer 3-Zonen-Strategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zonen (RND3), ermittelt. Durch Einsatz der Strategie RND3 ergeben sich Energieeinsparungen in Höhe von 32% im Vergleich zur Strategie RND1.²⁹⁹ In einem späteren Artikel führen SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* zwei selbst entwickelte Strategien zur LP-Zuordnung ein, die eine Reduzierung des Energiebedarfs der Lageroperationen anstreben.³⁰⁰ Hierzu zählt eine Anpassung der Lage der Zonen einer Regalwand an den mittleren Energiebedarf anstatt an die Fahrzeit der LP. Hierbei postulieren die Autoren eine Einteilung der Regalwand in drei Zonen „A“, „B“ und „C“. Bei Anwendung dieser „energetischen ABC-Zonierung“ werden jedoch weder hinsichtlich der mittleren Fahrzeit noch hinsichtlich des mittleren Energiebedarfs Veränderungen gegenüber der Strategie RND3 festgestellt.³⁰¹ Die zweite Strategie der Autoren („niedrigste-Energiebedarfs-Regel“) ordnet einer eingehenden LE denjenigen LP zu, der den geringsten Energiebedarf während der Ein- und Auslagerungsfahrt hervorruft. Im Vergleich zum zeitlichen Pendant, der o. g. Strategie COL1³⁰², können die Autoren „keine Unterschiede [feststellen], weil beide Strategien im Mittel auf die gleichen Lagerfächer zugreifen“³⁰³.

²⁹⁷Vgl. GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990, S. 1127-1130).

²⁹⁸Vgl. GLASS (2008, S. 87f).

²⁹⁹Daher werden Einzelspiele durchgeführt. Vgl. SCHULZ/ MAHRENHOLZ/ ZADEK (2013, S. 177-179).

³⁰⁰Vgl. SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* (2013, S. 100-104) sowie SCHULZ (2014, S. 149-162).

³⁰¹„Bei ausschließlicher Ausführung von Doppelspielen [...] ist ersichtlich, dass sich [...] weder die mittleren erzielbaren Durchsätze, noch die mittleren Energiebedarfe pro Stunde [...] unterscheiden. [...] Werden anstatt Doppelspielen ausschließlich Einzelspiele ausgeführt, unterscheiden sich die Ergebnisse [...] ebenfalls nicht.“ SCHULZ (2014, S. 150). Durch eine anschließende Modifikation der Hubgeschwindigkeit des RBG erfolgt eine Verschiebung schneller LP in energetisch ungünstige Bereiche der untersuchten Regalwand. Dadurch gelingt es, gegenüber der Strategie RND3 Energieeinsparungen zu erzielen. Jedoch steigen damit auch die mittleren Fahrzeiten der energetischen ABC-Zonierung gegenüber der Strategie RND3. Vgl. SCHULZ (2014, S. 150-154). Dabei wird jedoch implizit folgende Logik vertreten: Führt eine neu entwickelte Strategie beispielsweise zu höheren mittleren Fahrzeiten bei gleichbleibendem mittleren Energiebedarf je Ein- und Auslagerungsfahrt als eine Referenzstrategie, so lassen sich pro Stunde im Mittel weniger Ein- und Auslagerungen durchführen. Dies führt dazu, dass die von den Autoren gewählte Kennzahl zur Bewertung der Energieeffizienz einer Lagerstrategie, der mittlere Energiebedarf je Stunde, sinkt und die neu entwickelte Strategie als energieeffizienter als die Referenzstrategie eingestuft wird. Vgl. SCHULZ (2014, S. 145f).

³⁰²COL1 beschreibt eine Ein-Zonen-Strategie mit Auswahl der *closest open location*.

³⁰³SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* (2013, S. 103). Ähnlich SCHULZ (2014, S. 158f).

Beim Vergleich der Kombination aus niedrigste-Energiebedarfs-Regel und energetischer ABC-Zonierung und ihrem zeitlichen Pendant, der Strategie COL3³⁰⁴, „sind die Ergebnisse auch identisch“³⁰⁵. Diese Aussagen wurden für die Anwendung der Strategien in einem AKL-Modell getroffen. Um die Aussagen für den Fall eines aHRL zu prüfen, wird die Kombination aus energetischer ABC-Zonierung und niedrigster-Energiebedarfs-Regel im Rahmen dieser Arbeit bewertet.³⁰⁶ Wie bereits GLASS im Jahr 2005 feststellt, führt eine statische Zonierung, wie sie von SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* und SCHULZ vorgeschlagen wird, gerade bei Sortimentsveränderungen zu einem hohen Aufwand für die Zonenanpassungen, um hohe Fehlbelegungsraten zu vermeiden.³⁰⁷ Dieser Nachteil wird in den Beiträgen von SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* und SCHULZ jedoch nicht aufgegriffen. Darüber hinaus wird die Strategie DYN nach GLASS weder von SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* noch von SCHULZ in die Bewertung ihrer selbst entwickelten Strategien einbezogen. Wie die Ausführungen in Abschnitt 4.4 zeigen werden, führt die Strategie DYN aufgrund der dynamischen Zonenbildung jedoch zu niedrigeren Fahrzeiten und Energiebedarfen als die von SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* bzw. von SCHULZ vorgestellte Kombination aus energetischer ABC-Zonierung und niedrigste-Energiebedarfs-Regel. SCHULZ führt an, dass eine verweildauerbasierte LP-Zuordnung nach GLASS beim Praxiseinsatz „nur mit großem Aufwand“³⁰⁸ umzusetzen sei, berücksichtigt jedoch nicht die von GLASS dargebrachten Methoden zur Verweildauerprognose, die genau diesen Einwand widerlegen. Dabei ist zu bedenken, dass es sich bei der von SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* bzw. von SCHULZ postulierten energetischen ABC-Zonierung ebenfalls um eine verweildauerbasierte LP-Zuordnung handelt, bei der lediglich anstelle der individuellen Verweildauern der LE die mittleren Verweildauern der Artikel verwendet werden, die wiederum in mehrere Klassen („A“, „B“, „C“) eingeordnet werden. Die Ausführungen von SCHULZ über die Strategie DYN entsprechen zudem nicht den Festlegungen von GLASS: So führt SCHULZ an, dass die Strategie DYN die LP-Zuordnung auf Basis der mittleren Verweildauern aller LE eines jeden Artikels durchführen würde, obwohl GLASS explizit darauf hinweist, dass ein großer Teil der zeitlichen Einsparungen, die die Strategie DYN gegenüber statischen

³⁰⁴COL3 beschreibt eine 3-Zonen-Strategie mit Auswahl der *closest open location* in jeder Zone.

³⁰⁵SCHULZ (2014, S. 159). Dabei wird die Strategie COL3 als „zeitliche ABC-Zonierung“ in Kombination mit der „Kürzeste-Fahrzeit-Regel“ bezeichnet. Anschließend wird wiederum die Hubgeschwindigkeit des RBG modifiziert, wodurch erneut eine Verschiebung schneller LP in energetisch ungünstige Bereiche der untersuchten Regalwand stattfindet. Dadurch gelingt es, gegenüber der Strategie COL3 Energieeinsparungen zu erzielen. Jedoch steigen damit auch die mittleren Fahrzeiten der energetischen ABC-Zonierung in Kombination mit der niedrigste-Energiebedarfs-Regel gegenüber der Strategie COL3. Vgl. SCHULZ (2014, S. 159-162). Dabei wird jedoch nicht auf den angenommenen LFG hingewiesen, was insbesondere bei Strategien wie COL1 oder der niedrigste-Energiebedarfs-Regel ein wertvoller Hinweis für die Bewertung der erzielten Ergebnisse wäre. Es sei erneut auf die von den Autoren vertretene Logik hingewiesen, wonach sinkende mittlere Umschläge bei gleichem Energiebedarf pro Ein- und Auslagerungsfahrt als energieeffizienter im Vergleich zu einer Referenzstrategie gewertet werden. Vgl. Fußnote 301.

³⁰⁶Vgl. Abschnitt 4.2.4.2.4.

³⁰⁷Vgl. GLASS (2008, S. 51).

³⁰⁸SCHULZ (2014, S. 138).

Zonierungen erzielt, aus der LP-Zuordnung auf Basis der individuellen Verweildauern der LE eines jeden Artikels beruhen.³⁰⁹

3.3.5.3 Ladeeinheitenauswahl bei Auslagerungen Ist ein auszulagernder Artikel in mehreren LE eingelagert, so ist festzulegen, welche LE zur Deckung eines Bedarfs ausgelagert werden soll(en). Als Kriterien können neben einer Zufallsauswahl beispielsweise die Verweildauer der LE im Lager, die Ist-Menge der LE im Vergleich zur Bedarfsmenge oder die Anfahrtszeit der LE genutzt werden. Nachfolgend werden etablierte Strategien zur LE-Auswahl bei Auslagerungen vorgestellt:³¹⁰

Wird als Kriterium die Verweildauer der LE des Artikels im Lager gewählt, kann entweder die zuerst (*first in first out, fifo*) oder die zuletzt eingelagerte LE (*last in first out, lifo*) entnommen werden, bis die auszulagernde Menge des Artikels erreicht ist. Bei Anwendung der *fifo*-Strategie soll eine Überalterung der Artikel, bei der *lifo*-Strategie sollen Umlagerungen bei mehrfachtiefer Lagerung vermieden werden.

Der Vergleich der Bedarfsmenge mit den jeweiligen Artikelmenge der LE ermöglicht die Anbruchmengenbevorzugung, um pro Artikel eine möglichst geringe Anzahl an LP zu belegen. Alternativ dazu kann ein LP mit einer zur Bedarfsmenge möglichst passenden Ist-Menge gewählt werden (Mengenanpassung), um die Anzahl an Rücklagerungen zu minimieren. Im letzteren Fall ist zu spezifizieren, ob bei mehreren Alternativen ein LP mit Überdeckung oder mehrere LP mit Unterdeckung der Bedarfsmenge angefahren werden sollen.³¹¹

Als drittes Kriterium kann die Fahrzeit zu den LP herangezogen werden: Die Strategie kürzeste Fahrzeit³¹² zielt auf eine Maximierung des Umschlags des aHRL ab, indem die LE auf dem schnellsten LP ausgewählt wird.³¹³ Bei der Strategie kleinster Leerlaufabstand wird der LP gewählt, der zur aktuellen RBG-Position die geringste Fahrzeit besitzt, um nach einem RBG-Leerlauf den Anfahrtsweg zu minimieren. Eine Kombination stellt die Strategie kürzester Fahrweg einschließlich *fifo*³¹⁴ dar, bei der aus den n am längsten gelagerten LE diejenige mit der kürzesten Fahrzeit gewählt wird, um das Alter der Artikel auch in der Fahrwegoptimierung zu beachten.

Die Strategien Ressourcenausgleich und Quersammlung streben Ausgleichsfunktionen an: Erstere verteilt die Auslagerungen gleichmäßig auf alle RBG, um eine einseitige Be-

³⁰⁹Vgl. GLASS (2008, S. 87f).

³¹⁰Vgl. DIN EN 14943 (2006, S. 106), LINN/ WYSK (1990, S. 38f) sowie TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 33).

³¹¹Bei der Entnahme von Teilmengen einer LE ist generell zu beachten, dass die der Auslagerung nachfolgenden Prozesse um eine Konsolidierung der Teilmengen auf geeignete Ladungsträger (z. B. Behälter oder Paletten) erweitert werden müssen.

³¹²Engl. *shortest processing time*.

³¹³Analog zur LP-Zuordnung bei der Einlagerung können auch hier alternativ die Fahrzeit oder die Fahrkosten gewählt werden.

³¹⁴Engl. *shortest processing time embedded first in first out*.

lastung einzelner RBG zu vermeiden und die Verfügbarkeit der RBG über alle Gassen hinweg zu nivellieren. Bei der Quersammlung wird aus der Gasse mit der höchsten Anzahl an LE des benötigten Artikels eine LE des Artikels ausgelagert, um bei temporärem Ausfall einzelner Gassen weiterhin Zugriff auf alle Artikel zu gewährleisten.

3.3.5.4 Umlagerung Umlagerungen werden genutzt, um nach definierten Kriterien eine Optimierung der LP-Belegung zu erreichen. Hierfür sind zwei Gründe denkbar: Muss- te bei der Einlagerung ein suboptimaler LP gewählt werden, weil beispielsweise in der bevorzugten Zone kein LP mehr frei war, so kann bei einer Umlagerung eine Idealzuordnung hergestellt werden. Zudem können zukünftige, bereits bekannte Auslagerungen schneller durchgeführt werden, indem die entsprechenden LE auf verkehrsgünstige LP nahe dem AP umgelagert werden. Die durchzuführenden Umlagerungen zielen somit auf eine Optimierung des Umschlags in Zeiten hoher RBG-Auslastung ab. NEUHÄUSER betont, dass Umlagerungen zu organisatorischen Vorteilen, z. B. kürzeren Fahrzeiten, führen können, die jedoch den Umlagerungsaufwand übersteigen müssen.³¹⁵ Um den planmäßigen Betrieb des aHRL nicht negativ zu beeinträchtigen, können Umlagerungen bevorzugt in Zeiten geringer RBG-Auslastung durchgeführt werden, beispielsweise über Nacht oder am Wochenende.³¹⁶ Dabei kann ggf. von einem geringeren Arbeitspreis für die benötigte Energie profitiert werden.

Bisherige wissenschaftliche Betrachtungen stellen die folgenden Umlagerungsstrategien für aHRL vor:³¹⁷ Bei einer verweildauerbasierten Mehrzonenstrategien zur LP-Zuordnung können die jeweiligen Zonen durch LE einer anderen Zone belegt sein. Bei der *clear the highest turnover zone first*-Strategie (*chtzf*) werden zunächst aus der Zone mit der kürzesten Verweildauer die falsch positionierten LE in ihre jeweiligen Soll-Zonen umgelagert. Bei der *restore the highest turnover item first*-Strategie (*rhtif*) werden aus der Menge der falsch positionierten LE zunächst die LE in absteigender Reihenfolge der Umschlaghäufigkeit ihrer Artikel in ihre jeweiligen Soll-Zonen umgelagert. Durch Alternierung beider Strategien (*alternate chtzf-rhtif*) können Umlagerungs-Doppelspiele gebildet werden. Eine weitere Strategie ist die Vorholung, bei der in Kürze auszulagernde LE in die Nähe des AP umgelagert werden, um die Reaktionszeit zum Bedarfszeitpunkt zu reduzieren.

3.3.5.5 Reihenfolgebildung Reihenfolgeprobleme lassen sich formal als zwei nicht-leere Mengen X und Y mit $|X| > 1$ beschreiben, wobei mehrere Elemente aus X einem Element aus Y zugeordnet werden müssen. Die Zuordnung erfolgt jedoch nicht gleichzei-

³¹⁵Vgl. NEUHÄUSER (2013, S. 68). Der Autor stellt ein Verfahren zur Bestimmung der Umlagerungszyklen und zur Lagertypzuordnung für manuelle Kommissioniersysteme vor.

³¹⁶Vgl. VASILII/ TANG/ VASILII (2012, S. 199-201).

³¹⁷Vgl. HU/ HSU/ XU (2004), HU/ ZHU/ HSU *et al.* (2010), JAIKUMAR/ SOLOMON (1990), LINN/ WYSK (1990, S. 38f), MOON/ KIM (2001), MURALIDHARAN/ LINN/ PANDIT (1995) sowie TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 33 und 58).

tig, sondern in einer bestimmten Reihenfolge. Ein Beispiel hierfür aus der Fertigung sind Aufträge, die auf gegebenen Maschinen bearbeitet werden müssen. Reihenfolgeprobleme können statisch, d. h. alle in der Planung zu berücksichtigenden Aufträge liegen zum Planungszeitpunkt vor, oder dynamisch, d. h. im Zeitablauf treffen weitere zu berücksichtigende Aufträge ein, sein. Zudem können Reihenfolgeprobleme deterministisch, d. h. zum Planungszeitpunkt sind alle entscheidungsrelevanten Informationen über die Aufträge (Bearbeitungszeiten, Liefertermine *etc.*) bekannt und sicher, oder stochastisch, d. h. zum Planungszeitraum ist mindestens ein Datum nicht bekannt oder noch unsicher, sein.³¹⁸ Die Reihenfolgebildung verfolgt Leistungs-, Zeit- und Kostenziele, wobei Leistungs- und Zeitziele monetär bewertet und somit als Kostenziele dargestellt werden können.³¹⁹ Dabei besteht häufig ein horizontaler Zusammenhang zwischen den Zielsetzungen.³²⁰ Beispiele für ressourcenbezogene Zielkriterien sind die Belegungs- und Leerlaufzeiten sowie die Kapazitätsauslastung.³²¹ Auftragsbezogene Zielkriterien sind die Durchlauf-, Transport- und Wartezeit sowie Terminabweichungen.³²²

Allgemein können zur Lösung mehrstufiger Reihenfolgeprobleme exakte Lösungsverfahren, Heuristiken, warteschlangentheoretische Modelle oder Simulationen eingesetzt werden.³²³ Exakte Lösungsverfahren für mehrstufige Reihenfolgeprobleme umfassen die gemischt ganzzahlige und lineare Programmierung, die Vollenumeration sowie Entscheidungsbaumverfahren. Heuristiken umfassen Auswahlverfahren oder Prioritätsregeln.³²⁴

Durch Strategien zur Reihenfolgebildung können die Leistungswerte des aHRL optimiert und gleichzeitig alle relevanten Nebenbedingungen eingehalten werden, um Lagerkosten, Kosten der Nichtnutzung der Maschinenkapazität, Terminüberschreitungskosten sowie Anpassungskosten zu minimieren.³²⁵ Dabei stellen Ein- und Auslagerungen zwei separate Warteschlangen dar. Zur Bildung der beiden Warteschlangen sind die bekannten Aufträge zu erfassen. Anschließend ist festzulegen, welche Warteschlange jeweils als nächste bedient wird. Zudem ist die Reihenfolgebildung innerhalb der beiden Warteschlangen

³¹⁸Vgl. CONWAY/ MAXWELL/ MILLER (1967, S. 7), PAULIK (1984, S. 9 und 36) sowie PETRI (2006, S. 6).

³¹⁹Vgl. PAULIK (1984, S. 137-139) sowie STEFENELLI (2000, S. 6f).

³²⁰Vgl. KRAMER (1994, S. 53).

³²¹Bei aHRL kann als Umrüstzeit beispielsweise der Gangwechsel entsprechend befähigter RBG gesehen werden.

³²²Vgl. KRAMER (1994, S. 27-55) sowie PAULIK (1984, S. 22-26 und 90f).

³²³Vgl. KRAMER (1994, S. 79-143) sowie PAULIK (1984, S. 38-85).

³²⁴Als Untergruppen von Prioritätsregeln existieren Regeln, die sich auf die Bearbeitungszeit oder die Fälligkeitsdaten beziehen. Zudem existieren Regeln, die weder Bearbeitungszeiten noch Fälligkeitsdaten berücksichtigen, sowie kombinierte Regeln.

³²⁵Zu den Lagerkosten gehören Lagereinzelkosten, wie gebundenes Kapital, Versicherungen sowie Lagergemeinkosten, wie Mieten und Abschreibungen *etc.* Kosten der Nichtnutzung der Maschinenkapazität beinhalten Leerkosten, d. h. die anteilige Leerzeit an der Maximalkapazität sowie Opportunitätskosten des Stillstands, d. h. entgehende Deckungsbeiträge von Aufträgen, die in den Leerzeiten bearbeitet werden könnten. Terminüberschreitungskosten können in Form von Verzugskosten entstehen. Anpassungskosten umfassen Rüstkosten, Kosten der zeitlichen Anpassung (z. B. Überstunden, die geleistet werden müssen) sowie Kosten intensitätsmäßiger Anpassung (z. B. durch Variation der Geschwindigkeit). Vgl. KRAMER (1994, S. 58-77) sowie PAULIK (1984, S. 92-142).

zu bestimmen, um z. B. einen geplanten Auslieferzeitpunkt einzuhalten.³²⁶

3.3.5.5.1 Erfassung der Aufträge für Ein- und Auslagerungen Die durchzuführenden Ein- und Auslagerungen in einem aHRL ändern sich laufend, da neue Aufträge generiert und bestehende Aufträge abgearbeitet werden. In der Ablaufplanung ist sowohl eine blockweise Reihenfolgebildung³²⁷ als auch eine dynamische Reihenfolgebildung³²⁸ möglich.³²⁹

Bei der blockweisen Reihenfolgebildung werden die vorliegenden Ein- und Auslagerungsaufträge in zeitliche Blöcke (z. B. die Aufträge, die in den nächsten vier Stunden abgearbeitet werden müssen) oder in Mengen-Blöcke (z. B. die nächsten zehn fälligen Aufträge) unterteilt. Erst nach Erledigung eines Blocks wird aus den neu hinzugekommenen Aufträgen ein neuer Block gebildet und anschließend abgearbeitet.

Bei der dynamischen Reihenfolgebildung wird die Reihenfolge der Ein- und Auslagerungsaufträge jedes mal neu festgelegt, wenn ein neuer Ein- oder Auslagerungsauftrag erzeugt wird.³³⁰ Dabei sind jedoch die Fälligkeiten der Aufträge zu beachten, um lange Wartezeiten einzelner Aufträge zu vermeiden. BRANDES schlägt zwei Zeitschranken bei der Erfassung von Auslagerungsaufträgen vor, um erstens zu verhindern, dass fällige Auslagerungsaufträge zu spät abgearbeitet werden, sowie um zweitens Auslagerungen erst unterhalb eines zeitlichen Maximalabstands zur aktuellen Systemzeit zu erfassen, um ein zu frühes Auslagern zu vermeiden.³³¹

EBEN-CHAIME weist auf die Nachteile einer blockweisen Reihenfolgebildung hin, falls zwangsweise Ein- und Auslagerungen zu Doppelspielen kombiniert werden müssen: So kann es beim zeitweisen Fehlen von Ein- oder Auslagerungen zu stark ansteigenden Wartezeiten von Aufträgen kommen, was sich in steigenden Warteschlangen äußert. Statt dessen postuliert er eine dynamische Reihenfolgebildung, die in einer Simulationsstudie um 5,1% kürzere Fahrzeiten als eine blockweise Reihenfolgebildung bei einer Blockgröße von 15 Aufträgen verspricht. Das bei dynamischer Reihenfolgebildung inhärente Problem langer Wartezeiten einzelner Auslagerungsaufträge behandelt EBEN-CHAIME nur rudimentär und verweist darauf, dass diese Aufträge in Leerlaufzeiten, d. h. ohne vorliegende

³²⁶Vgl. LINN/ WYSK (1990, S. 38f) sowie VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000, S. 1340). MAHAJAN/ RAO/ PETERS (1998, S. 1718 und 1730) stellen für den Fall von AKL mit Kommissionierstationen, an denen aus den Behältern lediglich einzelne Artikel entnommen werden, fest, dass sich das Reihenfolgeproblem auf die Sequenzierung der Auslagerungen begrenzen lässt, da jede ausgelagerte LE umgehend wieder eingelagert wird. Dabei muss jedoch die Entnahmefolge im Reihenfolgeproblem beachtet werden.

³²⁷Engl. *block sequencing*.

³²⁸Engl. *dynamic sequencing*.

³²⁹Vgl. HAN/ MCGINNIS/ SHIE *et al.* (1987, S. 57).

³³⁰Das Problem einer optimalen Sequenzierung ist bereits bei einem möglichen LP pro Einlagerung als *traveling salesman problem* modellierbar, was jedoch bereits ein *NP-complete* Problem darstellt. Die Lösung wird beim Vorliegen mehrerer möglicher freier LP pro Einlagerung noch erschwert. Vgl. HAN/ MCGINNIS/ SHIEH *et al.* (1987, S. 57).

³³¹Vgl. BRANDES (1997, S. 144f und 155-161).

Einlagerungsaufträge, abgearbeitet werden könnten.³³²

3.3.5.5.2 Auswahl der Warteschlange Die Strategie zur Reihenfolgebildung hat festzulegen, welche Warteschlange (Ein- oder Auslagerungen) jeweils als nächstes bedient wird.³³³ Dabei bestehen die folgenden Handlungsalternativen:³³⁴ Nach der *first come first served*-Strategie wird die Warteschlange als nächstes bedient, die den Auftrag mit der längsten Wartezeit im System enthält. Als zweite Möglichkeit kann die Warteschlange bedient werden, die den Auftrag mit der kürzesten erwarteten Abarbeitungszeit enthält (Strategie *shortest process time*). Weitere Strategien bevorzugen entweder die Einlagerungen (Strategie *storage priority*), die Auslagerungen (Strategie *retrieval priority*) oder die jeweils längere Warteschlange (Höchste-Last-Strategie). Eine weitverbreitete Strategie alterniert die jeweils als nächstes zu bedienende Warteschlange (*interleaving*), falls beide Warteschlangen nicht leer sind: Dabei führt das RBG abwechselnd Ein- und Auslagerungen aus, so dass im Befehlszyklus³³⁵ Doppel- oder Mehrfachspiele gebildet werden können.³³⁶

3.3.5.5.3 Reihenfolgebildung innerhalb der beiden Warteschlangen Besteht die Lagervorzone von aHRL aus verbundenen Stetigförderern, so sind Einlagerungen aufgrund der linearen Abläufe in der Lagervorzone nach dem Prinzip *first come first served* durchzuführen.³³⁷ Hier kommt zum Tragen, dass die Lagervorzone als eine einzelne Quelle agiert. Bei Auslagerungen stellen die jeweiligen LP zeitlich parallele Quellen dar, so dass die Reihenfolge der Auslagerungen nach definierten Regeln gestaltet werden kann. Nachfolgend werden zwei Gruppen von Strategien zur Reihenfolgebildung beschrieben.³³⁸

Die erste Gruppe von Strategien betrachtet Ein- und Auslagerungen getrennt und optimiert die einzelnen Warteschlangen isoliert: Eine weit verbreitete³³⁹ Strategie zur Reihenfolgebildung besteht darin, die Ein- und Auslagerungswarteschlangen nach der Wartezeit der einzelnen Aufträge zu sortieren, damit die am längsten wartenden Aufträge als erstes abgearbeitet werden (*first come first served*³⁴⁰). Bei kurvengängigen RBG, die mehr

³³²Vgl. EBEN-CHAIME (1992, S. 207f). Der Autor nutzt in seinen Studien zur Paarbildung die *nearest neighbour*-Heuristik, die in Abschnitt 3.3.5.5.3 vorgestellt wird.

³³³Vgl. LINN/ WYSK (1986, S. 69) sowie VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000, S. 1342).

³³⁴Vgl. LINN/ WYSK (1990, S. 38-40) sowie VASILI/ TANG/ VASILI (2012, S. 193).

³³⁵Vgl. Abschnitt 3.3.5.7.

³³⁶Vgl. VASILI/ TANG/ VASILI (2012, S. 193).

³³⁷Vgl. HAN/ MCGINNIS/ SHIEH *et al.* (1987, S. 57), LEE/ SCHAEFER (1997, S. 351), LINN/ WYSK (1990, S. 40f) sowie VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000, S. 1339). Eine flexible Reihenfolgebildung bei eingehenden LE bestünde beim Einsatz von Flurförderzeugen oder sortierfähigen Stetigförderern.

³³⁸Vgl. DIN EN 14943 (2006, S. 106), LEE/ SCHAEFER (1997, S. 353-356), LINN/ WYSK (1990, S. 38f), TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010, S. 33), VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000, S. 1343-1345) sowie WANG/ YIH (1997, S. 489).

³³⁹Vgl. HAN/ MCGINNIS/ SHIEH *et al.* (1987, S. 57): „A common practice is that both storage and retrieval requests are processed in FCFS [= *first come first served*, Anmerkung des Autors] manner [...]“

³⁴⁰Die Strategie wird auch als *longest waiting storage/ retrieval* bezeichnet.

als eine Gasse bedienen können, kann die Gangwechselminimierung, d. h. eine Sortierung der Ein- und Auslagerungsreihenfolge nach den einzelnen Lagergassen, genutzt werden, um die Umsetzungsvorgänge zu minimieren. Werden die auszulagernden Artikel entsprechend der Tourenplanung des nachgeschalteten Transportmittels, z. B. des LKW, sortiert, lassen sich nachfolgende Rangier- und Umladearbeiten reduzieren (tourenbezogene Auslagerung). Ist der Bedarfszeitpunkt der auszulagernden LE bekannt, so kann der Auslagerungszeitpunkt in der Reihenfolgeplanung berücksichtigt werden, um spätere Wartezeiten bzw. Umladearbeiten zu reduzieren (terminierte Auslagerung). Werden die Ein- und Auslagerungsaufträge bevorzugt abgearbeitet, deren LP die kürzeste Fahrzeit zur aktuellen RBG-Position haben, spricht man von einer *nearest storage/ retrieval*-Strategie. Dabei werden alle Auslagerungs-LP sowie der EP betrachtet, um Leerfahrten zu reduzieren.³⁴¹ Eine Variante ist zudem die *shortest processing time embedded first come first served*-Strategie, bei der aus einer Anzahl von Aufträgen mit der längsten Wartezeit im System derjenige Auftrag zuerst abgearbeitet wird, der die geringste Bearbeitungszeit aufweist.

Die zweite Gruppe von Strategien kombiniert Ein- und Auslagerungsaufträge zu Touren, um Leer- und Zwischenfahrten zu minimieren. Wichtig bei den angesprochenen Strategien ist die Einschränkung, ob vor der Reihenfolgebildung bereits der LP für die eingehende LE vergeben wurde und damit die Basis für die Bestimmung von Touren bildet, oder ob der Einlagerungs-LP auf Basis der Strategie zur Reihenfolgebildung ermittelt wird.³⁴² So stellen CHEN/ LANGEVIN/ RIOPEL einen *tabu search*-Algorithmus (Metaheuristik) auf Basis des ungarischen Verfahrens³⁴³ vor, bei dem nach der LP-Zuordnung die Reihenfolgebildung in Form eines Zuordnungsproblems durchgeführt wird. Der Algorithmus benötigt hierfür Informationen zu den nachfolgenden Ein- und Auslagerungen.³⁴⁴ Die Alternative hierzu ist die Gruppe der Strategien, bei denen der Ein- und der Auslagerungs-LP je Auftrag bei der Reihenfolgeplanung simultan determiniert wird.³⁴⁵ Die *closest available locations*-Strategie kombiniert den Ein- und Auslagerungsauftrag mit der jeweils geringsten Einzelfahrzeit (Einlagerungszeit sowie Auslagerungszeit) zu einem Doppelspiel³⁴⁶, ungeachtet der Zwischenfahrzeit. Bei der *nearest neighbour*-Strategie werden der *first come first served* durchzuführende Einlagerungsauftrag und derjenige Auslagerungsauftrag kombiniert, deren LP den geringsten zeitlichen Abstand voneinander und somit die geringste Zwischenfahrzeit aufweisen, ungeachtet der Entfernungen beider LP vom EP bzw. vom AP. Die *shortest leg*-Strategie geht von mehreren parallelen Ein-

³⁴¹ Auch als *shortest process time* bezeichnet. Vgl. VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000, S. 1344).

³⁴² Vgl. BRANDES (1997, S. 140), der eine Übersicht der möglichen Kombinationen bietet.

³⁴³ Zum ungarischen Verfahren siehe DOMSCHKE/ DREXL (2011, S. 54) und die dort zitierte Literatur.

³⁴⁴ Vgl. CHEN/ LANGEVIN/ RIOPEL (2007).

³⁴⁵ Eine simultane Auswahl des LP und des ergänzenden Auslagerungsauftrags führt zu erhöhtem Rechenaufwand und ist nur bei einer geringen Anzahl möglicher LP und Auslagerungsaufträge durchführbar. EBEN-CHAIME (1992) führt eine simultane Bestimmung durch, verwendet aber lediglich drei bis fünf offene LP pro Regalwand, um das Optimierungsproblem klein zu halten.

³⁴⁶ Vgl. Abschnitt 3.3.5.7.

lagerungsaufträgen aus, betrachtet zusätzlich die Einlagerungszeit und wählt zunächst die Kombination aus einem Ein- und einem Auslagerungsauftrag aus, die die geringste Summe aus Einlagerungszeit und Zwischenfahrtzeit aufweist.³⁴⁷ Wird zusätzlich noch die Auslagerungszeit bei der Tourenbildung berücksichtigt, so spricht man von der Wegzeitminimierung (Strategie *total travel time*), bei der jeweils der Ein- und Auslagerungsauftrag kombiniert werden, die die Summe aus Einlagerungs-, Zwischen- und Auslagerungsfahrzeit minimieren.³⁴⁸ Die letzten drei Strategien benötigen jedoch Informationen über die geplanten Ein- und Auslagerungs-LP vor der Tourenbildung, um die zur Enumeration aller Möglichkeiten benötigte Wartezeit zu vermeiden.

Bisherige Untersuchungen belegen, dass durch Reduzierung der Zwischenfahrzeiten um 50 % der Umschlag des aHRL um 10-15 % gesteigert werden kann.³⁴⁹ Dabei liegen nach LEE/ SCHAEFER und MAHAJAN/ RAO/ PETERS die durch Anwendung der *nearest neighbour*-Strategie erzielbaren Doppelspielzeiten nur um $\leq 6\%$ über den analytisch bestimmbaren, optimalen Lösungen.³⁵⁰ Simulationsstudien zeigen, dass die *shortest leg*-Strategie bei simultaner LP-Zuordnung und Reihenfolgebildung Einlagerungen nahe dem Übergabepunkt forciert, was je nach Verweildauerverteilung der Artikel zu einem reduzierten Umschlag des aHRL führen kann. Dabei liegt die mittlere Fahrzeit bei Anwendung der *shortest leg*-Heuristik über der bei Anwendung der *nearest neighbour*-Heuristik.³⁵¹

MENEGHETTI/ MONTI stellen einen Algorithmus zur Bildung energieeffizienter Doppelspiele vor, wobei jedoch die Zeit- und Energiebedarfe für die Zwischenfahrten nicht beachtet werden. Dazu bestimmen sie für jede einzulagernde LE den LP der Regalwand (keine Zonierung), der den geringsten Energieaufwand während der Einlagerung hervorruft. Auf Basis der jeweils nächsten 15 bekannten Ein- und Auslagerungsaufträge (Mengenblock) werden die Ein- und Auslagerungsaufträge derart kombiniert, dass der Energiebedarf aller festgelegten Doppelspiele minimiert wird.³⁵² Die Simulationsergebnisse für ein AKL zeigen, dass bereits durch die Bildung von Doppelspielen mit *first come first served*-Auswahl des Ein- und Auslagerungsauftrags eine mittlere Spielzeitreduzierung von 29,7% und eine Energiebedarfsreduzierung von 26,6% gegenüber Einzelspielen erreicht werden können. Werden nun die Ein- und die Auslagerungen nach der *total travel time*-Strategie

³⁴⁷Eine Variante der Strategie *shortest leg* ergibt sich, wenn anstelle der freien Kombinierbarkeit von Ein- und Auslagerungen die Auslagerung *a priori* bestimmt wird und dazu ein passender Einlagerungsauftrag gewählt wird, der die Summe aus Einlager- und Zwischenfahrtzeit minimiert. Vgl. GUDEHUS (1973a), zitiert von SCHUMANN (2008, S. 78). Eine zweite Variante der Strategie ergibt sich, wenn während der Einlagerungszeit der gegenwärtige Auslagerungsauftrag durch einen neu hinzugekommenen Auslagerungsauftrag mit einer geringeren Zwischenfahrtzeit ersetzt werden darf.

³⁴⁸Vgl. HAN/ MCGINNIS/ SHIEH *et al.* (1987, S. 57-65), LEE/ SCHAEFER (1996, S. 2946) sowie VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000, S. 1343f).

³⁴⁹Vgl. HAN/ MCGINNIS/ SHIEH *et al.* (1987, S. 65).

³⁵⁰Vgl. LEE/ SCHAEFER (1996, S. 2961f) sowie MAHAJAN/ RAO/ PETERS (1998, S. 1730). Ähnlich BRANDES (1997, S. 191f und 204).

³⁵¹Vgl. HAN/ MCGINNIS/ SHIEH *et al.* (1987, S. 65).

³⁵²Einlagerungsaufträge werden dabei *first come first served* abgearbeitet.

zu Doppelspielen kombiniert, so liegen die Spielzeiten um 2,4 % unter denen bei Bildung energieminimaler Doppelspiele. Jedoch liegt der Energiebedarf bei Bildung energieminimaler Doppelspiele um 1,7 % unter dem bei Bildung zeitoptimaler Doppelspiele (unter Nutzung der *total travel time*-Strategie).³⁵³ Die energiebasierten Doppelspiele führen nur zu einer geringen Reduktion des Energiebedarfs bei gleichzeitiger Spielzeiterhöhung. Die Untersuchungen von MENEGHETTI/ MONTI stellen nur eine vereinfachte Betrachtung einer energieeffizienten Spielbildung dar, ohne jedoch z. B. den von der LE abhängigen Energiebedarf einer Ein- oder Auslagerung zu beachten.

MAKRIS/ MAKRI/ PROVATIDIS stellen einen Algorithmus zur Bildung energieeffizienter Mehrfachspiele bei RBG mit Mehrfach-LAM vor. Dabei werden die Touren durch Reihenfolgemodifikation der Ein-, Um- und Auslagerungs-LP derart gebildet, dass die durchzuführende Hub- und Senkarbeit der LAM minimiert wird. Die erzielten Einsparungen variieren je nach zugrundeliegender Regalwandgeometrie und betragen 12-21 % gegenüber einer fahrzeitoptimalen Variante. Dabei treten jedoch durchweg Verlängerungen der mittleren Fahrzeit in Höhe von 4-15 % auf. Die Autoren verweisen darauf, dass die fahrzeitoptimale Tourenbildung nur in Zeiten von Spitzenlasten von besonderer Relevanz sei, wohingegen in Zeiten geringerer Auslastung die Fahrzeiterhöhungen in Folge einer energieeffizienten Reihenfolgebildung akzeptabel seien. Anzumerken ist, dass das in der Studie verwendete Energiemodell starke Vereinfachungen enthält, beispielsweise wird für Hub- und Senkbewegung ein Energiebedarf in gleicher Höhe angenommen. Hub- und Senkbewegungen werden als energiebedürftig und reibungsfrei angenommen, während die Reibung in der horizontalen Bewegung berücksichtigt wird. Zudem wird die Masse der bewegten LE nicht mit in die Energiebetrachtung einbezogen. Die vereinfachte Energiekalkulation geschieht auf Basis der potentiellen Energie der Hub- und Senkbewegung, ohne jedoch Zwischenkreiskopplung oder Energierückspeisung zu betrachten. Eine direkte Übertragbarkeit auf Ein- und Auslagerungen bei der Nutzung von RBG ist aufgrund des vereinfachten Energiemodells und der Nichtbetrachtung der Masse der LE nicht gegeben.³⁵⁴

3.3.5.6 Dringlichkeitsregeln Verschiedene Regeln zur Reihenfolgebildung, z. B. die *nearest storage/ retrieval*-Strategie, zielen auf eine Reduktion der mittleren Fahrzeit ab, können aber bei manchen Aufträgen lange Wartezeiten erzeugen, insbesondere wenn eine dynamische Reihenfolgebildung³⁵⁵ angewendet wird. Zur Lösung dieses Problems können Fälligkeiten in Form von Dringlichkeitsregeln implementiert werden.³⁵⁶ Dabei ist ein Ausgleich zwischen dem Umschlag des aHRL und der Dringlichkeit von Aufträgen zu finden.

³⁵³Vgl. MENEGHETTI/ MONTI (2011, S. 1674).

³⁵⁴Vgl. MAKRI/ MAKRI/ PROVATIDIS (2006, S. 1122).

³⁵⁵Vgl. Abschnitt 3.3.5.5.1.

³⁵⁶Vgl. VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000, S. 1342 und 1346).

Eine Möglichkeit zur Wahrung von Fälligkeiten in der Reihenfolgebildung besteht darin, Aufträge, die im Moment der Reihenfolgebildung eine definierte Zeitspanne bis zu ihrer Fälligkeit unterschreiten, bevorzugt einzulasten. Dabei sind zwei Interpretationen dieser Regel denkbar: Einerseits können die gleichen Strategien zur Reihenfolgebildung wie für nicht dringende Aufträge angewendet werden, wenn der nächste dringende Auftrag ausgewählt wird. Andererseits ist die Anwendung der *longest waiting retrieval*-Strategie zur Auswahl der nächsten dringenden Auslagerungsauftrag denkbar.³⁵⁷ LEE/ KIM stellen einen Ansatz zur Minimierung der Unter- und Überschreitungen von Fälligkeitsdaten auszulagernder LE vor, in dem entsprechende Ein- und Auslagerungsaufträge kombiniert werden.³⁵⁸

3.3.5.7 Befehlszyklus des RBG Nachdem die Reihenfolge der Ein- und Auslagerungen festgelegt wurde, ist der Fahrmodus des RBG zur Auftragsbearbeitung zu bestimmen: Hierzu zählen die Spielbildung und die Festlegung des Verweilpunkts.

3.3.5.7.1 Spielbildung Wie in Abschnitt 3.2 dargestellt wurde, lassen sich bei den Arbeitsspielen grundsätzlich die Varianten Einzel- und Doppelspiele unterscheiden. Ist das RBG mit einem Mehrfach-LAM ausgerüstet, können zudem Mehrfachspiele realisiert werden, die zusätzlich zur Ein- und Auslagerung auch Umlagerungen umfassen.³⁵⁹ GRAVES/ HAUSMAN/ SCHWARZ zeigen analytisch und simulativ, dass bei einer verweildauerbasierten LP-Zuordnung die maximalen Zeitersparnisse erreicht werden, sofern immer wenn möglich Doppelspiele³⁶⁰ gebildet werden.³⁶¹

Als weitere Möglichkeit neben Einzel-, Doppel- und Mehrfachspielen kann ein *pursuit mode* genutzt werden, bei dem das RBG nach Abschluss einer Einlagerung und fehlendem Folgeauftrag nicht zwangsweise zum EP zurückfährt, sondern am LP der Einlagerung verbleibt.³⁶² Wird als nächster Fahrauftrag eine Auslagerung gewählt, ergibt sich somit der gleiche Fahrweg wie bei einer *a priori*-Festlegung eines Doppelspiels. Der *pursuit mode* nimmt somit eine Zwischenstellung zwischen Einzel- und Doppel- bzw. Mehrfachspiel ein. LINN/ WYSK weisen nach, dass bei einem heterogenen Anfall von Ein- und Auslagerungen der *pursuit mode* der Durchführung von Einzelspielen vorgezogen werden sollte, um die Wartezeiten der ein- und auszulagernden LE zu minimieren.³⁶³

Bietet das RBG ein Mehrfach-LAM, so können mehrere Ein- bzw. Auslagerungsaufträge zu einem Fahrauftrag zusammengefasst werden.³⁶⁴ In diesem Fall sind Bündelungs-

³⁵⁷Vgl. VASILI/ TANG/ VASILI (2012, S. 193).

³⁵⁸Vgl. LEE/ KIM (1995).

³⁵⁹Vgl. KANET/ RAMIREZ (1986, S. 239) sowie VASILI/ TANG/ VASILI (2012, S. 171-174).

³⁶⁰Engl. *mandatory interleaving*.

³⁶¹Vgl. GRAVES/ HAUSMAN/ SCHWARZ (1977, S. 943) sowie ähnlich BRANDES (1997, S. 203).

³⁶²Vgl. LINN/ WYSK (1987, S. 67 und 79).

³⁶³Vgl. LINN/ WYSK (1987, S. 79).

³⁶⁴Vgl. MALMBORG/ KRISHNAKUMAR (1989, S. 197f).

strategien festzulegen. Hierzu zählen die Art der Bündelung (statisch oder dynamisch), die Größe eines Bündels (kapazitäts- oder zeitbasiert) sowie eine Auswahlregel zur Zuordnung von Aufträgen zu Bündelaufträgen. Ansätze zur LP-Zuordnung bei RBG mit Doppel-LAM findet sich in einer Serie von Artikeln von SARKER *et al.*³⁶⁵

SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK vergleichen den Energiebedarf eines AKL-RBG bei der Durchführung von Einzel- und Doppelspielen. Die Durchführung von Doppelspielen anstelle von Einzelspielen wurde anhand der Referenzspiele von FEM 9.851 und VDI 3561 hinsichtlich ihres Energiebedarfs bewertet: Dabei beziffern die Autoren den Energiebedarf eines Doppelspiels auf um 18,6-21,3 % unter dem Wert zur Durchführung der beiden entsprechenden Einzelspiele.³⁶⁶

3.3.5.7.2 Verweilpunkt Im Rahmen der Verweilpunktstrategie wird determiniert, welche Position das RBG im Leerlauf einnimmt, um die Wegzeiten der bekannten oder unbekanntem Folgeaufträge zu minimieren.³⁶⁷ EGBELU/ WU identifizieren die folgenden sechs Verweilpunktstrategien:³⁶⁸ (1) Anfahren des Punkts, der die erwartete Fahrzeit zum nächsten Bedarfspunkt minimiert, (2) Anfahren des Punkts, der die maximale Fahrzeit zum nächsten Bedarfspunkt minimiert, (3) Anfahren des EP, (4) Anfahren des AP, (5) Anfahren des horizontalen und vertikalen Mittelpunkts der Regalwand sowie (6) Verweilen am letzten Punkt des vorherigen Spiels³⁶⁹. Die Autoren weisen nach, dass die beiden erstgenannten Strategien die geringsten mittleren Spielzeiten erzielen. Im Falle hoher Durchsatzanforderungen führen beide Strategien dazu, dass sich das RBG immer am EP positioniert. Die beiden Strategien bringen dann also die gleichen Resultate wie Strategie #3.³⁷⁰ GRAVES/ HAUSMAN/ SCHWARZ postulieren die Strategie #3, wonach das RBG den EP anfahren sollte.³⁷¹ VAN DEN BERG weist diesbezüglich darauf hin, dass in einem aHRL langfristig das Verhältnis von Ein- zu Auslagerungen bei 1:1 liegt und somit der EP der generell günstigste Verweilpunkt sei. Bei einem kurzfristig höherem Anteil an Auslagerungen könne jedoch eine andere Verweilpunktstrategie geeignet sein, um die Fahrzeit des nächsten Auftrags zu reduzieren. Daher sei eine belastungsorientierte Wahl

³⁶⁵Vgl. SARKER/ BABU (1995), SARKER/ MANN/ LEAL DOS SANTOS (1994) sowie SARKER/ SABAPATHY/ LAL *et al.* (1991).

³⁶⁶Vgl. SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012a, S. 9f). Wie in Abschnitt 3.3.5.5.3 dargestellt wurde, liegt in einer Untersuchung von MENEGHETTI/ MONTI (2011, S. 1674) der Energiebedarf eines Doppelspiels im Mittel um 26,6 % unter der Summe der entsprechenden Einzelspiele.

³⁶⁷Vgl. HU/ HUANG/ CHEN *et al.* (2005, S. 1520), VAN DEN BERG (1999, S. 759) sowie VASIL/ TANG/ VASIL (2012, S. 181).

³⁶⁸Vgl. EGBELU/ WU (1993, S. 2516) sowie ähnlich BOZER/ WHITE (1984, S. 334).

³⁶⁹Engl. *pursuit mode*. Vgl. Abschnitt 3.3.4 sowie LINN/ WYSK (1987, S. 67).

³⁷⁰Vgl. EGBELU/ WU (1993, S. 2515f und 2526). Ähnlich EGBELU (1991, S. 17-19) sowie SARKER/ BABU (1995, S. 177).

³⁷¹Vgl. GRAVES/ HAUSMAN/ SCHWARZ (1977, S. 9).

des Verweilpunkts notwendig.³⁷² MELLER/ MUNGWATTANA weisen simulativ nach, dass in aHRL mit hoher Auslastung der RBG ($> 85\%$) die Verweilpunktstrategie aufgrund der geringen Verweilzeit kaum Einfluss auf den Umschlag ausübt und die o. g. Strategie #6, d. h. das Verweilen am letzten Punkt, zum höchsten Umschlag führt.³⁷³ MENEGHETTI/ MONTI untersuchen die o. g. Strategien #1 und #3 (bei einem gemeinsamen EP/ AP) in Hinblick auf die entstehenden mittleren Fahrzeiten und Ergiebedarfe für unterschiedlich schiefe Nachfrageverteilungen und Regalwanddimensionen. Dabei gehen sie insbesondere von der Situation aus, dass keine Einlagerungsaufträge vorliegen. Simulationsergebnisse zeigen, dass Strategie #1 im Mittel zu einer um $16,9\%$ geringeren Fahrzeit, jedoch auch zu einem um $32,4\%$ höheren Energiebedarf als Strategie #3 führt.³⁷⁴

Es fehlen jedoch simulative Untersuchungen, die die quantitativen Vorteile der Verweilpunktstrategie bei zeitlich unterschiedlicher Verteilung der Ein- und Auslagerungen beziffern, wie VASILI/ TANG/ VASILI bemerken.³⁷⁵

3.3.5.8 Fazit Wie bereits erläutert, weisen bisherige Studien zu Lagerstrategien bis auf wenige Ausnahmen³⁷⁶ lediglich zeitbezogene Zielkriterien, z. B. mittlere Fahrzeiten, Auslastungen oder Wartezeiten, auf. Dabei zeigt sich, dass der maximal mögliche Umschlag v. a. von den Strategien zur LP-Zuordnung sowie zur Reihenfolgebildung abhängig ist: Bei heterogenem Nachfrageverhalten, d. h. schiefen Nachfragekurven, und praxisnahen LFG bieten verweildauerbasierte LP-Zuordnungen auf LE-Basis die geringsten mittleren Spielzeiten.³⁷⁷ Jedoch erwächst aus der Nichtnutzung langsamer LP der Regalwand Potential, wie bereits die Ausführungen von YU/ DE KOSTER gezeigt haben.³⁷⁸ Bei der Reihenfolgebildung zeigt sich ein uneinheitliches Bild: So weist die *nearest neighbour*-Strategie deutliche Einspareffekte auf, während andere Strategien, wie *shortest leg* oder *total travel time*, nur in einzelnen Szenarien vorteilhaft sind. Andere Strategiebestandteile, z. B. die Verweilpunktstrategie, haben in hoch ausgelasteten aHRL nur geringen Einfluss auf den Umschlag, da der leistungssteigernde Effekt nur beim zeitweisen Ausbleiben von Folgeaufträgen genutzt werden kann.

Hinsichtlich der Optimierung der Energieeffizienz von aHRL durch den Einsatz von Lagerstrategien liegen bisher nur wenige Untersuchungen vor: SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK fokussieren sich auf die energetische Bewertung bekannter Strategien zur LP-Zuordnung

³⁷²Vgl. VAN DEN BERG (2002, S. 22). Der Beitrag bietet analytische Berechnungen zum optimalen Verweilpunkt je nach gewählter Strategie der LP-Zuordnung.

³⁷³Vgl. MELLER/ MUNGWATTANA (2005, S. 5227).

³⁷⁴Vgl. MENEGHETTI/ MONTI (2011a, S. 7f).

³⁷⁵Vgl. VASILI/ TANG/ VASILI (2012, S. 183).

³⁷⁶Z. B. MAKRI/ MAKRI/ PROVATIDIS (2006), MENEGHETTI/ MONTI (2011 und 2011a), SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012 und 2012a), SCHULZ/ MAHRENHOLZ/ ZADEK (2013).

³⁷⁷Vgl. Abschnitt 3.3.5.2.3.

³⁷⁸Vgl. YU/ DE KOSTER (2009, S. 4 und 12f).

in AKL.³⁷⁹ SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* stellen eine Strategie zur energieeffizienten LP-Zuordnung vor³⁸⁰, die im Rahmen dieser Arbeit auf ihre Wirksamkeit bei aHRL hin untersucht wird.³⁸¹ MENEGHETTI/ MONTI entwickeln ebenfalls eine eigene Strategie zur energieeffizienten LP-Zuordnung. Diese Eigenentwicklung bietet jedoch nur eine geringe Energieeinsparung, die zudem durch eine steigende mittlere Fahrzeit erkauft wird. MENEGHETTI/ MONTI stellen fest, dass allein durch die Bildung von Doppelspielen signifikante Einsparungen in Fahrzeit und Energiebedarf erzielt werden können.³⁸² Ein entsprechender Algorithmus zur Reihenfolgebildung wurde von den Autoren vorgestellt.

Alle diese Erkenntnisse sollen Ausgangspunkt zur Entwicklung von energieeffizienten Lagerstrategien für aHRL sein.

³⁷⁹Vgl. SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012 und 2012a), SCHULZ/ MAHRENHOLZ/ ZADEK (2013) sowie Abschnitt 3.3.5.2.3.

³⁸⁰Vgl. SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* (2013).

³⁸¹Vgl. Abschnitt 4.4.

³⁸²Vgl. MENEGHETTI/ MONTI (2011, S. 1674).

4 Bewertung der Energieeffizienz von Lagerstrategien

Nachfolgend werden Strategien zur LP-Zuordnung hinsichtlich ihrer Energieeffizienz³⁸³ bewertet. Dabei wird ein Energiemodell verwendet, das auf Basis eines untersuchten, real existierenden aHRL entwickelt wurde.³⁸⁴ Das Energiemodell ist Teil eines Gesamtmodells, das u. a. die LP-Verwaltung, die Auftragsbildung und die Strategieranwendung umfasst. Die durchzuführende Simulationsstudie umfasst die Phasen Vorbereitung (Abschnitt 4.2), Durchführung (Abschnitt 4.3) und Auswertung (Abschnitt 4.4), die nachfolgend durchlaufen werden.³⁸⁵ Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage zur Entwicklung neuer Strategien zur LP-Zuordnung in Kapitel 5. Zunächst wird die Simulation als Bewertungsmethode erläutert.

4.1 Simulative Bewertung von Lagersystemen

4.1.1 Modelle, Modellierung und Simulation

In vielen Fällen sollen Erkenntnisse über ein System gewonnen werden, ohne dass an diesem die dazu notwendigen Untersuchungen oder Veränderungen durchgeführt werden können.³⁸⁶ In diesen Fällen bieten sich Untersuchungen an einem Modell an, d. h. an einer mathematischen oder physikalischen Darstellung des Systems, die das System auf Grund bekannter Gesetzmäßigkeiten oder getroffener Annahmen hinreichend genau abbildet.³⁸⁷ Jedem Modell kann nach STACHOWIAK ein Abbildungsmerkmal (Abbildung eines Originals), ein Verkürzungsmerkmal (Abbildung lediglich eines Ausschnitts des Originals) sowie ein pragmatisches Merkmal (Modell nur unter bestimmten Bedingungen und für bestimmte Fragestellungen verwendbar) attestiert werden.³⁸⁸

³⁸³Vgl. Formel 3.7 auf S. 34.

³⁸⁴Das aHRL wird von einem Handelsunternehmen im Raum Stuttgart betrieben. Die Firma ist dem IFT bekannt, kann aber aus Geheimhaltungsgründen in dieser Arbeit nicht genannt werden.

³⁸⁵Vgl. VDI 3633-1 (2000, S. 10-21).

³⁸⁶Eine Manipulation des Systems ist häufig zu kostspielig, zu zeitaufwändig oder zu gefährlich. Zudem kann ein reales Experiment für eine Beobachtung zu schnell vorbei sein (z. B. Explosion) oder zu lange andauern (z. B. Verschiebungen im Weltraum). Des Weiteren können sich zu untersuchende Störungen oder Systemparameter dem Zugriff des Experimentierenden entziehen. Im Falle eines nicht existierenden Systems, beispielsweise in dessen Planung, ist eine Untersuchung unmöglich. Vgl. CELLIER (1991, S. 10f) sowie CORSTEN/ CORSTEN/ SARTOR (2005, S. 224f).

³⁸⁷Vgl. DIN IEC 60050-351 (2009, S. 17). Stehen jedem Element und jeder Beziehung zwischen Elementen des Systems ein Element bzw. eine Beziehung im Modell gegenüber *et vice versa*, so handelt es sich um ein strukturgleiches (isomorphes) Modell. Isomorphe Modelle stellen bei der Abbildung realer, komplexer Systeme einen theoretischen Idealfall dar. Werden bei der Modellierung des Systems Vereinfachungen eingeführt, handelt es sich um ein strukturähnliches (homomorphes) Modell.

³⁸⁸Vgl. STACHOWIAK (1973, S. 131-133). In VDI 2249 (2003, S. 14) kommen diese drei Merkmale in der Formulierung „[e]in Modell ist ein dem Zweck entsprechender Repräsentant (Vertreter) eines Originals“ zum Tragen. ORESKES/ SHRADER-FRECHETTE/ BELITZ (1994, S. 644) kritisieren die Subjektivität von Modellen: „A model, like a novel, may resonate with nature, but it is not a "real" thing. [...] How much is based on observation and measurement of accessible phenomena, how much is based on informed judgment, and how much is convenience?“

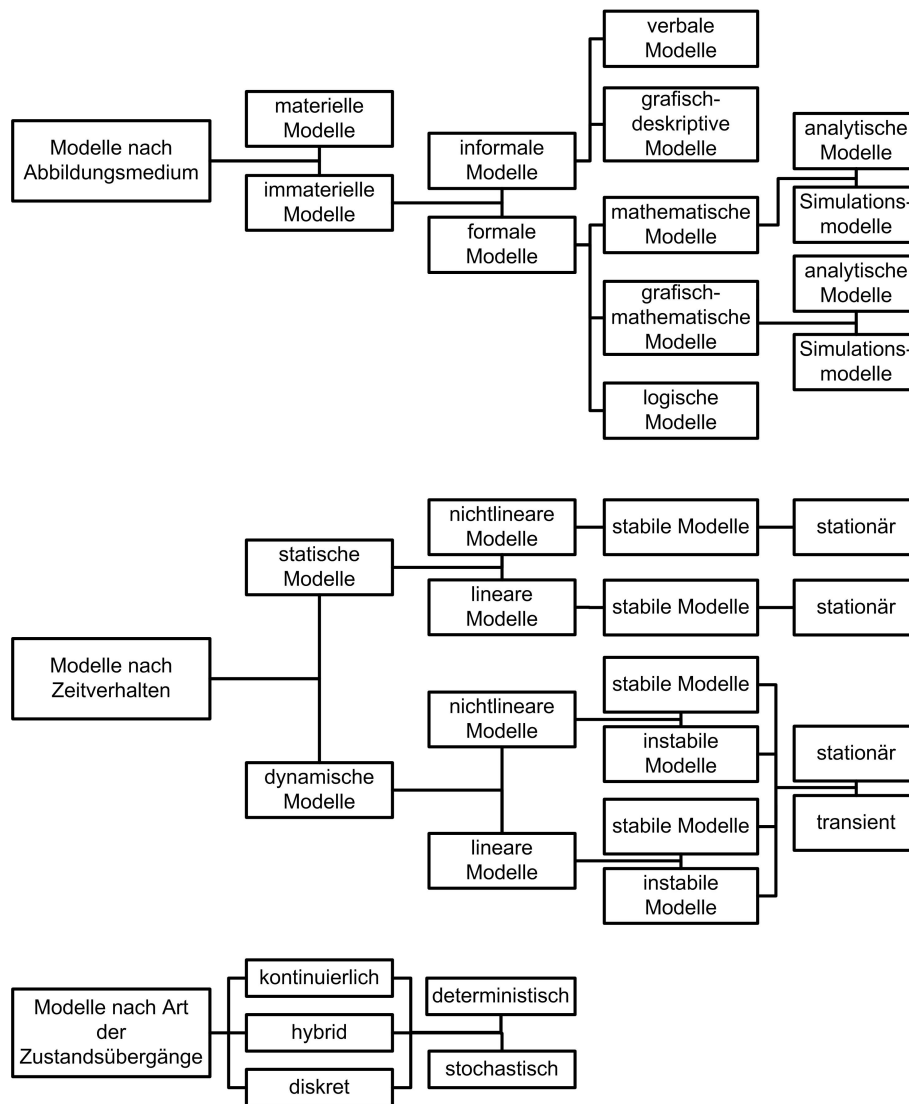


Abbildung 4.1: Klassifikation von Modellen (eigene Darstellung)

Modelle lassen sich unter anderem nach dem Abbildungsmedium, ihrem Zeitverhalten sowie der Art ihrer Zustandsübergänge klassifizieren. Abbildung 4.1³⁸⁹ stellt diesen Kategorien die jeweiligen Modellarten gegenüber. Die für Fragestellungen in aHRL relevanten Modelle lassen sich wie folgt eingrenzen:³⁹⁰

- Nach dem Abbildungsmedium handelt es sich vorwiegend um immateriell-formale Modelle. Immateriell-informale Modelle werden allenfalls zur schematischen Darstel-

³⁸⁹Klassifikation von Modellen nach dem Abbildungsmedium nach NIEMEYER (1977, S. 58-60) sowie PAGE (1991, S. 5); Klassifikation nach dem Zeitverhalten nach FORRESTER (1964, S. 49-53); Klassifikation nach Art der Zustandsübergänge in Anlehnung an PAGE (1991, S. 6), PRITSKER (1998, S. 37-47) und NIEMEYER (1977, S. 58-60). Weitere Einteilungskriterien bieten JOCKISCH/ ROSENDAHL (2010), KOŠTURIK/ GREGOR (1995, S. 7) sowie VDI 3633-1 (2000, S. 14). *Transient* beschreibt ein Modellverhalten, das auch nach Ende einer Einschwingphase keine Stabilität aufweist.

³⁹⁰Sind alle dem Modell zu Grunde liegenden Informationen bekannt, so handelt es sich um ein deterministisches Modell. Sind die Ausprägungen relevanter Modelldaten hingegen unsicher und nur durch Zufallsvariablen abbildbar, liegt ein stochastisches Modell vor.

lung von aHRL genutzt. Die Wahl von mathematischen oder von grafisch-mathematischen Modellen hängt vom jeweiligen Untersuchungsziel ab. Dies gilt ebenso für die analytische oder simulative Kalkulation des Modells.

- Nach dem Zeitverhalten sind vordergründig dynamische Modelle von Interesse, die die Veränderung des Systemstatus' über die Zeit beschreiben. Vorwiegend handelt es sich dabei um Modelle mit einem hohen Grad an Nichtlinearität, nur in Ausnahmefällen sind lineare oder linearisierte Modelle anwendbar. Die Modellstabilität ist im Einzelfall zu untersuchen.
- Nach der Art der Zustandsübergänge kommen sowohl diskrete, kontinuierliche als auch hybride Modelle zum Einsatz. Dabei treten in den Modellen meist Kombinationen aus stochastischen und deterministischen Einflüssen auf.

Die Erstellung des Modells, die Modellierung³⁹¹, umfasst die gezielte Vereinfachung und Abstraktion, ohne die untersuchungsrelevanten Eigenschaften und Verhaltensmechanismen des Systems zu verfälschen.³⁹² Hierfür bieten sich die Modellierung vom Groben ins Detail (*top down*) oder die Synthese des Ganzen ausgehend vom Detail (*bottom up*) an.³⁹³

In Simulationen werden an den erstellten Modellen Experimente durchgeführt, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf das zugrundeliegende System übertragbar sind.³⁹⁴ Der Einsatz der Simulation bietet sich an, wenn keine analytischen Methoden existieren, ihre Anwendung nicht praktikabel³⁹⁵ oder nur nach verfälschenden Vereinfachungen möglich ist. Die Simulation beinhaltet eine Abbildung des zu analysierenden Problems mit Hilfe quantitativer Modelle sowie eine experimentelle Analyse der Auswirkungen der Entscheidungsvariablen auf eine Zielfunktion.³⁹⁶

Ein Simulationsmodell besteht aus Entitäten, also eindeutig bestimmbar Objekten, deren Verhalten während der Simulation definiert ist und die mehrere Eigenschaften besitzen.³⁹⁷ Die Entitäten reflektieren die interagierenden Komponenten des realen Systems, also am Beispiel eines aHRL die LE, das Lagermittel oder die RBG.

Aus dem Zusammenspiel von realem System, Modell und Simulation entsteht der in Abbildung 4.2³⁹⁸ illustrierte Regelkreis der Simulation: Ein reales System ist Basis für die Erstellung eines abstrakten und vereinfachten Simulationsmodells, an dem Experimente zur Erzielung formaler Ergebnisse durchgeführt werden. Diese Ergebnisse sind die

³⁹¹Die Modellierung wird auch als Modellbildung bezeichnet.

³⁹²Vgl. VDI 3633-1 (2000, S. 3).

³⁹³Eine Bewertung beider Ansätze findet sich in KOŠTURIK/ GREGOR (1995, S. 119).

³⁹⁴Vgl. VDI 3633-1 (2000, S. 2). Ähnlich SMITH (2003, S. 157).

³⁹⁵In diesem Fall können die Anforderungen analytischer Lösungsalgorithmen nicht erfüllt werden.

³⁹⁶Vgl. TEMPELMEIER (1991, S. 1-3).

³⁹⁷Vgl. PAGE/ KREUTZER (2005, S. 24) sowie SCHUBERT (2007, S. 276).

³⁹⁸Bildquelle: WENZEL/ AHRENS/ SCHÜRHOLZ *et al.* (1993, S. 1) nach ARBEITSGEMEINSCHAFT SIMULATION (ASIM). Ähnlich PAGE (1991, S. 11).

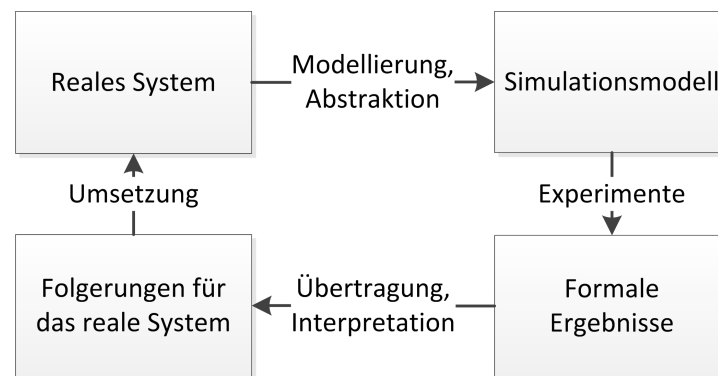


Abbildung 4.2: Regelkreis der Simulation nach WENZEL/ AHRENS/ SCHÜRHOZL *et al.* (1993)

Grundlage zur Ableitung von Folgerungen für das reale System, die bei Umsetzung die Modellbasis verändern und neue Simulationsexperimente anstoßen können.

4.1.2 Bewertung der Simulation

Die Simulation kann durch die vorher notwendige Analyse des Modellverhaltens zu einem gesteigerten Problemverständnis beitragen. Zudem ermöglicht sie die Überprüfung vorher gewonnener analytischer Lösungen. Des Weiteren können in der Simulation die Auswirkungen gezielter Variationen der Einflussgrößen auf die Zielgröße(n) beobachtet werden. Dem gegenüber steht der Aufwand zum Entwurf der Simulationsmodelle. Auch muss häufig eine Vielzahl von Simulationsläufen durchgeführt werden, um die Auswirkung unterschiedlicher Eingangsparameter zu vergleichen und die statistische Relevanz der Ergebnisse zu gewährleisten. Die hohe Anzahl notwendiger Simulationsläufe erzeugt zwangsläufig eine große Menge an Ausgabedaten, deren Interpretation häufig erst nach ihrer Aufbereitung und Vereinfachung möglich ist. Problematisch ist zudem, dass Simulationen nur singuläre Ergebnisse liefern, z. B. den Auslastungsgrad einer Maschine, jedoch keine Erkenntnisse über die Richtung der Lösungssuche, z. B. welche Werte der Eingangsparameter diesen Auslastungsgrad maximieren.³⁹⁹

³⁹⁹Vgl. BANKS (1998, S. 10-13), CORSTEN/ CORSTEN/ SARTOR (2005, S. 224), KOŠTURIK/ GREGOR (1995, S. 64-70), KUMPF (2001, S. 51-54), MEYERS/ STEPHENS (2000, S. 376), NYHUIS/ WIENDAHL (2012, S. 40) sowie TEMPELMEIER (1991, S. 1-3). Zur Kombination von Simulation und Optimierungsalgorithmen siehe GEHLEN (2004) sowie SUHL/ MELLOULI (2009).

4.2 Modellierung eines automatischen Hochregallagers

4.2.1 Ablauf der Simulationsstudie

Eine Simulationsstudie gliedert sich in die Phasen Vorbereitung, Durchführung und Auswertung.⁴⁰⁰ Abbildung 4.3⁴⁰¹ illustriert die dabei zu durchlaufenden Schritte: Zunächst sind anhand einer ermittelten Problemstellung sowie der darauf folgenden Problemanalyse die Ziele der Simulation zu spezifizieren. Es folgt eine Darstellung des dynamischen Prozessverhaltens des Systems. Auf Basis der dabei gewonnenen Erkenntnisse sind die zur Erstellung eines Simulationsmodells notwendigen Daten, Regeln und Restriktionen zu ermitteln, aufzubereiten und abzustimmen. Zur Simulationsdatenbasis zählen Daten der statischen Systemstruktur (z. B. Anlagenlayout), der Systemkomponenten, des dynamischen Systemverhaltens (z. B. Fahrgeschwindigkeiten) sowie der Systemlast (z. B. Aufträge). Im nächsten Schritt ist ein symbolisches Modell des Systems zu erstellen, das jedoch noch nicht experimentierbar ist. Dazu wird das reale System im Rahmen einer Systemanalyse gemäß den Untersuchungszielen strukturiert und seine Komplexität aufgelöst. Durch Abstraktion, d. h. Idealisierung und Reduktion, bildet das Modell nur noch die für das Prozessverhalten maßgeblichen Eigenschaften des Systems ab. Auf Grundlage des symbolischen Modells kann nun entschieden werden, ob eine analytische oder eine simulative Untersuchung durchgeführt werden soll. Eine analytische Lösung beinhaltet das Aufstellen sämtlicher verhaltensbeschreibender Modellgleichungen sowie die anschließende analytische oder numerische⁴⁰² Lösung des entstandenen Gleichungssystems. Eine simulative Untersuchung bedarf eines *software*-internen Simulationsmodells.⁴⁰³ Zur Beschreibung der Modellabläufe kommen Algorithmen in Form von Verzweigungen, Bedingungen, Schleifen oder Aktionssequenzen zur Anwendung. Im Rahmen von numerischen Untersuchungen werden die Eingangsparameter des Modells systematisch variiert und die relevanten Ausgangsgrößen aufgezeichnet. Zur Variation der Eingangsparameter können

⁴⁰⁰Vgl. VDI 3633-1 (2000, S. 10-21).

⁴⁰¹Bildquelle: VDI 3633-1 (2000, S. 10). Ähnliche Abläufe sind in ARNOLD/ FURMANS (2007, S. 317-322), BANKS (1998, S. 15-18), MEYERS/ STEPHENS (2000, S. 377f), RABE/ SPIECKERMANN/ WENZEL (2008, S. 45-51) sowie WENZEL (2000, S. 9f) erläutert. PAGE (1991, S. 10-18) beschreibt ein ähnliches Vorgehen, bezeichnet es jedoch als „Phasen des Modellierungsprozesses“, was der häufig unscharfen Abgrenzung zwischen Modellierung und Simulation geschuldet ist.

⁴⁰²Das numerische Lösen eines linearen Gleichungssystems kann als Zwischenstufe zwischen Analytik und Simulation gesehen werden. Treten im Gleichungssystem jedoch nichtlineare Einflüsse auf oder werden die Modellgleichungen durch stochastisches Verhalten charakterisiert (z. B. durch Hinterlegen von statistischen Verteilungen für exogene Parameter), so kann die numerische Untersuchung der Simulation zugerechnet werden.

⁴⁰³Hierzu kann entweder eine Simulationsumgebung verwendet werden oder das Simulationsmodell ist in einer Programmiersprache umzusetzen. Zwischen diesen Extrema existieren verschiedene Zwischenstufen, beispielsweise die Nutzung einer bausteinbasierten Simulationsumgebung mit einer Schnittstelle zu einer zugehörigen objektorientierten Programmiersprache. Als Simulationssoftware gilt nach PAGE (1991, S. 157) „jede Art von Software, die für Aufgaben im Rahmen der Modellbildung und Simulation eingesetzt wird“.

Zufallszahlen genutzt werden, die gemäß vorher definierter statistischer Verteilungen erzeugt werden.⁴⁰⁴

Ein Simulationslauf umfasst die Simulation eines Modells über einen bestimmten Modellzeitraum.⁴⁰⁵ Durch Replikation, also mehrfaches Wiederholen eines „Simulationslaufs mit den gleichen Daten und Parametern, aber mit anderen Startwerten für die Programme zur Erzeugung von Zufallszahlen“⁴⁰⁶, können Aussagen zur statistischen Sicherheit der Simulationsergebnisse getroffen werden. Wiederholte Simulationsläufe mit systematischer Parameter- oder Strukturvariation, d. h. unterschiedlicher Logik oder unterschiedlichen Daten, bilden ein Simulationsexperiment.⁴⁰⁷ Das Gesamtprojekt zur simulationsgestützten Untersuchung eines Systems wird als Simulationsstudie bezeichnet.⁴⁰⁸

Die in den Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse sind aufzubereiten, d. h. in einen nutzbaren Zustand zu versetzen. Zur Ergebnisdarstellung eignen sich Verfahren der Statistik (z. B. Mittelwerte), Grafiken (z. B. Zeitverläufe) und Animationen.⁴⁰⁹ Zuletzt sind die ermittelten Ergebnisse auszuwerten und zu interpretieren. Anschließend können Maßnahmen für das System abgeleitet werden.

Der Prozess der Simulation wird flankiert von Maßnahmen zur Verifikation und Validierung des Modells. Die Verifikation umfasst die formale Überprüfung der internen Fehlerfreiheit eines Modells.⁴¹⁰ Die Validierung bezieht sich auf die „Prüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Original“, um sicherzustellen, dass das „Modell das Verhalten des realen Systems genau genug und fehlerfrei widerspiegelt.“⁴¹¹

Voraussetzungen für sinnvolle Auswertungen von Simulationsstudien sind neben der Experimentplanung u. a. die hinreichende Schnittstellendefinition des Modells, z. B. in Form der getroffenen Annahmen, zu denen im vorliegenden Fall beispielsweise die Szenarien aus Massespannweite und LFG gehören⁴¹², die Wahl eines möglichst geringen Modellkomplexitätsgrads und die Verwendung von Realdaten, zu denen im vorliegenden Fall beispielsweise die Nenngeschwindigkeiten von Fahr- und Hubwerk gehören⁴¹³, als Eingangsgrößen.⁴¹⁴

⁴⁰⁴Vgl. PAGE (1991, S. 14). Eine Übersicht über statistische Verteilungen und deren Nutzung in der Simulation findet sich in KOŠTURIK/ GREGOR (1995, S. 28-45).

⁴⁰⁵Vgl. VDI 3633-1 (2000, S. 3).

⁴⁰⁶RABE/ SPIECKERMANN/ WENZEL (2008, S. 12).

⁴⁰⁷Vgl. VDI 3633-1 (2000, S. 3).

⁴⁰⁸Vgl. VDI 3633 (1996, S. 15).

⁴⁰⁹Vgl. VDI 3633-1 (2000, S. 21), VDI 3633-2 (1997, S. 9-19) sowie VDI 3633-11 (2003, S. 1-8).

⁴¹⁰Vgl. KNAAK/ PAGE/ KREUTZER (2005, S. 198f) sowie RABE/ SPIECKERMANN/ WENZEL (2008, S. 14).

⁴¹¹VDI 3633-1 (2000, S. 19). Ähnlich KNAAK/ PAGE/ KREUTZER (2005, S. 198). Eine Beschreibung der zur Verifikation und Validierung von Simulationsmodellen einsetzbaren Techniken und Vorgehensweisen findet sich in RABE/ SPIECKERMANN/ WENZEL (2008, S. 93-191).

⁴¹²Vgl. Abschnitt 4.3.

⁴¹³Vgl. Abschnitt 4.2.3.1.

⁴¹⁴Vgl. VDI 3633-3 (1997, S. 3f).

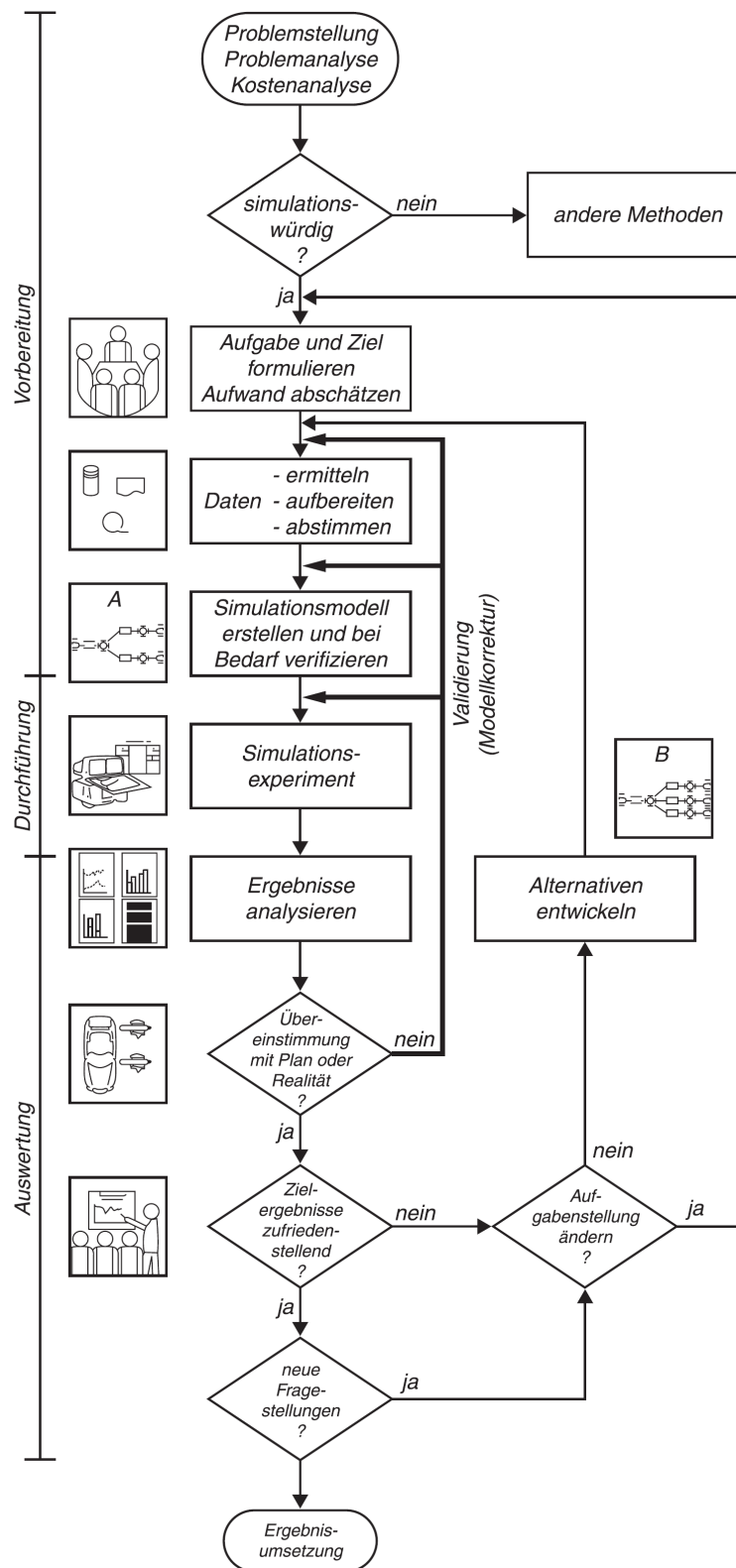


Abbildung 4.3: Ablauf einer Simulationsstudie nach VDI 3633-1 (2000)

4.2.2 Problemstellung, Simulationswürdigkeit und Zielformulierung

Als Problemstellung wird mangelndes Wissen über den Umschlag und die Energieeffizienz bekannter sowie neu zu entwickelnder Lagerstrategien in aHRL definiert. Aufgrund der Komplexität der Problemstellung, der großen Datenmengen, des unklaren Einflusses der Eingangsdaten auf die Ergebnisgrößen und des Fehlens analytischer Modelle wird die Simulation als Untersuchungsmittel gewählt. Analytische Lagermodelle zur Bewertung von Lagerstrategien lassen sich für kleine Lager berechnen, scheitern jedoch an der Größe der Optimierungsaufgabe bei großen Lagern. Bei großen Lagern sind für den Einsatz analytischer Verfahren Aggregationen notwendig, um die Komplexität des Optimierungsproblems zu reduzieren.⁴¹⁵ Aggregationen sind z. B. in Bezug auf die Artikel möglich, indem die Kosten der Ein- und Auslagerung als unabhängig von der jeweiligen LE angenommen werden.⁴¹⁶ Da in dieser Arbeit die Energiebedarfe in Abhängigkeit von LE und LP betrachtet werden, ist diese Aggregation nicht möglich. Eine andere mögliche Aggregation betrifft die Verweildauer der LE, indem Verweildauerklassen anstelle von LE-individuellen Verweildauern angenommen werden.⁴¹⁷ Diese Aggregation wäre in der angestrebten Untersuchung weniger problematisch, würde jedoch eine unnötige Vereinfachung realer Zusammenhänge bedeuten.

Gemeinhin sind bei Simulationsstudien zwei Zielsetzungen denkbar:⁴¹⁸ Die erste Zielsetzung liegt in der Ermittlung eines Optimalzustands eines Systems. Dabei werden Eingangsparameter variiert und anschließend wird aus den getesteten Datensätzen derjenige ausgewählt, der zum besten Zielfunktionswert führt. Der ermittelte Optimalzustand ist dabei nicht zwingenderweise das globale Optimum, da unklar bleibt, ob ein nicht getesteter Datensatz zu einem besseren Zielfunktionswert geführt hätte. Die zweite Zielsetzung liegt in der Analyse des Systemverhaltens. Dabei wird untersucht, wie Einflussgrößen das System verändern und welche Abhängigkeiten zwischen den Elementen bestehen. Diese Arbeit verfolgt beide Zielsetzungen: Durch Variation der Strategien sowie der inhärenten Strategieparameter werden unterschiedliche Konfigurationen gebildet. Aus den Ausgangsparametern sollen als Gesamtziel Aussagen über den Umschlag und die Energieeffizienz bekannter und neu entwickelter Lagerstrategien getroffen werden. Als Teilziele sollen die mittleren Fahrzeiten und die mittleren Energiebedarfe bei der Ein- und Auslagerung von LE bewertet werden.⁴¹⁹ Zwischen den Teilzielen können Wechselwirkungen bestehen, die erfasst und analysiert werden müssen. Dabei stehen die langfristigen Auswir-

⁴¹⁵Darüber hinaus kann mit analytischen Modellen gewöhnlich nur ein stationäres Lager betrachtet werden, d. h. jeder Artikel hat eine konstante Verweildauer und der Nachschub erfolgt in konstanten Losgrößen. Vgl. GOETSCHALCKX (2012, S. 40).

⁴¹⁶Nur unter Einhaltung dieser *factoring condition* kann das Kostenelement der resultierenden Zielfunktion des analytischen Modells bereits vor der Modelllösung berechnet werden. Vgl. Abschnitt 2.4.2.

⁴¹⁷Vgl. GOETSCHALCKX (2012, S. 37 und 50).

⁴¹⁸Vgl. KRAMER (1994, S. 145f).

⁴¹⁹Vgl. Abschnitt 4.3.

kungen der untersuchten Lagerstrategien im Fokus, während auf kurzfristige dynamische Betrachtungen, z. B. durch Auswertung der Fahrzeit und des Energiebedarfs einzelner Aufträge, verzichtet wird.

4.2.3 Datenermittlung

Bei der Simulation von Realsystemen sind Daten zur Systemlast, Organisation und Technik möglichst aus den Charakteristika des real existierenden Systems zu gewinnen. Fehlende Daten⁴²⁰ müssen unter Beachtung von getroffenen Annahmen erzeugt werden. Für die durchzuführende Simulationsstudie werden nachfolgende Realdaten und ergänzende Annahmen zu Grunde gelegt.⁴²¹

4.2.3.1 Technische Daten Als Basis für die Bewertung der Energieeffizienz von Lagerstrategien wird das Modell eines real existierenden aHRL herangezogen. Abgebildet wird ein aHRL mit acht Gassen mit je einem gassengebundenen RBG und zwei Regalwänden. Jede Regalwand besteht aus einer Mehrfachanordnung einfachtiefer, homogener (d. h. mit gleichen Abmessungen, Kapazitäten und Tragfähigkeiten) LP in $n_{LP,x}$ Spalten und $n_{LP,y}$ Zeilen. Dabei sind je drei LP zu einem Regalfach zusammengefasst, das durch horizontale Traversen und vertikale Regalständer begrenzt wird.⁴²² Die Einlagerung der LE erfolgt längs, d. h. vom Gang erfolgt der Zugriff auf die Stirnseite der LE. Jeder LP einer Regalwand ist durch eine horizontale Koordinate x , mit $x \in \{1 \dots n_{LP,x}\}$, und eine vertikale Koordinate y , mit $y \in \{1 \dots n_{LP,y}\}$, eindeutig gekennzeichnet. Je Gasse existieren ein EP sowie ein AP, die in der gleichen Koordinate ($x = 0$ und $y = 1$, d. h. sie befinden sich in der untersten Zeile und der Spalte 0 einer jeden Regalwand), jedoch an unterschiedlichen Seiten des RBG-Fahrwegs positioniert sind.⁴²³ Somit ergeben sich keine Unterschiede in Fahrzeit und Energiebedarf zur Anfahrt beider Punkte, so dass im Folgenden der EP und der AP als ÜP zusammengefasst werden. Alle Gassen sind über eine gemeinsame Vorzone miteinander verknüpft. Der Aufbau und die Steuerung der Lagervorzone werden nicht betrachtet, da hier kein einschränkender Einfluss auf die Fahrzeiten und Energiebedarfe der RBG angenommen wird.⁴²⁴ Schnittstellen des Modells sind demnach die ÜP.

Im aHRL werden LE als artikelreine Paletten der Grundfläche 1.200 mm×800 mm gelagert. Aufgrund der Homogenität der LP ist jeder LP mit jeder LE kompatibel. Die LE

⁴²⁰Informationen sind Angaben über Sachverhalte und Vorgänge, die für einen Adressaten von Bedeutung sind. Informationen werden durch Daten repräsentiert. Durch Interpretation werden aus Daten Informationen. Vgl. EIGNER/ GERHARDT/ GILZ *et al.* (2012, S. 75).

⁴²¹Zur besseren Vergleichbarkeit mit früheren Untersuchungen orientieren sich die Annahmen an GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990, S. 1123) sowie HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 630).

⁴²²Vgl. Abschnitt 2.4.2.

⁴²³Nach VDI 2690-1 (1994, S. 5) wird für die unterste Ebene die Koordinate $y = 0$ empfohlen, was hier aus Gründen der leichteren Interpretation der Zuordnung von Regalwandzeile und Koordinate nicht berücksichtigt wird. Die x -Koordinate 0 für den ÜP entspricht jedoch der VDI-Empfehlung.

⁴²⁴Vgl. Abschnitt 2.4.4.

kann vom RBG simultan in x- und y-Richtung bewegt werden. Die resultierende Fahrzeit zwischen zwei Punkten ist das Maximum aus der isolierten Fahr- und Hubzeit.⁴²⁵

Im Falle einer Senkbewegung des Hubwagens kann der im Generatormodus arbeitende Hubantrieb die dabei erzeugte Energie über eine Zwischenkreiskopplung dem Fahrtrieb des RBG zur Verfügung stellen. Bremsst das Fahrwerk, so wechselt der Fahrtrieb ebenfalls in den Generatormodus und kann die dabei erzeugte Energie dem Hubwerk zum Anheben des Hubwagens und der LE bereitstellen. Die RBG weisen kein Energierückspeisesystem auf.⁴²⁶ Der Energiebedarf der RBG wird auf Basis ihrer konstruktiven, elektrotechnischen und kinematischen Eigenschaften in einem mechanischen Energiemodell ermittelt. Das Modell der RBG wird in Abschnitt 4.2.4.3 vorgestellt. Tabelle 4.1 listet relevante Daten des aHRL auf.⁴²⁷

Größe	Symbol	Wert	Einheit
Anzahl Spalten	$n_{LP,x}$	69	—
Anzahl Zeilen	$n_{LP,y}$	20	—
Anzahl LP je Regalwand	$n_{LP,RW}$	1.380	—
Länge LP in x-Richtung	l_{LP}	1,0	m
Höhe LP in y-Richtung	h_{LP}	1,8	m
Nenngeschwindigkeit Fahrwerk	v_x	140	m/min
Nenngeschwindigkeit Hubwerk	v_y	40	m/min
Beschleunigung/ Verzögerung Fahrwerk	a_x	0,4	m/s ²
Beschleunigung/ Verzögerung Hubwerk	a_y	0,5	m/s ²
Leistung Antrieb Fahrwerk	$P_{Nenn,x}$	14,2	kW
Leistung Antrieb Hubwerk	$P_{Nenn,y}$	22,0	kW
Masse RBG	m_{RBG}	16.800	kg
Masse Hubwagen	m_{Hub}	1.190	kg
Masse Teleskopgabel	m_{LAM}	210	kg
Nutzlast RBG	$m_{LE,Max}$	1.200	kg

Tabelle 4.1: Relevante Daten des untersuchten aHRL

Aus der Anzahl der Spalten und Zeilen, deren Abständen sowie den Fahrparametern des RBG ergibt sich im untersuchten aHRL ein Regalwandparameter von etwa 1,6, so dass das RBG zur Anfahrt der obersten Zeile etwa die 1,6-fache Zeit wie zur Anfahrt der hintersten Spalte der Regalwand benötigt (siehe Formel 4.1).

$$b = \frac{t_y}{t_x} = \frac{\frac{(n_{LP,y}-1) \cdot h_{LP}}{v_y} + \frac{v_y}{a_y}}{\frac{n_{LP,x} \cdot l_{LP}}{v_x} + \frac{v_x}{a_x}} = \frac{\frac{19 \cdot 1,8 \text{ m}}{0,67 \frac{\text{m}}{\text{s}}} + \frac{0,67 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}}{\frac{69 \cdot 1 \text{ m}}{2,33 \frac{\text{m}}{\text{s}}} + \frac{2,33 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = \frac{52,4 \text{ s}}{33,1 \text{ s}} = 1,585 \approx 1,6 \quad (4.1)$$

⁴²⁵Vgl. Formel 3.5 auf S. 32.

⁴²⁶Eine vom Autor im Jahr 2014 durchgeführte Umfrage unter neun RBG-Anbietern ergab, dass jeweils etwa 91 % der neu ausgelieferten RBG mit einer Zwischenkreiskopplung ausgerüstet sind, während nur etwa 40 % zusätzlich über ein Energierückspeisesystem verfügen.

⁴²⁷Die RBG-bezogenen Daten entstammen dabei dem Datenblatt des Herstellers.

Nachfrageverteilung	s	α_1	α_2
20/ 60	0,318	1,573	2,000
20/ 65	0,268	1,456	2,000
20/ 70	0,222	1,348	2,000
20/ 75	0,179	1,247	2,000
20/ 80	0,139	1,154	2,000
20/ 85	0,101	1,064	2,000
20/ 90	0,065	0,980	2,000

Tabelle 4.2: Nachfrageverteilung anhand der Parameter α_1 und α_2 nach GLASS (2008)

4.2.3.2 Systemlastdaten In der Simulationsstudie werden bekannte und neu entwickelte Lagerstrategien bei definierten Systemlasten untersucht und bewertet. Hierzu gehören v. a. die Verweildauer- und Masseverteilung sowie der LFG. Da die Verweildauer der LE neben der LP-Auslastung eine der zentralen Einflussgrößen auf die Systemleistung ist⁴²⁸, wird die Verweildauer der LE im Modell als gegeben angenommen und durch eine Beta-Verteilung⁴²⁹ approximiert. Die Beta-Verteilung wird durch zwei reelle Parameter, α_1 und α_2 , spezifiziert. Der Erwartungswert μ der Beta-Verteilung wird gemäß Formel 4.2 bestimmt:

$$\mu = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (4.2)$$

Formel 4.3 beschreibt die Varianz σ^2 der Beta-Verteilung:

$$\sigma^2 = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + 1)} \quad (4.3)$$

Je nach gewählten Werten der Parameter können verschiedene Formen der Nachfrageverteilung modelliert werden. Untersuchungen von GLASS ergaben für verschiedene Nachfrageverteilungen die in Tabelle 4.2 dargestellten Werte für α_1 und α_2 .⁴³⁰ Eine 20/ 75-Nachfrageverteilung bedeutet dabei, dass 75 % aller Lagerzugriffe auf 20 % der gelagerten Artikel stattfinden.

Die LE-Masse wird ebenfalls als Variable betrachtet und durch eine Gleichverteilung approximiert, wobei eine Unter- (z. B. 100 kg) und eine Obergrenze (z. B. 1.200 kg)

⁴²⁸Vgl. PIEPENBURG/ BRUNS (2011, S. 148f) sowie Abschnitt 2.4.1.2.

⁴²⁹Bereits GLASS (2008, S. 77f) stellte die Eignung der Beta-Verteilung zur Abbildung der Verweildauer-Verteilungen großer Sortimente fest. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls eine Beta-Verteilung verwendet.

⁴³⁰Vgl. GLASS (2008, S. 76-80 und 130-133). GLASS leitet die Werte α_1 aus experimentell ermittelten Werten für den Parameter s gemäß der Regressionsgeraden $\alpha_1 = 4 \times (2 - \sqrt{2}) \times s + 2 \times (\sqrt{2} - 1) = 2,343 \times s + 0,828$ ab. Der Parameter s wird von HAUSMANN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 633-635) zur Beschreibung der Lorenzkurve der Artikelnachfrage verwendet und lässt sich über die Beziehung $G_{i=0,2} = 0,6 = 0,2^s$ (für den Fall einer 20/ 60-Nachfrageverteilung) bestimmen. Die Tabelle stellt die Nachfrageverteilung, den Parameter s nach HAUSMANN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976) sowie die Parameter α_1 und α_2 der Beta-Verteilung zur Approximation der Nachfrageverteilung nach GLASS (2008) dar.

Algorithmus 1 Ermittlung des Verweildauerquantils α der eingehenden LE

1. Bestimme die Verweildauer der eingehenden LE $t_{VW, eingehend}$
 2. Sortiere die bereits eingelagerten LE nach aufsteigender Verweildauer $t_{VW,i}$
 3. Für alle $i = 1 \dots n$ eingelagerten LE
 - (a) Vergleiche $t_{VW,i}$ mit $t_{VW, eingehend}$
 - (b) Wenn $t_{VW,i} > t_{VW, eingehend}$,
 - i. dann Verweildauerquantil der eingehenden LE $\alpha = \frac{i}{n+1}$; Ende des Algorithmus
 - ii. sonst: $\alpha = 1$ (für den Fall, dass $t_{VW, eingehend} > t_{VW,i} \forall i \in n$)
-

spezifiziert werden. Der Erwartungswert μ der Gleichverteilung wird wie folgt bestimmt:

$$\mu = \frac{\text{Untergrenze} + \text{Obergrenze}}{2} \quad (4.4)$$

Formel 4.5 beschreibt die Varianz σ^2 der Gleichverteilung:

$$\sigma^2 = \frac{(\text{Obergrenze} - \text{Untergrenze})^2}{12} \quad (4.5)$$

In den Untersuchungen wird ein aHRL mit konstantem LFG betrachtet. Hierfür wird ein balanciertes aHRL⁴³¹ modelliert, d. h. in jeder Periode ist die Anzahl eingehender LE gleich der Anzahl ausgehender LE. Beim Eintreffen einer LE werden das Verweildauerquantil⁴³² α sowie das Massequantil β der LE ermittelt. Zur Bestimmung des Verweildauerquantils α werden die bereits eingelagerten LE im aHRL zunächst nach aufsteigender Verweildauer sortiert. Anschließend wird die Verweildauer der eingehenden LE nacheinander mit der Verweildauer jeder eingelagerten LE verglichen. Das Vorgehen hierzu wird in Algorithmus⁴³³ 1 beschrieben. Analog dazu wird das Massequantil β der eingehenden LE bestimmt (siehe Algorithmus 2).

4.2.3.3 Organisationsdaten Tabelle 2.2 in Abschnitt 2.4.5 zeigt den Steuerungsaufbau eines aHRL. Zur Bewertung von Lagerstrategien sind dabei v. a. die Ebenen La-

⁴³¹Vgl. Abschnitt 2.4.1.2.

⁴³²Ein p -Quantil ist ein Lagemaß der Statistik. Dabei beschreibt p eine reelle Zahl zwischen 0 und 1, wobei im Bereich $[0; p]$ insgesamt $p\%$ aller Beobachtungs- oder Zufallswerte liegen, während im Bereich $[p; 1]$ insgesamt $(1 - p)\%$ aller Werte liegen. Vgl. MOSLER/ SCHMID (2004, S. 48 und 67). Eine eingehende LE mit einer Verweildauer von zwei Tagen besitzt beispielsweise ein Verweildauerquantil von 0,1, wenn 10 % aller LE des Lagers eine Verweildauer von höchstens zwei Tagen besitzen.

⁴³³VON RIMSCHA (2008, S. 3) definiert einen Algorithmus als „Arbeitsanweisung, die uns zeigt, wie eine Aufgabe zu lösen ist“, und fordert von einem Algorithmus Allgemeingültigkeit, Ausführbarkeit und Endlichkeit.

Algorithmus 2 Ermittlung des Massequantils β der eingehenden LE

1. Bestimme die Masse der eingehenden LE $m_{\text{eingehend}}$
 2. Sortiere die bereits eingelagerten LE nach aufsteigender Masse m_i
 3. Für alle $i = 1 \dots n$ eingelagerten LE
 - (a) Vergleiche m_i mit $m_{\text{eingehend}}$
 - (b) Wenn $m_i > m_{\text{eingehend}}$,
 - i. dann Massequantil der eingehenden LE $\beta = \frac{i}{n+1}$; Ende des Algorithmus
 - ii. sonst: $\beta = 1$ (für den Fall, dass $m_{\text{eingehend}} > m_i \forall i \in n$)
-

gerverwaltungssystem und Materialflussrechner zu modellieren, da sich die Informationen zur Durchführung von Lagerstrategien auf beide Ebenen verteilen: So werden im Lagerverwaltungssystem beispielsweise LP an eingehende LE vergeben und auszulagernde LE determiniert; die Spielbildung findet jedoch im Materialflussrechner statt.

Die LP-Zuordnung wird als *online*-Problem⁴³⁴ formuliert, d. h. es sind nur die Informationen über die aktuell eingehende LE bei deren Eintreffen in der Lagervorzone bekannt. Die Strategien zur LP- und Gassen-Zuordnung können daher nur jeweils für die aktuelle LE einen passenden LP bestimmen und haben kein Wissen über nachfolgend eingehende LE.

4.2.4 Erstellung des Simulationsmodells

4.2.4.1 Aufbau des Modells Das Simulationsmodell eines aHRL dient zur Untersuchung bekannter und neu entwickelter Lagerstrategien hinsichtlich der sich ergebenden Fahrzeiten und Energiebedarfe. Das hierfür verwendete Gesamtmodell ist in Abbildung 4.4 in seinem Aufbau dargestellt. Gleichzeitig zeigt die Abbildung auch die Funktionsweise des Gesamtmodells: Die Betriebsleitebene (linker oberer Teil der Abbildung) umfasst die Initialbelegung, die Erzeugung von Ein- und Auslagerungen, die Anwendung der Lagerstrategien sowie die Datenübertragung. Die Modellierung der Steuerungs- und Feldebene der RBG (rechter Teil der Abbildung) beinhaltet eine Leitsteuerung, die Steuerung der RBG, die Bewegung der RBG sowie die Messdatenspeicherung der Leistungsaufnahmen aller acht RBG im Fahrbetrieb. Im Gesamtmodell sind noch die Funktionalitäten zur Auswertung der Simulationsläufe (linker unterer Teil der Abbildung) integriert. Diese beinhalten die Auswertung der Messdaten, d. h. der Positionen und Leistungsaufnahmen aller RBG, sowie die Aufbereitung der Daten mittels programmierter Skripte.

Das für diese Arbeit genutzte Modell der Steuerungs- und Feldebene der RBG (siehe

⁴³⁴Vgl. Abschnitt 3.3.5.2.3.

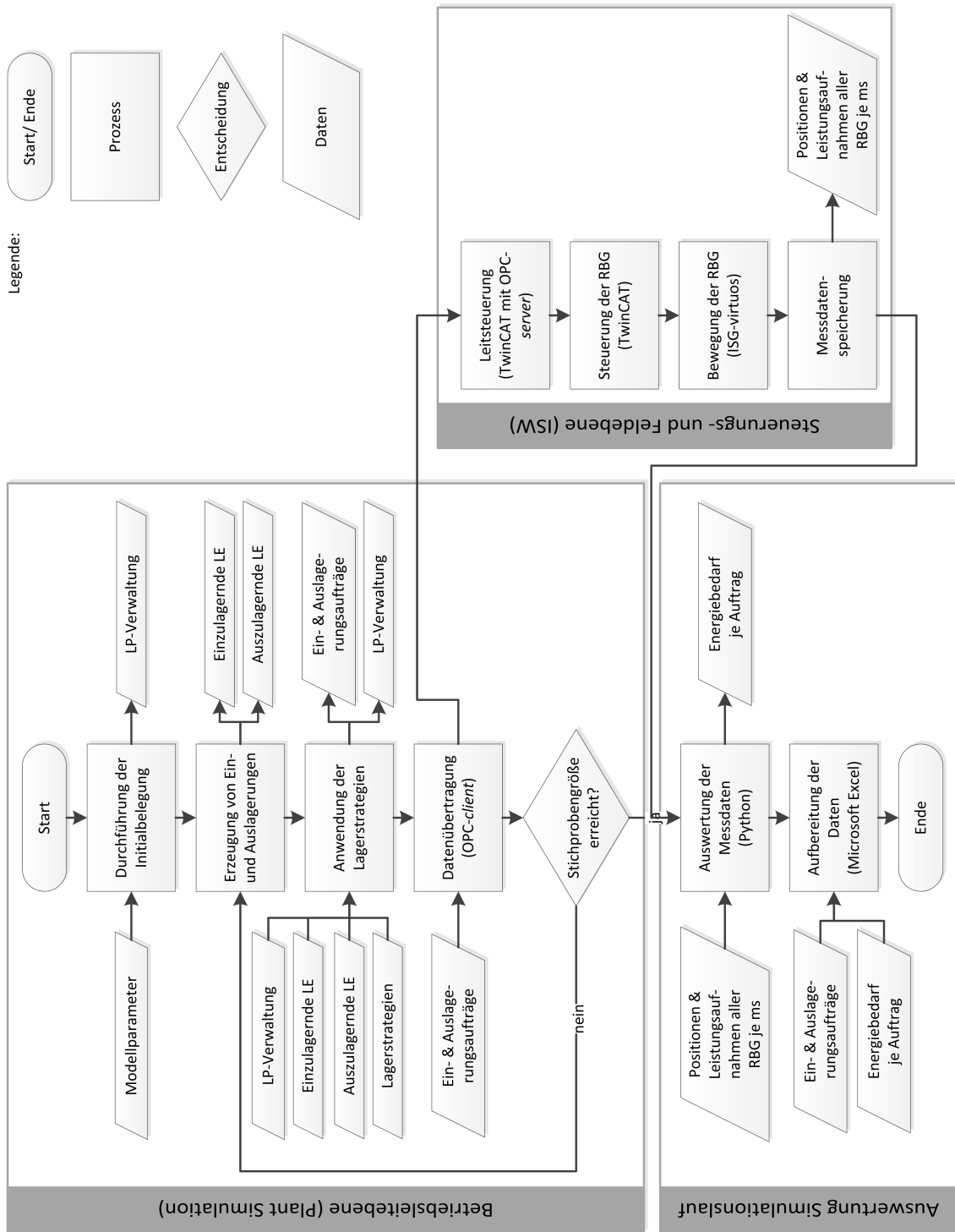


Abbildung 4.4: Aufbau und Funktionsweise des Simulationsmodells (eigene Darstellung)

Abschnitt 4.2.4.3) wurde im Rahmen des Projekts GREENRBG⁴³⁵ vom INSTITUT FÜR STEUERUNGSTECHNIK DER WERKZEUGMASCHINEN UND FERTIGUNGSEINRICHTUNGEN (ISW) der UNIVERSITÄT STUTTGART erstellt. Im Rahmen dieser Arbeit stellt dieses Modell der Steuerungs- und Feldebene nur einen Teil des Gesamtmodells zur Abbildung des Betriebs eines aHRL dar und wird nur zur Bestimmung der mechanischen Leistungsaufnahme der RBG verwendet.

Die nachfolgenden Abschnitte stellen die einzelnen Teile des Gesamtmodells dar.

4.2.4.2 Betriebsleitebene Lagerverwaltungssystem Auf Basis der formulierten Anforderungen an das Modell wurde das Lagerverwaltungssystem⁴³⁶ in der ereignisdiskreten Simulationsumgebung PLANT SIMULATION von SIEMENS erstellt. PLANT SIMULATION ist eine objekt- und bausteinorientierte Software unter MICROSOFT WINDOWS, mit der Abläufe in Produktions- und Logistiksystemen simuliert, visualisiert und analysiert werden können.⁴³⁷ PLANT SIMULATION verfügt über relevante Schnittstellen zu anderen Modellierungs- und Simulationsanwendungen und lässt sich in seinen Funktionen durch Programmierungen in der zugehörigen Programmiersprache SIMTALK erweitern. Das Modell der Betriebsleitebene umfasst die folgenden Funktionen:⁴³⁸

4.2.4.2.1 Bestands- und LP-Verwaltung aller Gassen Zur LP-Verwaltung dient eine zentrale Tabelle im Modell. Dieses Informationsflusselement zeichnet sich durch die in Tabelle 4.3 beschriebenen Variablen je LP aus.⁴³⁹ Der Wert „Fahrzeit zum ÜP“ bezeichnet die ermittelte Fahrzeit des RBG vom EP zum LP und zurück zum AP. Eine statische Variable ändert im Gegensatz zu einer dynamischen Variable ihren Wert in einem Simulationslauf nicht. Die letzten beiden Variablen, Anzahl Einlagerungen und Massesumme, werden in der Auswertung jedes Simulationslaufs im Simulationsexperiment verwendet.

⁴³⁵Das Projekt GREENRBG (Laufzeit: 01.01.2011-31.08.2013) war ein gemeinsames Forschungsprojekt des INSTITUTS FÜR FÖRDERTECHNIK UND LOGISTIK (IFT) und des INSTITUTS FÜR STEUERUNGSTECHNIK DER WERKZEUGMASCHINEN UND FERTIGUNGSEINRICHTUNGEN (ISW) der UNIVERSITÄT STUTTGART. Das Projekt wurde von der BADEN-WÜRTTEMBERG STIFTUNG gGMBH gefördert und von der VDI/VDE INNOVATION + TECHNIK GMBH betreut. Im Rahmen des Projekts GREENRBG lag der Schwerpunkt der Arbeit des IFT in der Modellierung der Betriebsleitebene eines aHRL, der Entwicklung energieeffizienter Lagerstrategien sowie der Auswertung generierter Messdaten. Der Schwerpunkt der Arbeit des ISW lag auf der Modellierung der RBG-Steuerung, der RBG-Bewegung und der Entwicklung von Algorithmen zur Reduktion von Leistungsspitzen im Betrieb der RBG.

⁴³⁶Vgl. hierzu Abschnitt 2.4.5.

⁴³⁷Mit über 10.000 Installationen in Deutschland stellt PLANT SIMULATION eine der am weitesten verbreiteten Simulationswerkzeuge für Produktion und Logistik dar, wobei Referenzkunden insbesondere in der Automobilindustrie zu finden sind. Vgl. LINDEMANN/ SCHMID (2007, S. 55).

⁴³⁸Darüber hinaus ermöglicht das Modell der Betriebsleitebene die Verwaltung, den automatischen Start und die Beendigung von Simulationsexperimenten sowie die Datenspeicherung.

⁴³⁹Zu Datentypen siehe EIGNER/ GERHARDT/ GILZ *et al.* (2012, S. 190-194).

Variable	Datentyp in Plant Simulation	Beschreibung	Einheit	statisch oder dynamisch
Alternative	integer	durchgängige Nummer aller LP	—	statisch
Gasse	integer	Gasse des LP	—	statisch
Antigasse	integer	Gassennummer in umgekehrter Reihenfolge für Sortierungen (Beispiel: Gasse 1 ist bei 8 Gassen Antigasse 8)	—	statisch
Regalwand	integer	Regalwand des LP in der Gasse	—	statisch
Antiregalwand	integer	Regalwandnummer in umgekehrter Reihenfolge für Sortierungen	—	statisch
Spalte	integer	Spalte des LP in der Regalwand	—	statisch
Zeile	integer	Zeile des LP in der Regalwand	—	statisch
belegt	boolean	0=LP ist frei; 1=LP ist mit einer LE belegt	—	dynamisch
Verweildauer	integer	Verweildauer der LE im LP	Sekunden	dynamisch
Masse	integer	Masse der LE im LP	Kilogramm	dynamisch
Fahrweg zum ÜP_x	real	horizontale Entfernung des LP zum ÜP	Meter	statisch
Fahrweg zum ÜP_y	real	vertikale Entfernung des LP zum ÜP	Meter	statisch
Fahrzeit zum ÜP	real	wirksame Fahrzeit zum ÜP	Sekunden	statisch
Zeitzone	string	Zugehörigkeit des LP zur zeitlichen Schnellläuferzone „A“ oder zur Langsamläuferzone „B“	—	statisch
Energiezone	string	Zugehörigkeit des LP zur energetischen Schnellläuferzone „A“ oder zur Langsamläuferzone „C“ oder zur Zone „B“ bei enertetischer ABC-Zonierung	—	statisch
Auslagerungszeitpunkt	datetime	Soll-Auslagerungszeitpunkt der LE im LP auf Basis der Verweildauer	TT.MM.JJJJ hh:mm:ss	dynamisch
mittlerer Energiebedarf	real	ermittelter Energiebedarf für die Ein- und Auslagerung einer durchschnittlich schweren LE	Wattstunden	statisch
Energiespannweite	real	Differenz zwischen dem Energiebedarf zur Ein- und Auslagerung einer schweren und einer leichten LE	Wattstunden	statisch
Anzahl Einlagerungen	real	Anzahl bisheriger Einlagerungen im LP	—	dynamisch
Massesumme	integer	Summe der Massen aller bisher eingelagerten LE im LP	Kilogramm	dynamisch

Tabelle 4.3: Daten der LP-Verwaltung

4.2.4.2.2 Erzeugung von Ein- und Auslagerungsaufträgen Im Modell werden in definierten Abständen Einlagerungsaufträge erzeugt. Eine modellierte Quelle dient als Auslöser und ruft die entsprechende Methode auf, die die Gassen- und die LP-Zuordnung für die parametrisierten LE durchführt. Ausgehende LE werden ebenfalls nur innerhalb aufgerufener Methoden verarbeitet, ohne im Materialfluss des Modells aufzutreten. Dies geschieht, um die Komplexität des Modells zu minimieren und die Handhabbarkeit desselben zu maximieren.

4.2.4.2.3 Initialbelegung des Lagers Bei Simulationsbeginn wird eine Initialbelegung des Lagers durchgeführt. Dabei wird ein Initialfüllgrad $LFG_{Initial}$ erzielt, indem jeder LP des Lagers mit einer Wahrscheinlichkeit von $LFG_{Initial}$ mit einer LE belegt wird. Masse und Verweildauer jeder LE werden gemäß der in Abschnitt 4.2.3.2 dargestellten Verteilungen bestimmt. Eine Strategie zur LP-Zuordnung ist in der Initialbelegung nicht reflektiert. Daher wird im Simulationslauf erst nach einer entsprechenden Einschwingphase⁴⁴⁰ eine der gewählten Strategie entsprechende LP-Belegung erreicht.

4.2.4.2.4 Verwaltung und Anwendung von Lagerstrategien Im Simulationsmodell sind Strategien zur LP-Zuordnung hinterlegt, die beim Eintreffen einer LE in der Vorzone des aHRL aufgerufen werden. Alle untersuchten Lagerstrategien sind in SIMTALK programmiert. Die Gassenzuordnung erfolgt zunächst zufallsbasiert, da in bisherigen Studien keine fahrzeitminimierenden Strategien zur Gassenzuordnung formuliert wurden.⁴⁴¹ Für die LP-Zuordnung werden die in der industriellen Anwendung verbreiteten Varianten Ein-Zonen zufallsbasiert, Ein-Zonen *closest open location* sowie Zwei-Zonen *closest open location* untersucht. Darüber hinaus sind eine energetische ABC-Zonierung nach SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* (nachfolgend als ENM3 bezeichnet) und eine verweildauerbasierte LP-Zuordnung in der Variante DYN nach GLASS implementiert. Die Strategien zur LP-Zuordnung sind wie folgt modelliert:⁴⁴²

1. Ein-Zonen zufallsbasiert (RND1): Hier wird die Tabelle LP-Verwaltung nach der Spalte *belegt* aufsteigend sortiert, so dass freie LP oben in der Tabelle stehen. Danach wird die Anzahl der freien LP der Regalwand ($n_{LP,RW,frei}$) ermittelt. Anschließend wird mittels einer im Bereich $\{1; n_{LP,RW,frei}\}$ gleichverteilten Zufallszahl einer der freien LP ausgewählt und der LE zugewiesen.
2. Ein-Zonen *closest open location* (COL1): Hier wird die Tabelle LP-Verwaltung sowohl nach *belegt* als auch in einer zweiten Stufe nach der Fahrzeit zum ÜP jeweils

⁴⁴⁰Die bei den Simulationsexperimenten gewählte Einschwingphase ist in Abschnitt 4.3 aufgeführt.

⁴⁴¹Vgl. Abschnitt 3.3.5.2.2.

⁴⁴²Vgl. Abschnitt 3.3.5.2.3. Die Verweildauer wird dabei jeweils LE-bezogen, nicht artikelbezogen, bestimmt. Vgl. Abschnitt 3.3.5.2.3.

aufsteigend sortiert, so dass freie LP mit einer kurzen Fahrzeit zum ÜP oben in der Tabelle angeordnet sind. Anschließend wird der oberste LP der Tabelle ausgewählt und der LE zugewiesen.⁴⁴³

3. Zwei-Zonen *closest open location* (COL2): Hier wird jede Regalwand in eine Schnell- und eine Langsamläuferzone eingeteilt. Die Schnellläuferzone umfasst die n LP mit der geringsten Fahrzeit zum ÜP, wobei n aus dem Produkt aus der Anzahl an LP pro Regalwand $n_{LP,RW}$ und einem definierten Grenzsatz, in diesem Fall 20 %, ermittelt wird. Eine LE wird der Schnellläuferzone zugeordnet, wenn ihr Verweildauerquantil⁴⁴⁴ den Grenzsatz unterschreitet oder diesem entspricht, d. h. wenn die Verweildauer der LE zu den 20 % der LE mit den niedrigsten Verweildauern gehört. Liegt das Verweildauerquantil über dem Grenzwert oder sind alle LP der Schnellläuferzone belegt, so erfolgt eine Zuordnung zur Langsamläuferzone. Die Zuordnung innerhalb der jeweiligen Zone erfolgt zum freien LP mit der niedrigsten Fahrzeit zum ÜP (siehe Strategie #2).
4. Energetische ABC-Zonierung mit energieminimaler LP-Zuordnung⁴⁴⁵ innerhalb der Zonen (ENM3): Hier wird jede Regalwand in eine Schnell- („A“) und eine Langsamläuferzone („C“) sowie eine Zone für LE mit mittlerer Verweildauer („B“) eingeteilt. Die Schnellläuferzone umfasst die n LP mit dem geringsten mittleren Energiebedarf, wobei n aus dem Produkt aus der Anzahl an LP pro Regalwand $n_{LP,RW}$ und einem definierten Grenzsatz ermittelt wird. Der Grenzsatz wird analog zu den Untersuchungen von SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* auf $33, \bar{3} \%$ festgelegt⁴⁴⁶, so dass die $0, \bar{3} \times 20 \times 69 = 460$ schnellsten LP der Regalwand der „A“-Zone zugeordnet werden.⁴⁴⁷ Eine LE wird der Schnellläuferzone („A“-Zone) zugeordnet, wenn ihr Verweildauerquantil⁴⁴⁸ den Grenzsatz unterschreitet oder diesem entspricht. Liegt das Verweildauerquantil über $33, \bar{3} \%$ und unter $66, \bar{6} \%$, so erfolgt eine Zuordnung zur „B“-Zone. Die Zuordnung innerhalb der jeweiligen Zone erfolgt zum freien LP mit dem geringsten mittleren Energiebedarf.⁴⁴⁹ Es ist zu beachten, dass SIEGEL/ SCHULZ/ TU-

⁴⁴³Nach BRANDES (1997, S. 109) sowie HAN/ MCGINNIS/ SHIEH *et al.* (1987, S. 57) stellt die Strategie COL1 eine einfach zu implementierende Strategie dar und findet daher häufigen Einsatz in der industriellen Praxis, während SCHUMACHER (2012, S. 226) der Strategie RND1 eine hohe Verbreitung attestiert.

⁴⁴⁴Vgl. Abschnitt 4.2.3.2.

⁴⁴⁵„Niedrigste-Energiebedarfs-Regel“.

⁴⁴⁶Vgl. SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* (2013, S. 100). Die Autoren weichen jedoch anschließend von dieser Festlegung ab und ordnen $34,2 \%$ anstatt $33, \bar{3} \%$ der LP der energetischen „A“-Zone zu. Der Grund hierfür ist, dass die Autoren bei der zeitlichen Zonierung alle LP der Grenz-Isochrone der „A“-Zone zuordnen und bei der energetischen Zonierung eine gleich große „A“-Zone erzielen möchten.

⁴⁴⁷Die „B“-Zone und die „C“-Zone umfassen jeweils ebenfalls 460 LP.

⁴⁴⁸Vgl. Abschnitt 4.2.3.2.

⁴⁴⁹Vgl. SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* (2013, S. 103). Die Autoren bezeichnen die Strategie als energetische Zonierung in Kombination mit einer niedrigste-Energiebedarfs-Regel. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Strategie - um eine einheitliche Nomenklatur sicherzustellen - nachfolgend als ENM3 bezeichnet. In

REK *et al.* explizit eine Zonenzuordnung auf Basis der mittleren Verweildauer des Artikels der LE verfolgen, obwohl, wie in Abschnitt 3.3.5.2.3 dargestellt wurde, eine Zonenzuordnung auf Basis der individuellen Verweildauer der LE zu niedrigeren mittleren Fahrzeiten führt. Um die nachfolgend erzielten Simulationsergebnisse nicht durch diesen Umstand zu verfälschen, wird im Rahmen dieser Arbeit die Strategie ENM3 dahingehend modifiziert, dass die individuelle Verweildauer der LE und nicht die mittlere Verweildauer des Artikels der LE ausschlaggebend für die Zonenzuordnung ist. Ausgehend von den Untersuchungen von GOETSCHALCKX/ RATLIFF und GLASS folgt daraus, dass durch diese Modifikation geringere Fahrzeiten als bei Anwendung der Originalvariante der Strategie nach SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* erzielt werden.⁴⁵⁰

5. DYN: Bei dieser Strategie wird der LE derjenige LP zugeordnet, dessen Fahrzeitquantil dem Verweildauerquantil⁴⁵¹ der LE entspricht. Eine LE, die nur kurz im Lager verbleibt, wird somit möglichst einem LP mit einer geringen Fahrzeit zum ÜP zugeordnet. Zur Umsetzung werden alle LP einer Regalwand ($n_{LP,RW}$) nach aufsteigender Fahrzeit zum ÜP sortiert. Durch eine programmierte Schleife wird der Index eines jeden LP (d. h. $1..n_{LP,RW}$) zur Zahl $n_{LP,RW}$ LP pro Regalwand in Beziehung gesetzt, um für jeden LP ein Fahrzeitquantil zu bilden. Eine eingehende LE wird anschließend dem freien LP einer Ziel-Regalwand zugeordnet, dessen Fahrzeitquantil den geringsten absoluten Abstand zum Verweildauerquantil der LE aufweist.⁴⁵²

4.2.4.3 Steuerung und Bewegung der Regalbediengeräte Als Basis zur Ermittlung des Energiebedarfs der RBG wird ein mechanisches Energiemodell der RBG in das Gesamtmodell integriert.⁴⁵³ Die Nutzung mechanischer Energiemodelle zur Bewertung

der Strategie ENM3 kommt eine energieminimale LP-Zuordnung innerhalb der Zonen zum Tragen. Diese Strategie wurde von SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* auf dem 9. Fachkolloquium der wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik im September 2013 vorgestellt. Die energieminimale LP-Zuordnung innerhalb einer unzonierten Regalwand wurde unabhängig davon vom Autor entwickelt und in einem Vortrag ebenfalls auf dem 9. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik im September 2013 präsentiert. Die energieminimale LP-Zuordnung innerhalb einer unzonierten Regalwand wird daher in Abschnitt 5.2.2 als neu entwickelte Strategie präsentiert.

⁴⁵⁰Vgl. die Ausführungen zu GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990, S. 1127-1130) und GLASS (2008, S. 87f) in Abschnitt 3.3.5.2.3.

⁴⁵¹Vgl. Abschnitt 4.2.3.2.

⁴⁵²Vgl. Abschnitt 3.3.5.2.3.

⁴⁵³Das für diese Arbeit genutzte Modell der Steuerung und Bewegung der RBG wurde im Rahmen des Projekts GREENRBG vom INSTITUT FÜR STEUERUNGSTECHNIK DER WERKZEUGMASCHINEN UND FERTIGUNGSEINRICHTUNGEN (ISW) der UNIVERSITÄT STUTTGART erstellt und wird in dieser Arbeit zur Bestimmung der mechanischen Leistungsaufnahme der RBG verwendet. Das Projekt GREENRBG (Laufzeit: 01.01.2011-31.08.2013) war ein gemeinsames Forschungsprojekt des INSTITUTS FÜR FÖRDERTECHNIK UND LOGISTIK (IFT) und des INSTITUTS FÜR STEUERUNGSTECHNIK DER WERKZEUGMASCHINEN UND FERTIGUNGSEINRICHTUNGEN (ISW) der UNIVERSITÄT STUTTGART. Das Projekt wurde von der BADEN-

von Energieeffizienz-Strategien wird u. a. von SCHMIDT/ SCHULZE postuliert: Demnach ist die mechanische Arbeit zum Heben, Senken und Beschleunigen primäre Ursache für den elektrischen Energiebedarf automatisierter Anlagen. Die Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Arbeit erfolgt in mehreren Schritten mit jeweils nichtlinearem, betriebszustandabhängigem Wirkungsgrad⁴⁵⁴, so dass eine Berechnung der elektrischen Energie mit hohen Ungenauigkeiten versehen wäre.⁴⁵⁵

Im Fokus der maschinennahen Simulation⁴⁵⁶ der RBG stehen Analysen der Kinematik und Dynamik, d. h. der Bewegung der materiellen Körper der RBG unter der Einwirkung von Kräften und Nebenbedingungen⁴⁵⁷, um die Leistungsaufnahmen während der Durchführung von Lageroperationen ermitteln zu können. Um ein realitätsnahes Abbild der leistungsbestimmenden Zusammenhänge der RBG-Komponenten zu generieren, wird die Mehrkörpersimulation (MKS) als Simulationstechnologie verwendet.⁴⁵⁸ Dabei wird jedes RBG durch ein Mehrkörpermodell abgebildet, das aus den in Abbildung 4.5⁴⁵⁹ dargestellten Elementen besteht: Die Systemkomponenten werden durch Starrkörper repräsentiert, die die Geometrieinformationen, Massen und Trägheitseigenschaften der Komponenten enthalten, jedoch keine elastischen Bauteileigenschaften aufweisen. Ideale Gelenke verbinden die Starrkörper, so dass diese sich gegeneinander bewegen können. Durch masselose Koppellelemente mit spezifischen Kraftgesetzen können Kräfte und Momente im Modell erzeugt werden.⁴⁶⁰ Ergänzend können Beobachtungspunkte implementiert werden, d. h. Punkte auf einem Starrkörper, für die gewünschte Größen (z. B. ihre jeweilige Position und Geschwindigkeit) berechnet werden.⁴⁶¹ Aus dem physikalischen Modell werden vom Simulationsprogramm die mathematischen Gleichungen zur Beschreibung des Systemverhaltens abgeleitet. Die entstehenden Gleichungen, d. h. Differentialgleichungen, algebraische Gleichungen sowie Mischformen, bilden das mathematische Ersatzmodell des untersuchten Systems.⁴⁶² Das Gleichungssystem wird in den Simulationsläufen numerisch

WÜRTTEMBERG STIFTUNG GMBH gefördert und von der VDI/VDE INNOVATION + TECHNIK GMBH betreut.

⁴⁵⁴In Asynchronmotoren treten Kupfer- und Eisenverluste im Ständer, Stromwärmeverluste in der Läuferwicklung sowie mechanische Reibungs- und Ventilationsverluste auf. Vgl. FISCHER (2011, S. 181f).

⁴⁵⁵Vgl. SCHMIDT/ SCHULZE (2011, S. 156f). Zur Lösung dieses Problems schlagen die Autoren die Erfassung von Wirkungsgrad-Kennfeldern der Komponenten in Referenzspielen vor, gefolgt von einer Beschreibung der Kennfelder mit Hilfe von Näherungsformeln. Nach Ermittlung der mechanischen Arbeit in einer Simulation kann somit die elektrische Energie aus Simulation und Wirkungsgrad-Kennfeldern abgeleitet werden.

⁴⁵⁶In VDI 3633-8 (2007, S. 3) wird die maschinennahe Simulation als „Simulation von Fertigungsmaschinen und ihrer Peripherie“ beschrieben.

⁴⁵⁷Vgl. EIGNER/ GERHARDT/ GILZ *et al.* (2012, S. 19).

⁴⁵⁸Darüber hinaus wird das MKS-Modell vom ISW genutzt, um Strategien zur Vermeidung von Leistungsspitzen zu erproben. Diese Betrachtungen sind jedoch nicht Teil dieser Arbeit.

⁴⁵⁹Bildquelle: VDI 3633-8 (2007, S. 34).

⁴⁶⁰Die Koppellelemente gliedern sich in passive Krafterelemente, z. B. Federn, Dämpfer oder Reibungselemente, sowie in aktive Krafterelemente, z. B. Elektromotoren.

⁴⁶¹Vgl. RILL/ SCHAEFFER (2010, S. 2) sowie VDI 3633-8 (2007, S. 32-36).

⁴⁶²Vgl. EIGNER/ GERHARDT/ GILZ *et al.* (2012, S. 37).

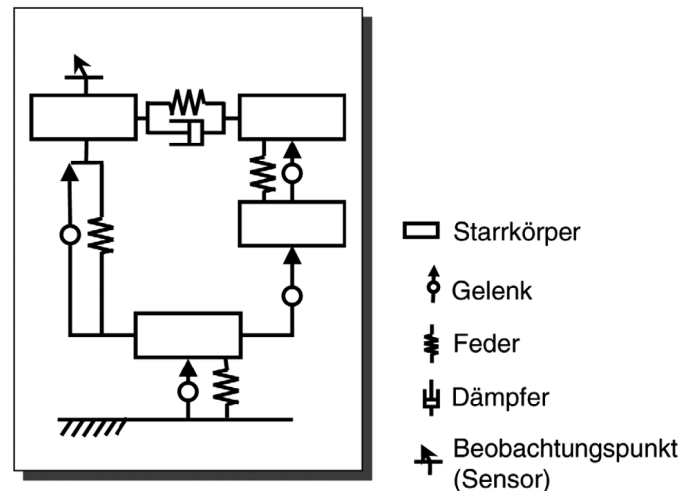


Abbildung 4.5: Topologiediagramm eines Mehrkörpermodells nach VDI 3633-8 (2007)

ausgewertet.⁴⁶³

Zur Gewinnung der relevanten Modellparameter wurde im Projekt GREENRBG vom ISW ein RBG des untersuchten Realsystems in Referenzfahrten mit definierten Lasten belegt und die entstehenden Messwerte, z. B. die Drehzahlen der Antriebe, wurden aufgezeichnet. Die Messdaten bildeten in Kombination mit Herstellerangaben, z. B. zur RBG-Masse, die Ausgangsbasis zur Erstellung des MKS-Modells der RBG.

Im vorliegenden Fall ist das MKS-Modell der RBG in ISG-VIRTUOUS implementiert.⁴⁶⁴ ISG-VIRTUOUS ist eine *hardware in the loop*⁴⁶⁵-Simulationsplattform, d. h. eine PC-Software zur Simulation von virtuellen Maschinen und Anlagen, die an reale Steuerungstechnik angebunden sind. ISG-VIRTUOUS ermöglicht eine zeitsynchrone Kommunikation zwischen Steuerung und Simulation sowie eine robuste und effiziente Berechnung des dynamischen Achs- und Maschinenverhaltens⁴⁶⁶, so dass eine echtzeitfähige⁴⁶⁷ Berechnung dynamischer

⁴⁶³Vgl. RILL/ SCHAEFFER (2010, S. 21-25 und 61-66) sowie VDI 3633-8 (2007, S. 32-37). Hierzu werden numerische Integrationsverfahren verwendet. Vgl. hierzu HANKE-BOURGEOIS (2009, S. 557-578).

⁴⁶⁴In anderen Forschungsprojekten werden ähnliche Modellierungsansätze verfolgt: So verwenden ERTL/ GÜNTNER/ FISCHER *et al.* (2012) beispielsweise die Simulationsumgebung MATLAB/ SIMULINK als Implementierungsplattform für ein MKS-Modell eines RBG, das in ADAMS von MSC SOFTWARE erstellt wurde.

⁴⁶⁵Bei einer *hardware in the loop*-Simulation werden zwischen Steuerung und Simulation E/A-Daten in Echtzeit über reale Feld- und Antriebsbussysteme übertragen. Dabei werden sowohl zeitdiskretisierte Soll- und Istwerte für die Antriebe als auch logische Signale zwischen Steuerung und Simulation ausgetauscht. Eine *hardware in the loop*-Simulation besteht aus einem mathematischen Teilmodell, das in Kombination mit einer elektronischen oder mechanischen Komponente, z. B. einem Steuergerät, das Verhalten eines realen Systems nachbildet. Die elektronische oder mechanische Komponente (*hardware*) ist dabei in einem geschlossenen Regelkreis mit dem Simulationsrechner verbunden (*in the loop*). Vgl. RÖCK (2007, S. 49) sowie VDI 3633-8 (2005, S. 3).

⁴⁶⁶Vgl. RÖCK (2007, S. 47).

⁴⁶⁷SCHNEIDER (2008, S. 359) definiert Echtzeit wie folgt: „[E]in digitaler Regelkreis kann [...] in Echtzeit, also in der Geschwindigkeit des Prozesses, in der zu regelnden Anlage alle notwendigen Berechnungen durchführen.“ Nach ZÖBEL (2008, S. VII) sind Echtzeitsysteme „dadurch gekennzeichnet, dass rechtzeitig in technische Anwendungen steuernd, regelnd oder überwachend eingegriffen wird.“

Systeme durchführbar ist.⁴⁶⁸ ISG-VIRTUOS besteht aus einem echtzeitfähigen Rechenkern für Logik, Kinematik, Regelung und Kinetik⁴⁶⁹ und aus Datenschnittstellen zur Kommunikation zwischen Steuerungssystem und Rechenkern sowie zwischen Nutzer und Rechenkern.⁴⁷⁰

Die Steuerung der RBG ist in der Software TWINCAT von BECKHOFF AUTOMATION modelliert. TWINCAT ist eine Echtzeit-Softwarelösung unter MICROSOFT WINDOWS mit für das Projekt relevanten SPS-Funktionen. Durch die Verwendung von TWINCAT lassen sich handelsübliche PC als Echtzeit-Steuerung nutzen und über einen Feldbus mit einer realen Maschine oder einer Maschinensimulation verknüpfen.⁴⁷¹ In Kombination mit ISG-VIRTUOS sind zwei Betriebsarten möglich, um virtuelle Maschinen (in diesem Fall die RBG) zu simulieren:⁴⁷² Entweder wird TWINCAT sowohl als Steuerung als auch als Echtzeitsystem für ISG-VIRTUOS genutzt, um die Steuerung und die Simulation auf dem gleichen PC laufen zu lassen, oder TWINCAT wird als PROFIBUS-*slave* verwendet, der nur als Echtzeitsystem für die Simulation genutzt und über PROFIBUS mit einer anderen Steuerung verbunden wird. Im vorliegenden Fall wurde die erste Alternative gewählt und die Kopplung von TWINCAT mit ISG-VIRTUOS über den internen Bus der verwendeten PC realisiert.

Darüber hinaus wurde die Ebene einer Leitsteuerung in das RBG-Modell integriert. Darin wurde z. B. die Funktion einer Messdatenspeicherung zur Speicherung der erzeugten Simulationsdaten implementiert.

4.2.4.4 Verteilte Simulation und Datenkommunikation Die verteilte⁴⁷³ Ausführung der Simulation in einer ereignisdiskreten Simulationsumgebung (Betriebsleitebene) sowie in einer zeitkontinuierlichen RBG-Simulation erfordert Kommunikationsstrukturen zur Datenübertragung zwischen den einzelnen Teilmodellen.

Als Kommunikationssystem zwischen der Betriebsleitebene (in PLANT SIMULATION) und der Leitsteuerung (in TWINCAT) wird das *ethernet* der Universität Stuttgart ver-

⁴⁶⁸Hierzu können sowohl Ablaufsteuerungen, z. B. SPS, als auch Bewegungssteuerungen, z. B. *cnc*, angebunden werden. Vgl. ISG GMBH (Hrsg.) (2013, S. 1-3). Zum Aufbau und den verwendeten Methoden in ISG-VIRTUOS siehe RÖCK (2007).

⁴⁶⁹Zur Realisierung des echtzeitfähigen Rechenkerns ist ein Echtzeitbetriebssystem notwendig. Da sowohl die Steuerung als auch der Simulator in Echtzeit betrieben werden, müssen sie auf die reale Zeit anhand der Systemuhren synchronisiert werden.

⁴⁷⁰Vgl. RÖCK (2007, S. 117-123). Die Schnittstelle zwischen Nutzer und Rechenkern kann zur Modellierung, zum Monitoring und zur 3D-Visualisierung genutzt werden.

⁴⁷¹TWINCAT 3 lässt sich durch C/C++-Programmierungen erweitern und beispielsweise an die numerische Berechnungssoftware MATLAB und deren Simulationserweiterung SIMULINK anbinden.

⁴⁷²Vgl. ISG GMBH (Hrsg.) (2013, S. 8).

⁴⁷³Ein verteiltes System umfasst physikalisch unabhängige Rechner, die zum Zwecke der Kommunikation miteinander verbunden sind. Verteilte Anwendungen nutzen ein Rechnernetz, um dem Benutzer eine in sich geschlossene Funktionalität zur Verfügung zu stellen. Vgl. EIGNER/ GERHARDT/ GILZ *et al.* (2012, S. 121).

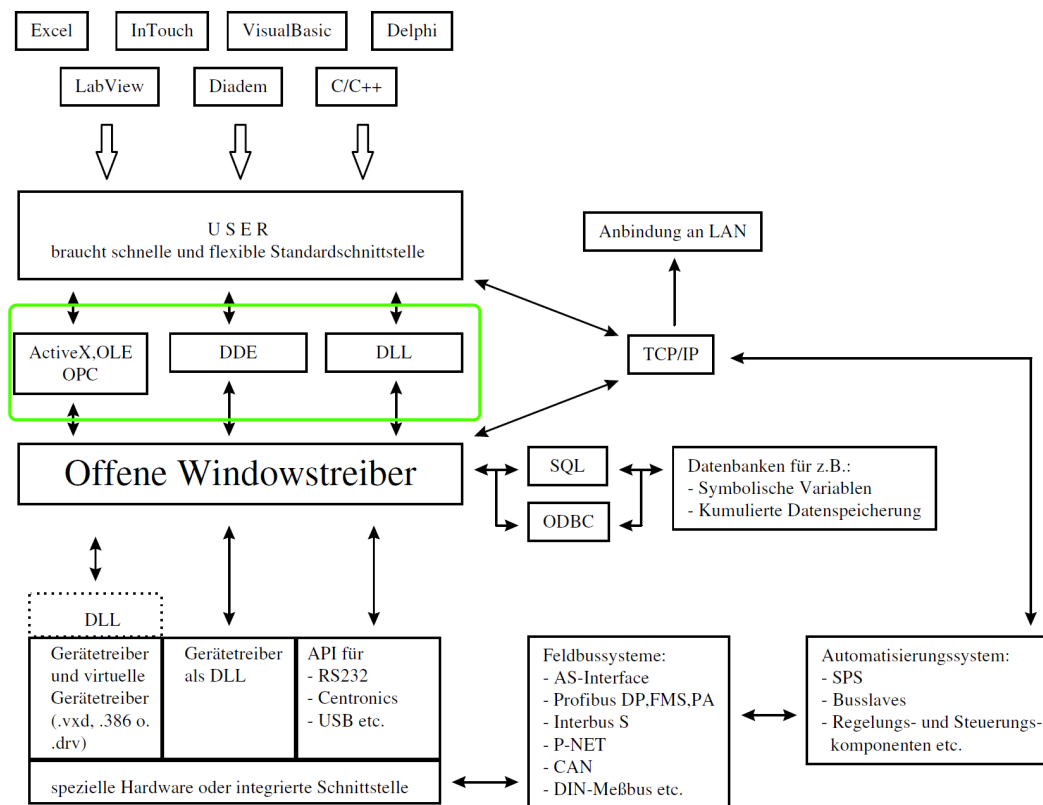


Abbildung 4.6: Kommunikationstopologien unter MICROSOFT WINDOWS nach SCHNELL/WIEDEMANN (Hrsg.) (2006)

wendet.⁴⁷⁴ Für die daraus folgende Datenübertragung zwischen der Betriebsleitebene und der Leitsteuerung müssen *ethernet*-Fähigkeit, die zuverlässige Anbindung an die Simulationsumgebungen sowie eine hinreichende Dokumentation gegeben sein. Zwischen den Teilmodellen sind Bussysteme⁴⁷⁵ zur Datenübertragung installiert. Dabei benötigen alle Feldbussysteme *hosts*, also die Gesamtfunktion steuernde und überwachende Geräte.⁴⁷⁶

Im Projekt GREENRBG wurden MICROSOFT WINDOWS-basierte Simulationssysteme eingesetzt. Da MICROSOFT WINDOWS hardwareabstrakt ist, benötigt es Treiber mit offenen Schnittstellen zum Anwenderzugriff. Wie aus der oberen gepunkteten Markierung in

⁴⁷⁴Weitere Kommunikationssysteme werden in KIEL (2007, S. 68f) charakterisiert.

⁴⁷⁵Ein Bus ist nach PATTERSON/ HENNESSY eine gemeinsam verwendete Kommunikationsverbindung, die einen Leitungsbündel/ Leitungssatz verwendet, um mehrere Komponenten miteinander zu verbinden. Zitiert von EIGNER/ GERHARDT/ GILZ *et al.* (2012, S. 114). Anwendungsbereiche von Bussystemen sind (1) die Verbindung der Komponenten eines Rechners, (2) die Verbindung autonomer Rechner/ Komponenten in Anlagen (z. B. über PROFIBUS) sowie (3) die Verbindung von Rechnern in Fabriken oder Universitäten (z. B. über LAN-Bus oder *ethernet*). Vgl. EIGNER/ GERHARDT/ GILZ *et al.* (2012, S. 114-116).

⁴⁷⁶Die Feldbusan Kopplung an *host*-Systeme kann sowohl auf *hardware*- als auch auf *software*-Ebene erfolgen: (1) SPS-Ankopplung: Speicherprogrammierbare Steuerungen stellen v. a. in der Fertigungstechnik den größten Anteil der Host-Systeme dar. Dabei werden SPS üblicherweise über Kommunikationsbaugruppen an den jeweiligen Feldbus angekopplert. (2) PC-Ankopplung: PC werden im Feldbusbereich für Verarbeitungsfunktionen, z. B. Datenauswertung, -speicherung, und -visualisierung, eingesetzt. Vgl. SCHNELL/ WIEDEMANN (Hrsg.) (2006, S. 85f).

Abbildung 4.6⁴⁷⁷ ersichtlich wird, kommen bei den entstehenden *client-server*-Strukturen verschiedene Mechanismen für den Datenaustausch zwischen einzelnen Prozessen in Frage.⁴⁷⁸ Im Projekt GREENRBG wurde eine OPC-Schnittstelle zur Datenübertragung implementiert.⁴⁷⁹ OLE FOR PROCESS CONTROL (OPC) ist eine fest definierte Schnittstelle, d. h. ein Objektsystem und ein Protokoll für die Zusammenarbeit OLE-fähiger Programme. OPC ist ein *client-server*-System, d. h. es sind sowohl ein OPC-*server* als auch *n* OPC-*clients* zu implementieren. Dabei umfasst ein *server* mehrere Gruppen von Informationseinheiten. In jeder Gruppe befinden sich *items*, welche die tatsächliche Information bereitstellen. Der *client* generiert einen Verweis auf das *server*-Objekt. Das Gruppenobjekt wickelt den Informationsaustausch zwischen der Kommunikationsschnittstelle und den *items* ab. Das *item*-Objekt enthält Informationen über die aktuellen Parameterwerte oder Zeitstempel. Im vorliegenden Fall ist die Variante OPC-DA, d. h. der Datenaustausch über die COM-Schnittstelle, implementiert.⁴⁸⁰ Der OPC-*server* wurde dabei vom ISW implementiert und läuft auf einem PC. Die Leitsteuerung tauscht Daten mit der RBG-Steuerung über Echtzeit-*ethernet* aus.⁴⁸¹

Der OPC-*server* in der Leitsteuerung ermöglicht es dem Anwendungsprogramm PLANT SIMULATION, auf die aufgezeichneten Prozessdaten zuzugreifen. In PLANT SIMULATION wurde dazu ein OPC-*client* vom Autor eingerichtet. Dieses Informationsflusselement wird in Abbildung 4.7 illustriert: Im OPC-*client* (.Modelle.Netzwerk.OPC, siehe oben⁴⁸²) ist hierzu eine Gruppe (\$GROUP_1, siehe unten) angelegt. Abbildung 4.8 zeigt die der Gruppe zugehörigen Elemente (*items*). Für jedes Element werden der Datentyp sowie eine modellinterne Steuerung definiert, die bei einer Werteveränderung des Elements ausgelöst wird. Die Elemente dienen zum einen zur Definition eines Fahrauftrags. Hierzu gehören u. a. Start- und Zielpunkt der Fahrt (x-, y- und z-Koordinate), der Startzeitpunkt sowie die LE-Masse (Element Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.Masse). Zum an-

⁴⁷⁷Bildquelle: SCHNELL/ WIEDEMANN (Hrsg.) (2006, S. 92).

⁴⁷⁸Vgl. PLASSMANN/ SCHULZ (2009, S. 715f) sowie SCHNELL/ WIEDEMANN (Hrsg.) (2006, S. 91-93).

⁴⁷⁹Alternativen hierzu sind die Varianten DLL, DDE und OLE: DYNAMIC LINK LIBRARY (DLL) ist eine frei definierbare Schnittstelle. Eine DLL ist dabei eine Bibliothek von Funktionen, die unter MICROSOFT WINDOWS von verschiedenen Programmen dynamisch eingebunden werden kann. DYNAMIC DATA EXCHANGE (DDE) ist eine fest definierte Schnittstelle, bei der der Informationsaustausch über Nachrichten realisiert wird. Der Zugriff wird über die drei Elemente *service*, *topic* und *item* fixiert. OBJECT LINKING AND EMBEDDING (OLE) ist ebenfalls eine fest definierte Schnittstelle, die auch als ACTIVE X bezeichnet wird. Bei diesem Zugriffsverfahren ist es sowohl möglich, einfache Verbindungen (*linking*) einzurichten, als auch Quellcode einer Anwendung in eine andere einzubinden (*embedding*). Ein Informationsort wird dabei durch den Applikationsnamen und eine zugehörige Objektklasse spezifiziert. Beide Parameter werden anschließend in die WINDOWS-Registrierdatenbank eingetragen, auf die der OLE-Prozess zugreift. Innerhalb der Objektklasse stehen unterschiedliche Eigenschaften und Methoden zur Verfügung, auf die die aufrufende Anwendung zugreifen kann.

⁴⁸⁰Die Alternative hierzu ist OPC-UA, d. h. die Kommunikation über ein Protokoll.

⁴⁸¹Vgl. Abbildung 4.4.

⁴⁸²Der eingerichtete Tunnel dient der sicheren Kommunikation über *ethernet*. Als *host*-Name ist der *localhost* eingetragen. Da das OPC-Signal getunnelt ist, wird auf einen lokalen *server* zugegriffen, der vom OPC-Tunnel bereitgestellt wird.

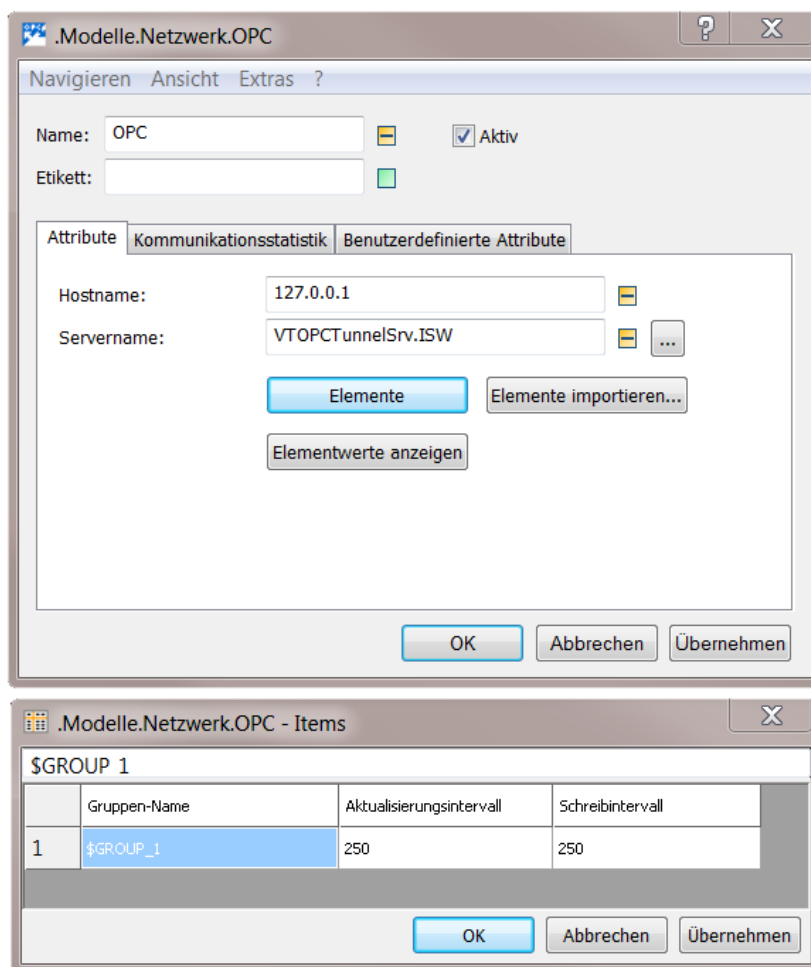


Abbildung 4.7: OPC-client in PLANT SIMULATION (eigene Darstellung)

deren sind programminterne Elemente spezifiziert, wie beispielsweise eine Variable vom Datentyp *boolean* (Element Plc1.FAHRAUFTRAG.b_MFS_AB), die angibt, ob aktuell in den Speicher des OPC-Servers geschrieben werden kann oder ob dieser zuerst ausgelesen werden muss.

4.2.4.5 Ergebnisverwaltung und Datenaufbereitung In der LP-Verwaltung der Betriebsleitebene werden die Werte der Variablen aller eingehenden LE und die ihnen zugeordneten LP aufgezeichnet. Die generierten Daten der RBG-Bewegung werden in der Messdatenverwaltung in der Leitsteuerung gespeichert. Hierzu zählen die Positionen des RBG in x-Richtung, des Hubwagens in y-Richtung und des LAM in z-Richtung, die aktuell bewegte LE-Masse sowie die Leistungsaufnahme jedes RBG mit einer Abtastrate von 1 kHz, d. h. Aufzeichnungen alle 1 ms. Aufgrund der so in kurzer Zeit erzeugten hohen Datenmengen werden die Messschriebe auf dem Rechner der Leitsteuerung gesammelt

	Item-Name	Typ	Alias	Wert-geändert-Steuerung
1	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.ID	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.ID	.Modelle.Netzwerk.Variable1
2	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.Masse	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.Masse	.Modelle.Netzwerk.Variable2
3	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.Pos_A	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.Pos_A	.Modelle.Netzwerk.Variable3
4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.Pos_B	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.Pos_B	.Modelle.Netzwerk.Variable4
5	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.Pos_Vor	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.Pos_Vor	.Modelle.Netzwerk.Variable5
6	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_A_Jahr	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_A_Jahr	.Modelle.Netzwerk.Variable6
7	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_A_Minute	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_A_Minute	.Modelle.Netzwerk.Variable7
8	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_A_Monat	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_A_Monat	.Modelle.Netzwerk.Variable8
9	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_A_Sekunde	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_A_Sekunde	.Modelle.Netzwerk.Variable9
10	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_A_Stunde	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_A_Stunde	.Modelle.Netzwerk.Variable10
11	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_A_Tag	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_A_Tag	.Modelle.Netzwerk.Variable11
12	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_B_Jahr	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_B_Jahr	.Modelle.Netzwerk.Variable12
13	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_B_Minute	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_B_Minute	.Modelle.Netzwerk.Variable13
14	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_B_Monat	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_B_Monat	.Modelle.Netzwerk.Variable14
15	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_B_Sekunde	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_B_Sekunde	.Modelle.Netzwerk.Variable15
16	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_B_Stunde	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_B_Stunde	.Modelle.Netzwerk.Variable16
17	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_B_Tag	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_B_Tag	.Modelle.Netzwerk.Variable17
18	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_Vor_Jahr	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_Vor_Jahr	.Modelle.Netzwerk.Variable18
19	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_Vor_Minute	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_Vor_Minute	.Modelle.Netzwerk.Variable19
20	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_Vor_Monat	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_Vor_Monat	.Modelle.Netzwerk.Variable110
21	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_Vor_Sekunde	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_Vor_Sekunde	.Modelle.Netzwerk.Variable111
22	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_Vor_Stunde	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_Vor_Stunde	.Modelle.Netzwerk.Variable112
23	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_Vor_Tag	Int4	Plc1.FAHRAUFTRAG.Auftrag_MFS_Eingabe.T_Vor_Tag	.Modelle.Netzwerk.Variable113
24	Plc1.FAHRAUFTRAG.b_MFS_AB	Boolear	Plc1.FAHRAUFTRAG.b_MFS_AB	.Modelle.Netzwerk.Variable113:
25	Plc1.FAHRAUFTRAG.Trig_MFS	Boolear	Plc1.FAHRAUFTRAG.Trig_MFS	.Modelle.Netzwerk.Variable113:

Abbildung 4.8: OPC-Gruppe und Elemente (eigene Darstellung)

und in regelmäßigen Abständen in das Format `.csv`⁴⁸³ exportiert. Anschließend wird ein vom Autor erstellter Auswertungsalgorithmus⁴⁸⁴ genutzt, um die Messdaten im *batch*-Betrieb auszuwerten. Durch Verknüpfung des Zeitfensters, der Start- und Zielkoordinaten sowie der LE-Masse jedes Fahrauftrags mit den aufgezeichneten RBG-Daten kann eine Zuordnung der Messdaten zu den ausgelösten Fahraufträgen erfolgen. Das Skript wertet die Positionen in x-, y- und z-Richtung sowie die LE-Masse in allen Zeitschritten der Aufzeichnung aus und integriert die jeweilige Leistungsaufnahme numerisch zum Energiebedarf eines Auftrags. Ergebnis der Auswertung sind die Fahrzeit und der Energiebedarf jedes Auftrags.

Beim Erreichen einer definierten Stichprobengröße⁴⁸⁵ erfolgt die Auswertung der abgearbeiteten Aufträge. Hierbei werden die Fahrzeiten und Energiebedarfe der Aufträge jeweils aufsummiert und durch die Anzahl an durchgeführten Aufträgen dividiert, um die mittlere Fahrzeit und den mittleren Energiebedarf je Auftrag zu erhalten. Zudem werden die Anzahl an Einlagerungen sowie die durchschnittliche LE-Masse je LP ermittelt und in einer Matrix dargestellt. Dadurch kann die Masseverteilung an der Regalwand je Strategie bewertet werden.⁴⁸⁶

4.3 Durchführung der Simulationsexperimente

Die Effizienz und die Zuverlässigkeit der Auswertung von Simulationsexperimenten hängen nach VDI 3633-3 maßgeblich von der Vorbereitung der Experimente ab. Daher ist es das Ziel der Experimentplanung, die große Anzahl möglicher Simulationsläufe in Bezug auf die konkrete Zielsetzung auf das notwendige und sinnvolle Maß zu reduzieren, ohne die Anforderungen an die Datenqualität und -quantität zu verletzen.⁴⁸⁷

Die durchgeführten Experimente dienen der Ermittlung der Energieeffizienz und des Umschlags etablierter und neu entwickelter Lagerstrategien für aHRL. Als Messgrößen zur Beurteilung der Energieeffizienz und des Umschlags bei Anwendung definierter Lagerstrategien werden die mittlere Fahrzeit⁴⁸⁸ und der mittlere Energiebedarf zur Durchführung von Ein- und Auslagerungsfahrten herangezogen. Die bewerteten Fahrzeiten und Energiebedarfe gelten dabei für die Fahrt vom EP zum LP und für die Auslagerungsfahrt vom LP zum AP. Dabei werden die Zwischenfahrten (Leerfahrten) jedoch weder zeitlich

⁴⁸³Hierbei handelt es sich um *comma separated values* (csv), die von gängigen Programmen zur Datenanalyse und -aufbereitung (z. B. MATLAB, MICROSOFT EXCEL) importiert werden können.

⁴⁸⁴Zunächst wurde der Auswertungsalgorithmus in MATLAB programmiert. Der ineffiziente Umgang von MATLAB mit verfügbarem Arbeitsspeicher führt jedoch zu sehr langen Einlese- und Auswertungszeiten der Messschriebe. Daher wurde das Programm in PYTHON übersetzt, so dass die Auswertungen wesentlich schneller durchgeführt werden konnten.

⁴⁸⁵Vgl. Abschnitt 4.3.

⁴⁸⁶Vgl. Tabelle 4.3.

⁴⁸⁷Vgl. VDI 3633-3 (1997, S. 2).

⁴⁸⁸Auf die Bedeutung der mittleren Fahrzeit zur Bewertung von Lagerstrategien weist z. B. SCHUMANN (2008, S. 77 und 80) hin.

Massespannweite	Lagerfüllgrad		
	niedrig (78 %)	mittel (84 %)	hoch (90 %)
niedrig (300 kg)	Szenario #1	Szenario #2	Szenario #3
mittel (700 kg)	Szenario #4	Szenario #5	Szenario #6
hoch (1.100 kg)	Szenario #7	Szenario #8 (Basisszenario)	Szenario #9

Tabelle 4.4: Untersuchte Szenarien

noch energetisch bewertet, da diese nicht von der Strategie zur LP-Zuordnung, sondern von der Strategie zur Reihenfolge- und zur Spielbildung bestimmt werden.⁴⁸⁹ Es werden also die Lastfahrten zur Bewertung herangezogen. Die durch Einsatz der neu entwickelten Lagerstrategien erzielten absoluten Einsparungen gelten somit gleichermaßen für die Durchführung von Einzel- und Doppelspielen. Analog zu bisherigen Studien werden die Zeiten und Energiebedarfe zur LE-Aufnahme und -abgabe nicht betrachtet, da sie unabhängig vom gewählten LP sind und sich somit nicht durch Strategien zur LP-Zuordnung beeinflussen lassen.⁴⁹⁰

Zur Variation von Eingangsparametern bieten sich die *one factor at a time*-Methode sowie die statistische Versuchsplanung (*design of experiments*) an. Bei der erstgenannten Methode wird in jedem neuen Simulationslauf nur ein Parameter im Vergleich zum letzten Simulationslauf verändert. Gerade bei einer Vielzahl variabler Eingangsgrößen steigt die Menge der benötigten Simulationsläufe stark an: Können beispielsweise drei Eingangsparameter jeweils vier Ausprägungen annehmen, so sind bereits $4^3 = 64$ Simulationsläufe zur Untersuchung aller möglichen Wertekombinationen notwendig. Durch die Verwendung der statistischen Versuchsplanung soll die Anzahl benötigter Versuchsläufe reduziert werden, indem zwischen zwei Simulationsläufen mehrere Eingangsparameter in ihren Ausprägungen gleichzeitig und systematisch variiert werden, um ihren Einfluss auf die Ausgangsparameter des Systems zu bestimmen. Somit können sowohl die für das Modellverhalten relevantesten Eingangsparameter bestimmt werden als auch deren Einfluss quantifiziert werden.⁴⁹¹ Im vorliegenden Fall wird lediglich eine Funktionalanalyse bekannter Lagerstrategien durchgeführt. Daher wird auf eine statistische Versuchsplanung verzichtet.

Das modellierte aHRL ist durch seine dem Realsystem entsprechenden Parameter⁴⁹² charakterisiert. Die Massen und Verweildauern der eingehenden LE werden anhand spe-

⁴⁸⁹ERTL/ GÜNTNER/ FISCHER *et al.* (2012, S. 67) ermitteln bei Durchführung eines Doppelspiels in einem Labor-AKL, bei dem die RBG mit einer Energierückspeisung ausgerüstet sind, gemäß dem Testspiel aus VDI 3561 einen Energieanteil von 21 % für die Zwischenfahrt. Dabei ist eine zufallsbasierte LP-Zuordnung (Strategie RND1) reflektiert.

⁴⁹⁰Vgl. BOZER/ WHITE (1984, S. 331), HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 630), HU/ HUANG/ CHEN *et al.* (2005, S. 1519), MENEGHETTI/ MONTI (2011a, S. 2) sowie VASILI/ TANG/ VASILI (2012, S. 170).

⁴⁹¹Vgl. KLEPPMANN (2006, S. 1-9) sowie MONTGOMERY (1996).

⁴⁹²Vgl. Tabelle 4.1.

zifischer Verteilungsfunktionen bestimmt.⁴⁹³ Um Aussagen über die Vorteilhaftigkeit der entwickelten Strategien in unterschiedlichen Betriebssituationen treffen zu können, werden die in Tabelle 4.4 aufgeführten Szenarien untersucht:

- PETERMANN ermittelt in einer empirischen Untersuchung einen durchschnittlichen LFG in Handels- und Fertigwarenlagern in Deutschland von 86 %, wobei die befragten Unternehmen einen LFG von 84 % als optimal erachten.⁴⁹⁴ Der LFG wird daher in drei Stufen abgebildet und beträgt in der Stufe „niedrig“ 78 %, in der Stufe „mittel“ 84 % und in der Stufe „hoch“ 90 %.⁴⁹⁵ Damit orientieren sich die Untersuchungen zwecks Vergleichbarkeit an bisherigen Veröffentlichungen zu Lagerstrategien: So verwendet beispielsweise BRANDES in seiner Dissertation einen LFG in Höhe von 80 %, ⁴⁹⁶ während sich die für Lagerstrategien grundlegende Veröffentlichung von SCHWARZ/ GRAVES/ HAUSMAN auf den Fall eines LFG von 90 % fokussiert.⁴⁹⁷
- Die Masseverteilung folgt einer Gleichverteilung zwischen einer Minimal- und einer Maximalmasse.⁴⁹⁸ Dabei bezeichnet die Massespannweite die Differenz zwischen der Maximal- und der Minimalmasse. Im Modell werden drei Stufen der Massespannweite untersucht. In allen drei Fällen beträgt die mittlere LE-Masse 650 kg. In der Stufe „niedrig“ liegt der Wert der Minimalmasse bei 500 kg und der Wert der Maximalmasse bei 800 kg, so dass sich eine Massespannweite von lediglich 300 kg ergibt. In der Stufe „mittel“ begrenzen die Werte 300 kg und 1.000 kg die Massespannweite von 700 kg. In der Stufe „hoch“ liegt die Minimalmasse bei 100 kg, während die Maximalmasse 1.200 kg beträgt. Die Massespannweite beträgt somit in dieser Stufe 1.100 kg. Die drei Stufen sollen bei der Beantwortung der Frage helfen, welche Effekte der später entwickelten Strategien zur Masseverteilung⁴⁹⁹ in verschiedenen Sortimenten zu erwarten sind.

Das Szenario #8 wird als Basisszenario für die Untersuchungen definiert, während die Szenarien #1-7 und #9 nur fallspezifisch dargestellt werden. Die Nachfrageverteilung wird anhand einer Beta-Verteilung⁵⁰⁰ charakterisiert. Um die Anzahl der untersuchten Szenarien zu reduzieren, beschränken sich die Untersuchungen auf eine einzelne Nachfrageverteilung und fokussieren sich stattdessen auf die beiden Parameter LFG und Massespannweite.

⁴⁹³Vgl. Abschnitt 4.2.3.2.

⁴⁹⁴Vgl. PETERMANN (1995, S. 39). PETERMANN bezeichnet dabei einen LFG von 95 % als Überlastung, der beispielsweise mit einem Anbau oder einem Neubau begegnet werden sollte.

⁴⁹⁵Der LFG bleibt konstant, indem nach jeder Einlagerung die nächste fällige Auslagerung durchgeführt wird.

⁴⁹⁶Vgl. BRANDES (1997, S. 180).

⁴⁹⁷Vgl. SCHWARZ/ GRAVES/HAUSMAN (1978, S. 264). SCHUMANN (2008, S. 98) untersucht in seiner Dissertation LFG von 70-95 %.

⁴⁹⁸Als Schrittweite ist im Modell der Wert von 50 kg hinterlegt, so dass LE mit Massen von 100 kg, 150 kg, 200 kg, 250 kg, ... 1.200 kg erzeugt werden.

⁴⁹⁹Vgl. Abschnitt 5.3.

⁵⁰⁰Zur Begründung siehe Abschnitt 4.2.3.2 und insbesondere Fußnote 429.

Die in den in Kapitel 5 neu entwickelten Strategien versuchen explizit, durch Ausnutzung dieser beiden Größen den mittleren Energiebedarf von Ein- und Auslagerungen zu reduzieren.⁵⁰¹ Wie GUDEHUS bemerkt, ist die häufig postulierte Nachfrageverteilung von 20/ 80, d. h. 80 % der Lagerzugriffe erfolgen auf 20 % der Artikel, meist unzutreffend.⁵⁰² Für die Untersuchungen wird daher eine etwas weniger schiefe Nachfrageverteilung von 20/ 75 herangezogen, d. h. 75 % der Lagerzugriffe erfolgen auf 20 % der Artikel.⁵⁰³ Die entsprechenden Parameter der Beta-Verteilung sind $\alpha_1 = 1,25$ und $\alpha_2 = 2,00$.⁵⁰⁴ Nach Auswertung von Test-Simulationsläufen wurde die Einschwingphase je Strategie auf je 5.000 Ein- und Auslagerungen festgelegt.⁵⁰⁵ Für jede Strategie wird eine Stichprobe in Höhe von je 12.500 Ein- und Auslagerungen simuliert. Um für unterschiedliche Strategien vergleichbare Resultate zu erzielen, wird stets die gleiche Auftragsliste abgearbeitet.⁵⁰⁶

4.4 Auswertung der Simulationsexperimente

Strategie	Fahrzeit	Energiebedarf	Abweichung gegenüber RND1	
			Fahrzeit	Energiebedarf
Ein-Zonen zufallsbasiert (RND1)	63,8 s	143,8 Wh	0 %	0 %
Ein-Zonen <i>closest open location</i> (COL1)	57,0 s	126,9 Wh	-10,7 %	-11,8 %
Zwei-Zonen <i>closest open location</i> (COL2)	49,7 s	109,1 Wh	-22,1 %	-24,1 %
Energetische ABC-Zonierung (ENM3)	50,9 s	109,3 Wh	-20,2 %	-24,0 %
Dynamische Zonierung (DYN)	48,7 s	106,5 Wh	-23,7 %	-25,9 %

Tabelle 4.5: Fahrzeiten und Energiebedarfe bekannter Strategien im Basisszenario

⁵⁰¹Die Zusammenhänge zwischen der Schiefe der Nachfrageverteilung und den mittleren Spielzeiten waren in der Vergangenheit bereits Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten zu Strategien zur LP-Zuordnung, wie Abschnitt 3.3.5.2.3 zeigt. Dabei führt eine sehr schiefe Nachfrageverteilung zu größeren Einsparungen verweildauerbasierter Strategien gegenüber Strategien wie RND1 oder COL1. Vgl. Abschnitt 3.3.5.2.3.

⁵⁰²Vgl. GUDEHUS (2010, S. 133).

⁵⁰³Die Nachfrageverteilung von 20/ 75 stellt den Mittelwert der von HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976, S. 635) untersuchten Nachfrageverteilungen (20/ 60, 20/ 70, 20/ 80, 20/ 90) dar. BRANDES (1997, S. 177f und 202) verwendet in seiner Dissertation eine Nachfrageverteilung von etwa 20/ 70.

⁵⁰⁴Vgl. Abschnitt 4.2.3.2.

⁵⁰⁵Vgl. Abschnitt 4.2.4.2.3. Bei der Strategie MVI+r/w (vgl. Abschnitt 5.3.8) werden je einbezogene Regalwand 5.000 Ein- und Auslagerungen in der Einschwingphase durchgeführt, so dass sich bei $w = 8$ eine Einschwingphase von insgesamt 40.000 Ein- und Auslagerungen ergibt. Verzichtet man auf die Berücksichtigung einer Einschwingphase, wie beispielsweise BRANDES (1997, S. 202), so kann dies zu Verfälschungen bei der Bewertung von Lagerstrategien führen, da stochastische Effekte der Initialbelegung überbewertet werden.

⁵⁰⁶Dieses Vorgehen wird beispielsweise von GAGLIARDI/ RENAUD/ RUIZ (2012, S. 886) empfohlen. Die Auftragsliste wird lediglich an die jeweils untersuchte Massespannweite angepasst.

Tabelle 4.5 zeigt die erzielten Fahrzeiten und Energiebedarfe beim Einsatz der in Abschnitt 4.2.4.2.4 dargestellten Strategien zur LP-Zuordnung im Basisszenario, d. h. bei einem mittleren LFG (84 %) und einer hohen Massespannweite (1.100 kg).⁵⁰⁷

Die Strategie RND1 führt zur längsten Fahrzeit (63,8 s) und zum höchsten Energiebedarf (143,8 Wh) aller untersuchten Strategien. Die Strategie COL1 führt zu verbesserten Werten für die Fahrzeit (57,0 s) und den Energiebedarf (126,9 Wh), die v. a. aus der Nichtnutzung langsamer LP resultieren.⁵⁰⁸ Die Einsparungen umfassen 10,7 % der Fahrzeit sowie 11,8 % des Energiebedarfs im Vergleich zur Strategie RND1. Die Simulationen bestätigen, dass eine signifikante Reduktion der Fahrzeit durch Anwendung einer verweildauerbasierten LP-Zuordnung in Form der Strategie DYN erzielt werden kann: Die Fahrzeit von 48,7 s entspricht einer Verringerung um 23,7 % im Vergleich zur Strategie RND1. Der Energiebedarf bei Anwendung der Strategie DYN beträgt 106,5 Wh, was 25,9 % unterhalb des Energiebedarfs bei Anwendung der Strategie RND1 liegt. Bei Anwendung einer abgeschwächten Form der verweildauerbasierten LP-Zuordnung, der Strategie COL2, können etwas geringere Einsparungen in Fahrzeit und Energiebedarf erzielt werden: Mit einer Fahrzeit von 49,7 s betragen die Einsparungen 22,1 % im Vergleich zur Strategie RND1 und liegen nur um 1,0 s bzw. 2,1 % über dem Wert der Strategie DYN. Der Energiebedarf der Strategie COL2 beträgt 109,1 Wh, was 23,7 % unter dem Wert der Strategie RND1 bzw. 2,4 % über dem Wert der Strategie DYN liegt. Die Strategie ENM3 führt zu einer leicht höheren Fahrzeit (50,9 s), aber auch zu einem leicht erhöhtem Energiebedarf (109,3 Wh) als COL2. Sowohl die Fahrzeit als auch der Energiebedarf der Strategie ENM3 übersteigen im Basisszenario die Werte der bekannten Strategie DYN um 4,6 % bzw. um 2,6 %. Die Ergebnisse führen dazu, dass im Basisszenario die Strategie DYN die Referenzstrategie, d. h. die „Messlatte“, für die Bewertung der Vorteilhaftigkeit neu entwickelter Strategien in Kapitel 5 darstellt. Abbildung 4.9 stellt die Zugriffshäufigkeiten auf die LP der Regalwand bei Anwendung der Strategien RND1, COL1, COL2, ENM3 und DYN dar (von oben nach unten). Ein dunkel markierter LP weist dabei viele Einlagerungen auf, während LP mit wenigen Einlagerungen sehr hell markiert sind. Während bei der Strategie RND1 kein Muster in den LP-Zuordnungen erkennbar ist, führt COL1 dazu, dass beim vorliegenden LFG der langsamste Teil der LP der Regalwand nicht für Einlagerungen verwendet wird (weiße LP). Bei den Strategien COL2 und ENM3, d. h. bei Strategien mit mehreren statischen Zonen, sind klare Unterschiede zwischen den stark frequentierten LP der (zeitlichen bzw. energetischen) Schnellläuferzone und den weniger stark frequentierten LP der restlichen Regalwand erkennbar. Die Strategie DYN (unterster Teil der Abbildung) führt dazu, dass auf die LP nahe dem ÜP am häufigsten zugegriffen wird. Mit steigender Fahrzeit zum ÜP erfahren die LP immer geringere Zugriffe, weswe-

⁵⁰⁷Vgl. Tabelle 4.4.

⁵⁰⁸Die Werte für COL1 spiegeln im Basisszenario im Wesentlichen die Fahrzeit und den mittleren Energiebedarf zur Ein- und Auslagerung in den 84 % schnellsten LP wieder.

gen langsame LP hell markiert sind.⁵⁰⁹ Abbildung 4.10 illustriert die Fahrzeiten (x-Achse) und die Energiebedarfe (y-Achse) für die untersuchten Lagerstrategien im Basisszenario.

Da keine der Strategien explizite Vorteile aus der Massespannweite zu ziehen versucht, ergeben sich keine signifikanten Abweichungen zwischen den Energiebedarfen bei geringer, mittlerer oder hoher Massespannweite, d. h. in den Szenarien #2, 5 und 8.⁵¹⁰

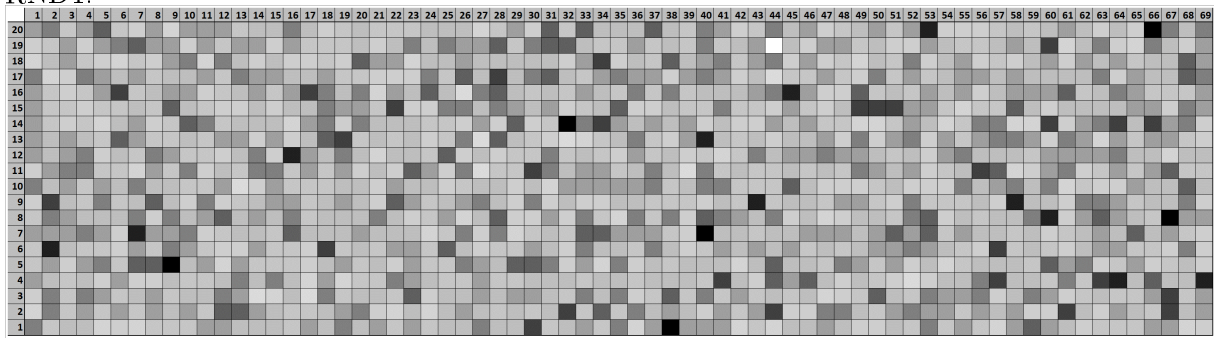
Einzig der LFG besitzt einen Einfluss auf die Fahrzeiten und die Energiebedarfe der Strategien COL1, COL2 und ENM3: So sorgt ein hoher LFG (Szenario #9) im Vergleich zum mittleren LFG (Basisszenario) für steigende Fahrzeiten und steigende Energiebedarfe. Der Grund hierfür ist, dass alle drei Strategien innerhalb der Zone(n) von der Nichtnutzung langsamer bzw. energiebedürftiger LP profitieren. Bei hohem LFG kann jedoch nur ein geringer Anteil langsamer LP ungenutzt bleiben, wodurch der Vorsprung der Strategien gegenüber der Strategie RND1 hinsichtlich Fahrzeit (COL1: 58,8 s; COL2: 50,9 s; ENM3: 51,9 s) und Energiebedarf (COL1: 131,6 Wh; COL2: 112,7 Wh; ENM3: 111,6 Wh) abnimmt. Die Strategie DYN zeigt sich weniger abhängig vom LFG und führt auch bei einem hohen LFG zur geringsten Fahrzeit (48,7 s) und zum geringsten Energiebedarf (106,7 Wh). Bei niedrigem LFG zeigen sich bei den Strategien COL1, COL2 und ENM3 sinkende Fahrzeiten (COL1: 54,5 s; COL2: 48,1 s; ENM3: 50,1 s) und Energiebedarfe (COL1: 121,1 Wh; COL2: 105,2 Wh; ENM3: 107,1 Wh) gegenüber den entsprechenden Werten bei mittlerem LFG. Bei geringem LFG fallen die Fahrzeit und der Energiebedarf der Strategie DYN etwas schlechter aus als bei Anwendung der Strategie COL2.

Festzuhalten ist, dass die verweildauerbasierte LP-Zuordnung in der Variante von GLASS (DYN) sowohl die geringsten Fahrzeiten als auch die geringsten Energiebedarfe bei mittlerem und hohem LFG aufweist (siehe unterster linker Punkt in Abbildung 4.10). Daher wird diese Strategie bei mittlerem und hohem LFG die Referenz sein, an der sich die in Kapitel 5 zu entwickelnden Lagerstrategien, die unter Beibehaltung einer geringen Fahrzeit die Senkung des Energiebedarfs als explizite Zielstellung verfolgen, messen müssen. Da sich bei niedrigem LFG die geringste Fahrzeit und der geringste Energiebedarf für die Strategie COL2 ergeben haben, wird bei niedrigem LFG COL2 als Referenzstrategie gewählt.

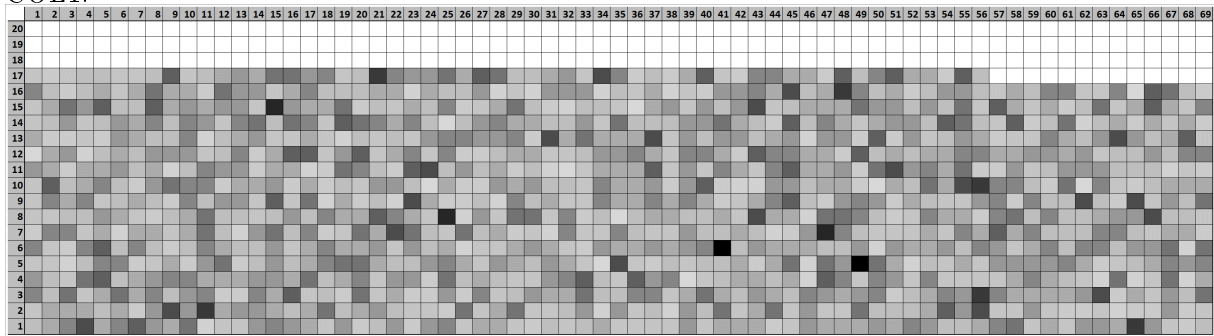
⁵⁰⁹Der dunkel markierte LP in der obersten Zeile und der hintersten Spalte der Regalwand spiegelt eine Besonderheit der Strategie DYN wieder: So wird eine LE, deren Verweildauer höher ist als bei allen bisher eingelagerten LE, mit einem Verweildauerquantil von 1 versehen. Dies führt zu einer Einlagerung im letzten Eintrag der nach Fahrzeit aufsteigend sortierten Liste der LP. Da in der Liste primär explizit nach aufsteigender Fahrzeit, aber auch sekundär implizit nach aufsteigender Zeile und tertiär implizit nach aufsteigender Spalte sortiert wird, erfolgen in den hintersten LP der obersten Zeile, relativ zu den LP in seiner Umgebung, viele Einlagerungen.

⁵¹⁰Vgl. Tabelle 4.4.

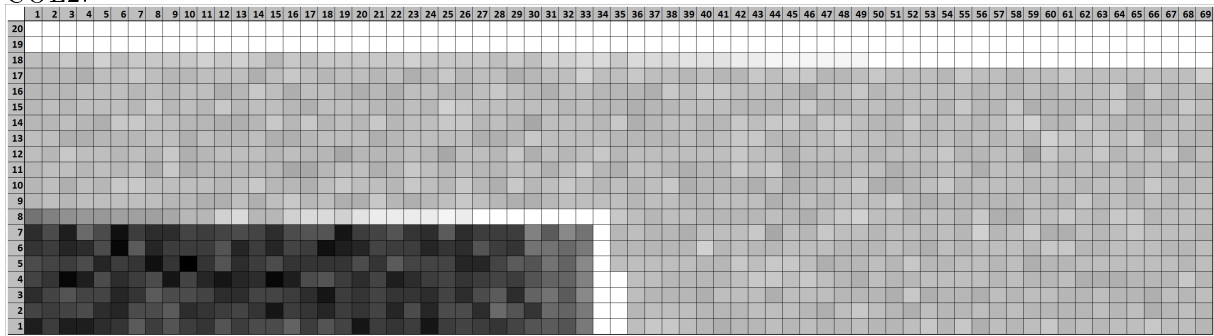
RND1:



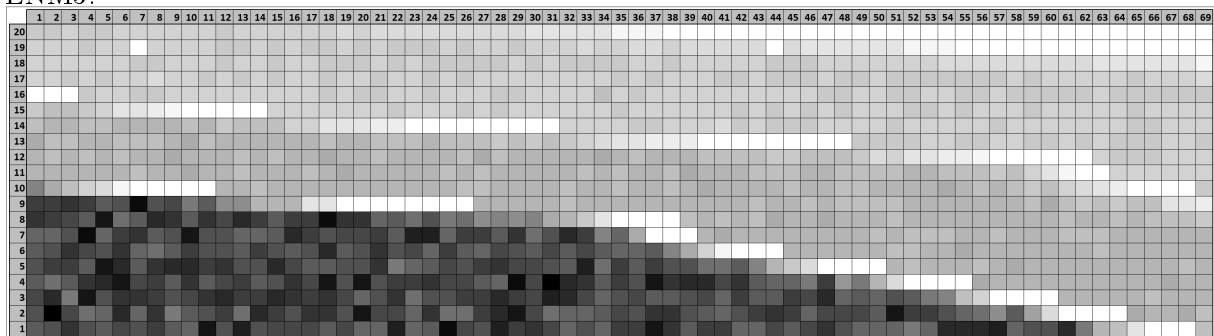
COL1:



COL2:



ENM3:



DYN:

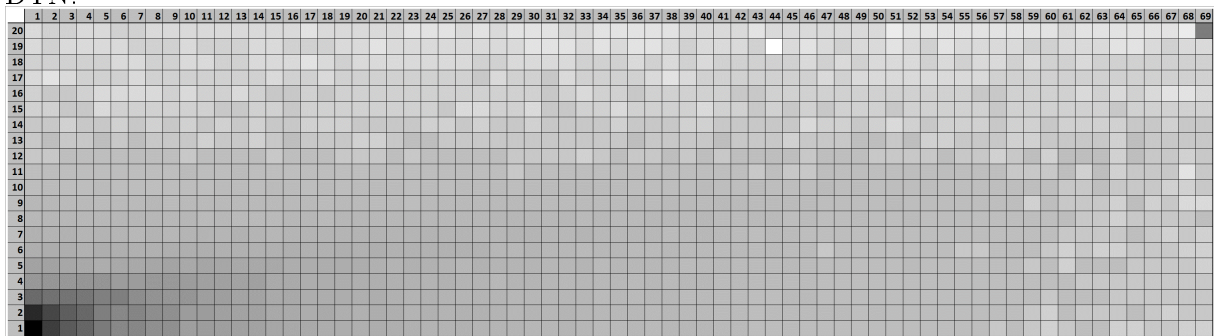


Abbildung 4.9: Zugriffshäufigkeiten bei bekannten Strategien (eigene Darstellung)

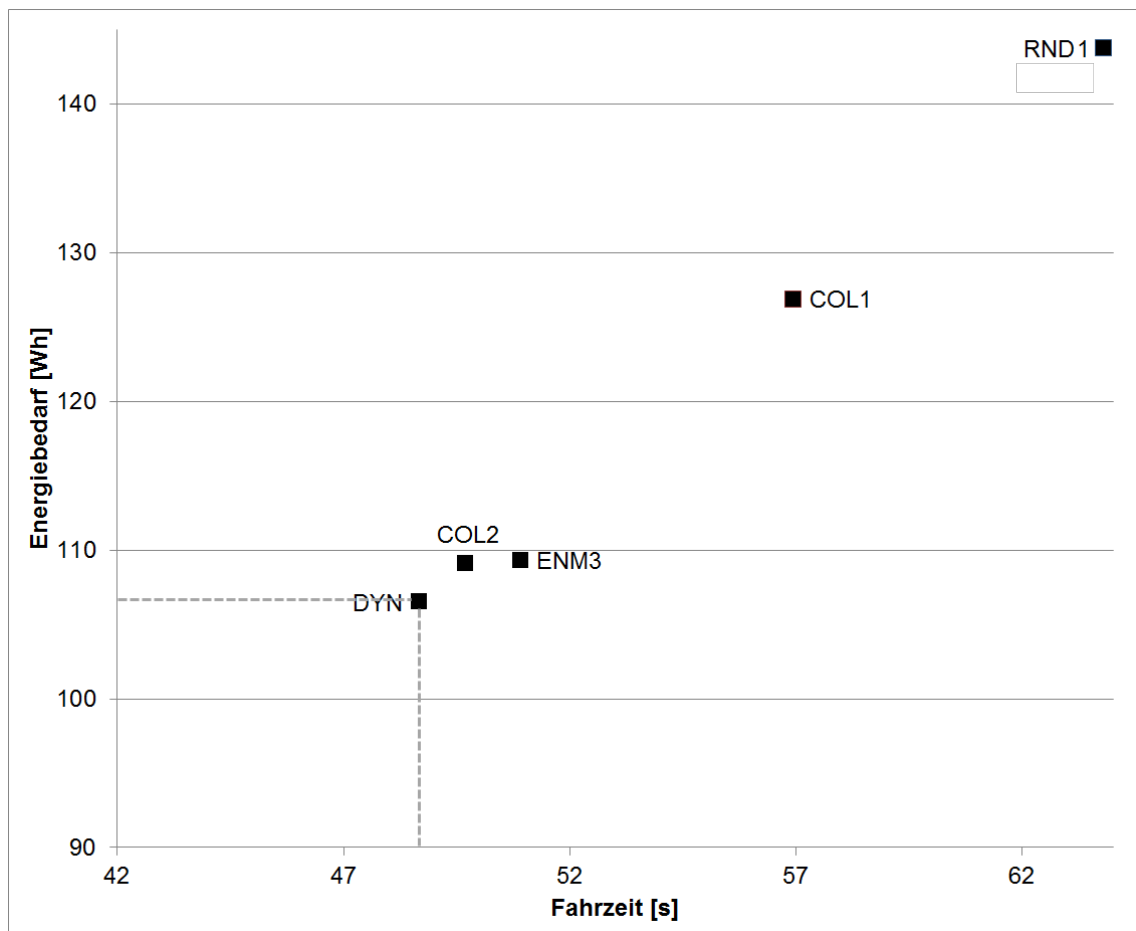


Abbildung 4.10: Fahrzeiten und Energiebedarfe bekannter Strategien im Basisszenario (eigene Darstellung)

5 Entwicklung energieeffizienter Lagerstrategien

5.1 Grundüberlegungen

Bei RBG lassen sich die Vollastbeharrungsleistungen von Fahr- und Hubwerk wie folgt bestimmen: Die Vollastbeharrungsleistung des Fahrwerks⁵¹¹ $P_{V,F}$ folgt dem in Formel 5.1 dargestellten Zusammenhang und dient zur Überwindung der Roll- und Lagerreibung. Dabei beschreiben F_W den Fahrwiderstand, v_x die Nenngeschwindigkeit in Fahrtrichtung und $\eta_{Antrieb}$ den Wirkungsgrad des Antriebs. P_V umfasst also die erforderliche Motorleistung, d. h. die Antriebsleistung an der Trommel bzw. am Kettenrad geteilt durch den Gesamtwirkungsgrad des Antriebs.⁵¹²

$$P_{V,F} = \frac{F_W v_x}{\eta_{Antrieb}} \quad (5.1)$$

Der Fahrwiderstand F_W kann gemäß Formel 5.2 ermittelt werden.⁵¹³ Dabei beschreibt R den Laufradradius, d den wirksamen Achsdurchmesser, m_{LE} die Masse der LE, m_{RBG} die Masse des RBG, μ den Lagerreibungswert, der bei Gleitlagerung etwa 0,08 und bei Wälzlagerung etwa 0,002 beträgt, f den Hebelarm der Rollreibung, der 0,0005 m für Stahlräder auf Schienen beträgt, sowie ν den Faktor für die Spurkranzreibung, der zwischen 1,1 und 2,0 liegt.⁵¹⁴

$$F_W = \frac{\nu(m_{LE} + m_{RBG})g}{R} \left(\frac{\mu d}{2} + f \right) \quad (5.2)$$

Die Beschleunigungsleistung des Fahrwerks $P_{B,F}$ kann gemäß Formel 5.3 ermittelt werden.⁵¹⁵ Dabei beschreiben m_F die Fahrlast, d. h. die Summe aus LE-Masse m_{LE} und RBG-Masse m_{RBG} , $a_x(t)$ die aktuelle Fahrbeschleunigung, $v_x(t)$ die aktuelle Fahrgeschwindigkeit und $\eta_{Antrieb}$ den Antriebwirkungsgrad. Die Drehmassenbeschleunigung (zweiter Summand) besteht aus dem auf die Motorwelle bezogenen, aktuellen Beschleunigungsmoment $M_B(t)$, der aktuellen Winkelgeschwindigkeit $\omega_{Mot}(t)$ und dem Antriebwirkungsgrad $\eta_{Antrieb}$ und wird meist durch einen Aufschlag von 10-20 % approximativ berücksichtigt.⁵¹⁶

⁵¹¹Das Fahrwerk ist aus direkt angetriebenen Laufrädern, dem Getriebe, dem Antriebsmotor und der Bremse aufgebaut. Die Seitenkräfte werden durch Stütz- und Führungsrollen, die beiderseits der Laufschiene angebracht sind, aufgenommen. Die Laufräder bestehen v. a. aus Stahlguss oder aus Kugelgrafit (GGG). Fehlen Spurkränze, so müssen zur Aufnahme der Seitenkräfte Stütz- und Führungsrollen installiert sein. Vgl. TORKE/ ZEBISCH (1997, S. 151f).

⁵¹²Vgl. TORKE/ ZEBISCH (1997, S. 149).

⁵¹³Vgl. TORKE/ ZEBISCH (1997, S. 149).

⁵¹⁴Vgl. RÖMISCH (2012, S. 30f) sowie TORKE/ ZEBISCH (1997, S. 149). Je nach Fahrbahnmaterial, -oberfläche und Radmaterial liegen die Reibzahlen für die Rad-Schiene-Kombination (Stahl auf Stahl) bei 0,1-0,35. Vgl. MARTIN (2009, S. 112).

⁵¹⁵Vgl. TORKE/ ZEBISCH (1997, S. 149).

⁵¹⁶Vgl. TORKE/ ZEBISCH (1997, S. 149).

$$P_{B,F} = \frac{m_F a_x(t) v_x(t)}{\eta_{Antrieb}} + \frac{M_B(t) \omega_{Mot}(t)}{\eta_{Antrieb}} \quad (5.3)$$

Die Beschleunigungsleistung des Fahrwerks ist dabei nicht konstant, sondern steigt mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit $v_x(t)$ an und erreicht ihren Maximalwert am Ende der Beschleunigungsphase. Die Summe aus Beschleunigungs- und Vollastbeharrungsleistung ergibt die Anlaufleistung des Fahrwerks $P_{Anlauf,F}$ (siehe Formel 5.4):⁵¹⁷

$$P_{Anlauf,F} = P_{V,F} + P_{B,F} \quad (5.4)$$

Die Vollastbeharrungsleistung des Hubwerks $P_{V,H}$ lässt sich gemäß Formel 5.5 ermitteln.⁵¹⁸ Dabei bezeichnet F_H die Hubkraft, v_y die Nenngeschwindigkeit in Hubrichtung der Last, $\eta_{Antrieb}$ den Antriebwirkungsgrad, m_{LE} die LE-Masse, m_{Hub} die Masse des Hubwagens, η_{RZ} den Rollenzugwirkungsgrad, η_{TR} den Trommelwirkungsgrad⁵¹⁹ und η_{Getr} den Getriebewirkungsgrad⁵²⁰.

$$P_{V,H} = \frac{F_H v_y}{\eta_{Antrieb}} = \frac{(m_{LE} + m_{Hub}) g v_y}{\eta_{RZ} \eta_{Tr} \eta_{Getr}} \quad (5.5)$$

Die Beschleunigungsleistung des Hubwerks $P_{B,H}$ setzt sich gemäß Formel 5.6 aus einer Translations- und einer Rotationsbeschleunigung zusammen.⁵²¹ Dabei beschreibt m_H die Hubmasse, $a_y(t)$ die aktuelle Beschleunigung in Hubrichtung, $v_y(t)$ die aktuelle Hubgeschwindigkeit, $M_B(t)$ das aktuelle Beschleunigungsmoment bezogen auf die Motorwelle und $n_{MOT}(t)$ die aktuelle Motordrehzahl.

$$P_{B,H} = \frac{m_H a_y(t) v_y(t)}{\eta_{Antrieb}} + \frac{M_B(t) \omega_{Mot}(t)}{\eta_{Antrieb}} = \frac{(m_{LE} + m_{Hub}) a_y(t) v_y(t)}{\eta_{Antrieb}} + \frac{M_B(t) 2\pi n_{Mot}(t)}{\eta_{Antrieb}} \quad (5.6)$$

Die Beschleunigungsleistung des Hubwerks ist dabei, wie auch die oben genannte Beschleunigungsleistung des Fahrwerks, nicht konstant, sondern steigt mit zunehmender Hubgeschwindigkeit $v_y(t)$ an und erreicht ihren Maximalwert ebenfalls am Ende der Beschleunigungsphase. Die Anlaufleistung des Hubwerks $P_{Anlauf,H}$ ergibt sich wiederum aus der Summe der Vollastbeharrungs- und der Beschleunigungsleistung gemäß Formel 5.7:

$$P_{Anlauf,H} = P_{V,H} + P_{B,H} \quad (5.7)$$

⁵¹⁷Vgl. TORKE/ ZEBISCH (1997, S. 150). Bei Anlagen im Freien ist zudem noch die Windleistung zu beachten.

⁵¹⁸Vgl. TORKE/ ZEBISCH (1997, S. 85f).

⁵¹⁹Der Trommelwirkungsgrad wird mit 0,96 bei Seilrollen mit Gleitlagern, 0,98 bei Wälzlagern, 0,96 bei Seiltrommeln mit Gleitlagern und 0,98 bei Seiltrommeln mit Wälzlagern angegeben.

⁵²⁰Der Getriebewirkungsgrad wird mit 0,95-0,96 bei Stirn- oder Kegelpaar mit Fettschmierung und 0,96-0,97 mit Ölschmierung angegeben.

⁵²¹Vgl. TORKE/ ZEBISCH (1997, S. 85f).

Der Ermittlung der Beschleunigungsleistung liegt das dynamische Grundgesetz für Translation (siehe Formel 5.8) zu Grunde, nach dem sich die Momentanleistung P gemäß Formel 5.9 ergibt.

$$F = ma \quad (5.8)$$

$$P = Fv = mav \quad (5.9)$$

Integriert man die Momentanleistung über die Zeit, bzw. die Momentankraft über die Wegstrecke s , so ergibt sich die eingebrachte Arbeit W gemäß Formel 5.10:

$$W = \int_t P(t) dt = \int_s F(s) ds \quad (5.10)$$

Unter der Annahme vorbestimmter Nenngeschwindigkeiten v_x und v_y , gleichbleibender Beschleunigungsverläufe von $a_x(t)$ und $a_y(t)$, eines unveränderlichen Wirkungsgradverlaufs des Antriebs $\eta_{Antrieb}$, einer fixen RBG-Masse m_{RBG} , einer fixen LE-Masse m_{LE} sowie vorbestimmter Einflussgrößen auf den Fahrwiderstand (z. B. der wirksame Achsdurchmesser d oder der Lagerreibungswert μ , siehe Formel 5.2)⁵²² reduzieren sich die durch Lagerstrategien beeinflussbaren Größen der Gleichungen 5.1 bis 5.4 sowie 5.5 bis 5.7 auf die Wegstrecke s eines jeden Auftrags. Eine Senkung des Energiebedarfs je Ein- und Auslagerungsfahrt lässt sich somit durch eine Optimierung der Fahr- und Hubwege erreichen. Ziel muss es dabei sein, die auftragsbezogene Wegstrecke in Fahr- und Hubbewegung derart zu beeinflussen, dass der durchschnittliche Energiebedarf des RBG pro Ein- und Auslagerungsfahrt reduziert wird. Ein häufiges Anfahren von LP nahe dem ÜP sorgt also für einen geringeren Energiebedarf der Ein- und Auslagerungen. Dieser Effekt stimmt mit den Überlegungen zur Erzielung geringer Fahrzeiten überein, die im Abschnitt 3.3.5 skizziert wurden. Aus einer zeitlich optimierten LP-Zuordnung ist daher grundsätzlich auch eine Reduzierung des mittleren Energiebedarfs zu erwarten.⁵²³

Für die energieeffiziente Zuordnung von eingehenden LE mit heterogenen Massen zu freien LP können drei Zusammenhänge genutzt werden:

1. Einerseits kann der mittlere Energiebedarf eines jeden LP bei der Ein- und Auslage-

⁵²²Für Maßnahmen zur Verbesserung dieser Größen siehe Abschnitte 3.3.2 bis 3.3.4. Hierzu gehören beispielsweise die Reduktion der RBG-Masse durch den Einsatz von Leichtbaumasten oder die Verringerung der Fahrgeschwindigkeit.

⁵²³Zur Reduktion der mittleren Fahrwege wäre es zudem möglich, durch geringere Sicherheitsabstände, Traversen- und Ständerabmessungen die Abmessungen des Lagerkörpers zu reduzieren. Hiervon sind jedoch nur sehr geringe Einsparungen zu erwarten, denen zudem statische und sicherheitstechnische Probleme entgegenstehen. Eine mehrfachtiefe Lagerung eignet sich hingegen, um Fahrgassen und Fahrwege einzusparen und ggf. geringere mittlere Energiebedarfe zu realisieren. Anforderungen seitens des Sortiments sowie der Kundenaufträge sind für eine mehrfachtiefe Lagerung zwingend einzuhalten und geeignete Lagerstrategien sind einzusetzen. Mehrfachtiefe Lagerungen sind jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

rung als Bewertungskriterium genutzt werden, um für eine eingehende LE einen LP zu bestimmen. In diesem Fall fließt die individuelle Masse einer konkreten LE nicht in die Bestimmung eines passenden LP ein, sondern die LP-Bewertung geschieht auf Basis einer durchschnittlich schweren LE.

2. Andererseits ist zu untersuchen, ob die Heterogenität der Masse der ein- und auszulagernden LE durch eine Lagerstrategie gezielt ausgenutzt werden kann, um den Energiebedarf der Ein- und Auslagerung zu reduzieren. Hierfür ist die Eignung von LP für heterogene LE-Massen, d. h. sowohl für leichte⁵²⁴ als auch für schwere LE, durch eine geeignete Kenngröße zu quantifizieren. Bisherige Strategien zur LP-Zuordnung beachten diesen Zusammenhang nicht, was sich in einer diffusen Masseverteilung innerhalb der Regalwand widerspiegelt.⁵²⁵
3. In beiden Fällen gilt zudem: Bei einem nicht vollständig belegten Lager⁵²⁶, d. h. bei einem LFG < 1 , ist zu prüfen, ob energetisch ungünstige LP unbelegt bleiben können und nur bei einem steigenden LFG benutzt werden können.

Diese Überlegungen sollen in die Entwicklung energieeffizienter Lagerstrategien einfließen. Nachfolgend werden zum einen Lagerstrategien vorgestellt, die die LP-Zuordnung aufgrund des mittleren Energiebedarfs je LP durchführen, um den Energiebedarf von Ein- und Auslagerungen zu reduzieren (Abschnitt 5.2). Hierzu zählen die Strategien:

- Ein-Zonen energieminimal (ENM1) (Abschnitt 5.2.2),
- Energetische dynamische Zonierung (E-DYN) (Abschnitt 5.2.3),
- Energieminimal in der Isochrone (EMI) (Abschnitt 5.2.4) und
- Energieminimal in der Isochrone mit Toleranzfaktor r (EMIr) (Abschnitt 5.2.5).

Zum anderen werden Lagerstrategien vorgestellt, die die LP-Zuordnung aufgrund der Energiespannweite durchführen, um den Energiebedarf von Ein- und Auslagerungen zu reduzieren (Abschnitt 5.3). Die Energiespannweite wird hierfür später als Maß für die Eignung jedes LP für schwere bzw. leichte LE (heterogene Massen) eingeführt. Hierzu zählen die Strategien:

- Masseverteilung in der Regalwand (MVRW) (Abschnitt 5.3.2),
- Masseverteilung in zwei Zonen (MVZ2) (Abschnitt 5.3.3),

⁵²⁴Die Bezeichnung richtet sich nach dem im Anwendungsfall vorliegenden Masseverteilung der LE und kann daher kaum durch allgemeingültige Absolutwerte hinterlegt werden.

⁵²⁵Vgl. Abschnitt 5.3.1.

⁵²⁶So werden Lager zwar für eine maximal benötigte Kapazität dimensioniert, diese muss aber nicht zu jeder Zeit benötigt werden. Vgl. Abschnitt 4.3.

- Masseverteilung in der Isochrone (MVI) (Abschnitt 5.3.4),
- Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem LFG (MVI+) (Abschnitt 5.3.5),
- Masseverteilung in der Isochrone mit Toleranzfaktor r (MVI r) (Abschnitt 5.3.6),
- Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem LFG und Toleranzfaktor r (MVI+ r) (Abschnitt 5.3.7) und
- Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem LFG und Toleranzfaktor r unter Beachtung mehrerer Regalwände (MVI+ r/w) (Abschnitt 5.3.8).

Jede der aufgeführten Strategien wird in einem eigenen Abschnitt in Form eines Algorithmus⁵²⁷ dargestellt und verbal beschrieben. Zu jeder Strategie werden die Simulationsergebnisse aufgeführt, die zur Bewertung der Strategie im Vergleich zu bestehenden⁵²⁸ und neu entwickelten Strategien dienen. Dabei steht jeweils insbesondere der Vergleich mit der Referenzstrategie⁵²⁹ der untersuchten Szenarien im Fokus. Wie die nachfolgenden Ausführungen zeigen werden, führt im untersuchten aHRL⁵³⁰ die Anwendung der Strategie MVI+ r/w (Abschnitt 5.3.8) in allen untersuchten Szenarien⁵³¹ zu den geringsten Energiebedarfen und gleichzeitig zu den geringsten Fahrzeiten.

5.2 Strategien auf Basis des mittleren Energiebedarfs je LP

5.2.1 Grundüberlegungen

Der mittlere Energiebedarf eines LP umfasst im Folgenden den Energiebedarf der Ein- und Auslagerungsfahrt einer LE mit durchschnittlicher Masse.⁵³² Die durchschnittliche Masse $m_{LE,Durchschnitt}$ stellt bei einer Gleichverteilung der LE-Masse⁵³³ das arithmetische Mittel der leichtesten ($m_{LE,min}$) und der schwersten ($m_{LE,max}$) LE der Regalwand dar (siehe Formel 5.11):

$$m_{LE,Durchschnitt} = \frac{(m_{LE,max} + m_{LE,min})}{2} \quad (5.11)$$

Abbildung 5.1 illustriert die Fahrzeit und den mittleren Energiebedarf der Ein- und Auslagerung einer LE in die LP einer Regalwand. In der Abbildung sind die Spalten der Regalwand mit den Ziffern 1-69 und die Zeilen der Regalwand mit den Ziffern 1-20

⁵²⁷Ähnlich den Algorithmen zur Bestimmung des Verweildauer- und des Massequantils in Abschnitt 4.2.3.2.

⁵²⁸Vgl. Abschnitt 4.2.4.2.4.

⁵²⁹Vgl. Abschnitt 4.4.

⁵³⁰Vgl. Abschnitt 4.2.

⁵³¹Vgl. Abschnitt 4.3.

⁵³²Die hierzu notwendigen Energiebedarfe können entweder in Messfahrten oder durch Anwendung von Energiemodellen ermittelt werden.

⁵³³Vgl. Abschnitt 4.2.3.2.

nummeriert. Der ÜP befindet sich dabei in der linken unteren Ecke der Regalwand, was der Zeile 1 und der (nicht dargestellten) Spalte 0 der Regalwand entspricht.

In der oberen Hälfte der Abbildung ist die Fahrzeit vom ÜP zu allen LP der Regalwand abgebildet. Die dunkelgrau eingefärbte Fläche umfasst diejenigen LP, deren Fahrzeit über dem Median der Fahrzeit der Regalwand liegt, d. h. die „langsamere Hälfte“ der Regalwand. Die untere Hälfte der Abbildung zeigt exakt dieselbe Regalwand, jedoch umfasst hier die dunkelgrau hervorgehobene Fläche diejenigen LP, deren Energiebedarf für die Ein- und Auslagerungsfahrt einer LE über dem Median der Regalwand liegt, d. h. die „energiebedürftigere Hälfte“ der Regalwand.⁵³⁴

Beide Kriterien, d. h. eine geringe Fahrzeit und ein geringer Energiebedarf werden von denjenigen LP am besten erfüllt, die sich in der linken unteren Ecke der Regalwand und somit nah am ÜP befinden. Dies wird durch den weißen Bereich in beiden Teilen der Abbildung dargestellt, der jeweils die 10 % schnellsten bzw. energieminimalen LP umfasst. Im Gegensatz dazu sind beispielsweise LP in der rechten unteren Ecke der Regalwand durch geringen Energiebedarf (hellgrau markiert), aber auch durch hohe Fahrzeiten (dunkelgrau markiert) charakterisiert.

5.2.2 Ein-Zonen energieminimal (ENM1)

Algorithmus 3 Strategie Ein-Zonen energieminimal (ENM1)

1. Sortiere alle LP der Regalwand $n_{LP,RW}$
 - (a) aufsteigend nach belegt sowie
 - (b) nach aufsteigendem mittlerem Energiebedarf $E_{UP,LP}$
 2. Wähle den obersten LP der Tabelle: Index realer Soll-LP $LP_{Soll,real} = 1$
-

Bei der ersten Strategie wird die eingehende LE dem freien LP mit dem geringsten mittleren Energiebedarf zugeordnet.⁵³⁵ Hierfür wird einmalig für jeden LP der Energiebedarf zur Ein- und Auslagerung einer durchschnittlich schweren LE experimentell oder analytisch ermittelt. Algorithmus 3⁵³⁶ stellt die Funktionsweise der Strategie ENM1 dar: Die

⁵³⁴SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012, S. 5) bezeichnen LP, deren Fahrenergien zur Einlagerung einer LE in einem definierten Bereich (z. B. zwischen 30 und 35 Wh) liegen, als isoenergetische LP. Diese Definition ist jedoch irreführend, da bei diesen LP keine gleiche (*iso*), sondern höchstens eine ähnliche (*homo*) Fahrenergie vorliegt. Die LP könnten demnach als homoenergetische LP bezeichnet werden.

⁵³⁵Diese Strategie wurde unabhängig voneinander vom Autor sowie von SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* (2013, S. 103) in jeweils einem Vortrag auf dem 9. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik im September 2013 vorgestellt.

⁵³⁶Die Algorithmen 1-2 in Abschnitt 4.2.3.2 beschreiben die Ermittlung des Verweildauer- und des Massequantils.

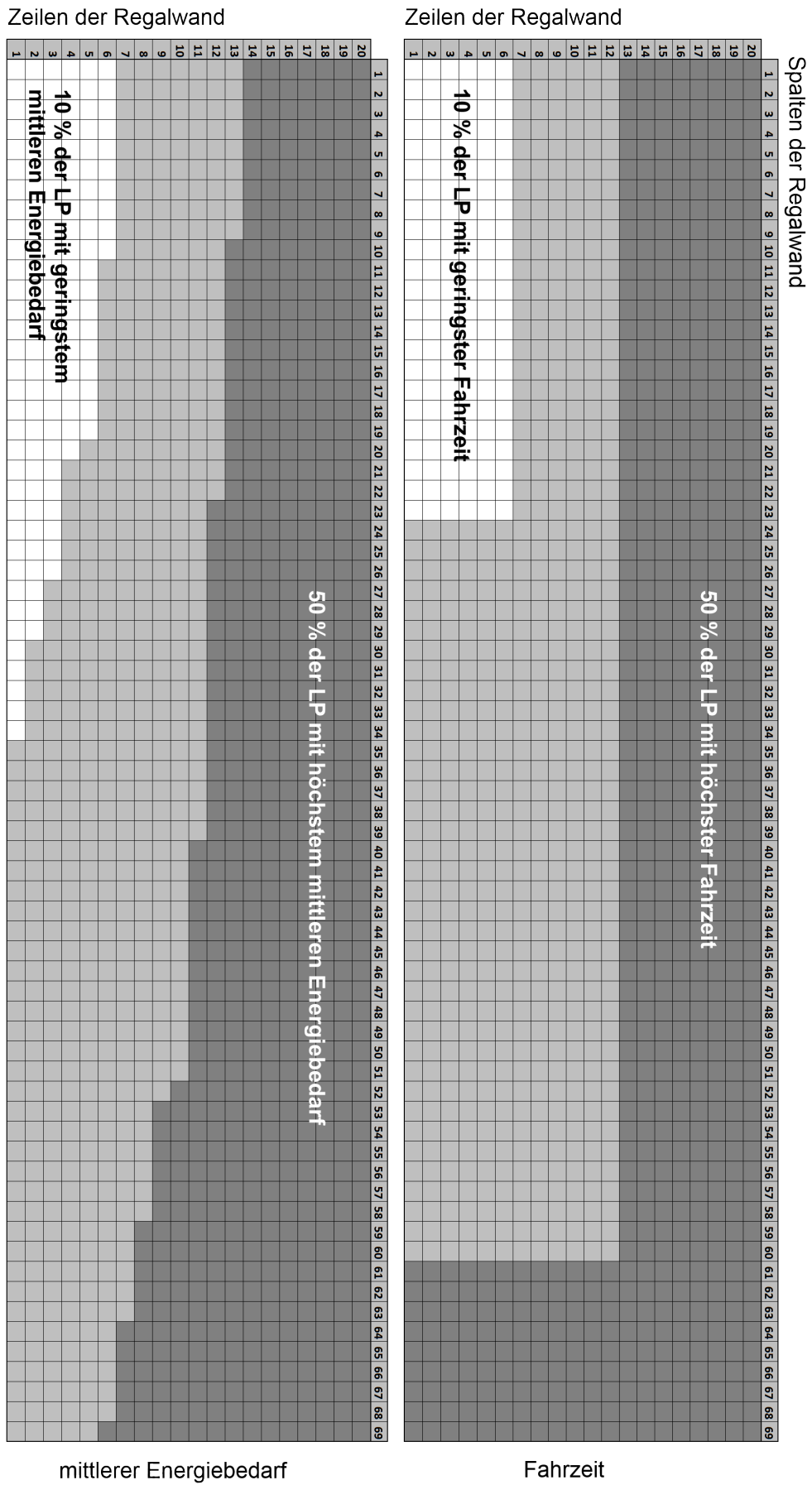


Abbildung 5.1: Fahrzeit und Energiebedarf der LP einer Regalwand (eigene Darstellung)

Strategie	Fahrzeit	Energiebedarf
ENM1	57,1 s	126,5 Wh
Ein-Zonen zufallsbasiert (RND1)	63,8 s	143,8 Wh
Ein-Zonen <i>closest open location</i> (COL1)	57,0 s	126,9 Wh
Zwei-Zonen <i>closest open location</i> (COL2)	49,7 s	109,1 Wh
Energetische ABC-Zonierung (ENM3)	50,9 s	109,3 Wh
Dynamische Zonierung (DYN)	48,7 s	106,5 Wh

Tabelle 5.1: Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie ENM1 im Basisszenario

LP der Regalwand⁵³⁷ werden beim Eintreffen einer LE aufsteigend nach belegt sowie anschließend ebenfalls aufsteigend nach dem mittleren Energiebedarf sortiert. Daraufhin wird der oberste Eintrag (Index = 1), d. h. der freie LP mit dem geringsten mittleren Energiebedarf, als LP für die eingehende LE als realer Soll-LP ausgewählt.

Wie in Abbildung 5.1 dargestellt wurde, weisen LP mit einem geringen mittleren Energiebedarf zum Teil hohe Fahrzeiten auf (siehe rechte untere Ecke der Regalwand in Abbildung 5.1). Bei Anwendung der Strategie ENM1 werden bevorzugt LP mit einem geringen Energiebedarf ausgewählt, ohne jedoch deren Fahrzeit in Betracht zu ziehen. Daher wird erwartet, dass die Strategie ENM1 zu einem geringeren mittleren Energiebedarf, aber auch zu einer höheren Fahrzeit je Ein- und Auslagerung gegenüber dem zeitlichen Pendant, der Strategie COL1, führt.

Die Simulationsergebnisse (siehe Tabelle 5.1) bestätigen diese Vermutung und zeigen, dass im Basisszenario bei Anwendung der Strategie ENM1 im Vergleich zur Strategie COL1⁵³⁸ eine geringe mittlere Energieeinsparung in Höhe von 0,4 Wh erzielt werden konnte, was einer Reduktion um ca. 0,3 % entspricht. Die Strategie ENM1 ist somit nur unwesentlich energieeffizienter als ihr zeitliches Pendant. Die mittlere Fahrzeit steigt dabei um 0,2 s, was einer Erhöhung um 0,3 % entspricht. Im Vergleich zur Strategie RND1 verbessert die Strategie ENM1 sowohl die Energieeffizienz als auch den Umschlag deutlich, was sich in Einsparungen von 12,1 % des Energiebedarfs sowie von 10,5 % der Fahrzeit widerspiegelt. Gegenüber der Strategie DYN führt die Strategie ENM1 zu einer um 17,3 % gestiegenen Fahrzeit sowie zu einem um 18,7 % gestiegenen Energiebedarf.

Abbildung 5.2 illustriert die Zugriffshäufigkeit auf die einzelnen LP bei Anwendung der Strategie ENM1 im Basisszenario. Je dunkler dabei eine LP eingefärbt ist, desto häufiger

⁵³⁷Vgl. Tabelle 4.3.

⁵³⁸Vgl. zu den Strategien RND1, COL1, COL2 und DYN Abschnitt 4.4.

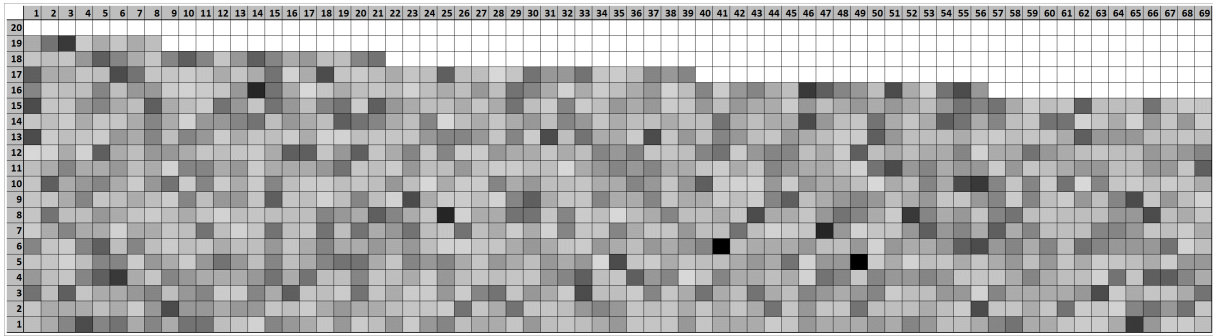


Abbildung 5.2: Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie ENM1 (eigene Darstellung)

wird auf diesen zugegriffen. Sehr helle oder gar weiße LP erfahren während der Simulation nur sehr wenige oder gar kein Zugriffe. Die Abbildung zeigt, dass LP mit einem hohen mittleren Energiebedarf nach Möglichkeit nicht angefahren werden. Bei einem konstanten LFG wird jeder durch eine Auslagerung frei werdende LP bei der nächstmöglichen Gelegenheit wieder mit einer einzulagernden LE belegt.

Es bleibt festzustellen, dass die realisierbaren Energieeinsparungen bei Anwendung der Strategie ENM1 in aHRL im Basisszenario gering ausfallen. Die Energieeinsparungen der Strategie ENM1 gegenüber der Strategie COL1 weisen dabei keine signifikanten Unterschiede bei unterschiedlichen LFG auf: Die Veränderungen treten auch im Szenario eines hohen LFG (ENM1: 132,5 Wh gegenüber 133,0 Wh bei COL1) und im Szenario eines niedrigen LFG (ENM1: 120,7 Wh gegenüber 121,1 Wh bei COL1) auf, wobei in beiden Fällen geringe Fahrzeiterhöhungen von ca. 0,2s in Kauf genommen werden müssen. Die Massespannweite hat weder auf die Fahrzeit noch auf den Energiebedarf der Strategie ENM1 signifikante Auswirkungen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Strategie ENM1 die individuelle Masse der eingehenden LE nicht bei der LP-Zuordnung berücksichtigt und somit aus der Massespannweite⁵³⁹ keine energetischen Vorteile ziehen kann.

5.2.3 Energetische dynamische Zonierung (E-DYN)

Die Strategie E-DYN stellt eine Adaption der dynamischen Zonierung (DYN) dar, bei der LE mit einer kurzen Verweildauer nicht schnellen LP zugeordnet werden, sondern auf LP mit einem geringen Energiebedarf eingelagert werden. Ziel dabei ist es, LP, die bei ihrer Anfahrt nur einen geringen mittleren Energiebedarf erfordern, möglichst häufig anzufahren. Auf LP mit einem hohen Energiebedarf soll hingegen nur selten zugegriffen werden. Dabei berücksichtigt die Strategie jedoch nicht die Massespannweite der LE zur LP-Zuordnung, sondern differenziert die LE lediglich nach ihrer individuellen Verweildauer. Im Gegensatz zur Strategie DYN, bei der versucht wird, eine Übereinstimmung des

⁵³⁹Die Massespannweite beschreibt die Differenz zwischen der schwersten und der leichtesten LE im aHRL. Vgl. Abschnitt 4.3.

Verweildauerquantils⁵⁴⁰ der LE und des Fahrzeitquantils⁵⁴¹ des LP zu erreichen, wird bei der Strategie E-DYN beabsichtigt, eine Übereinstimmung des Verweildauerquantils der LE und des Energiebedarfsquantils des LP zu erreichen.

Algorithmus 4 Strategie Energetische dynamische Zonierung (E-DYN)

1. Bestimmung des Verweildauerquantils α der eingehenden LE nach Algorithmus 1
 2. Bestimmung des energetisch optimalen Soll-LP ($LP_{Soll,optimal}$) zum Verweildauerquantil
 - (a) Sortiere alle LP einer Regalwand $n_{LP,RW}$ nach aufsteigendem mittlerem Energiebedarf $E_{UP,LP}$
 - (b) Ermittle Index (Ordnungsnummer) $LP_{Soll,optimal} = n_{LP,RW} \cdot \alpha$ (gerundet)
 - (c) Ermittle $E_{UP,LP}$ von $LP_{Soll,optimal}$
 3. Bestimmung des energetisch optimalen Ist-LP ($LP_{Ist,optimal}$) der die Funktion $|E_{UP,LP_i} - E_{UP,LP_{Soll,optimal}}|$ minimiert
-

Die Strategie E-DYN ist in Algorithmus 4 beschrieben. Nach Bestimmung des Verweildauerquantils α der eingehenden LE wird der LE ein energetisch passender LP zugeordnet. Hierfür werden zunächst die LP der Regalwand $n_{LP,RW}$ nach aufsteigendem mittlerem Energiebedarf sortiert. Aus dem auf eine Ganzzahl gerundeten Produkt aus dem Verweildauerquantil α und der Anzahl der LP der Regalwand, $n_{LP,RW}$, ergibt sich der Index (Ordnungsnummer) des für die LE optimalen Soll-LP $LP_{Soll,optimal}$ ohne jedoch die Verfügbarkeit der LP zu beachten. Sollte der optimale Soll-LP bereits belegt sein, so wird derjenige LP ausgewählt, dessen mittlerer Energiebedarf die geringste absolute Abweichung zum zuvor ermittelten mittleren Energiebedarf von $LP_{Soll,optimal}$ aufweist.

Wie Abbildung 5.1 zeigt, unterscheidet sich die Verteilung von LP in einer Regalwand hinsichtlich ihrer Fahrzeit und ihres mittleren Energiebedarfs. Durch einen erhöhten Zugriff auf LP mit einem geringen mittleren Energiebedarf an Stelle eines erhöhten Zugriffs auf LP mit einer geringen Fahrzeit ist zu erwarten, dass bei Anwendung der Strategie E-DYN eine Senkung des Energiebedarfs, jedoch auch eine Steigerung der Fahrzeit erzielt wird.

Die Simulationsergebnisse (siehe Tabelle 5.2) bestätigen diese Vermutung teilweise und zeigen, dass im Basisszenario bei Anwendung der Strategie E-DYN im Vergleich zur Referenzstrategie DYN eine mittlere Energieeinsparung in Höhe von 1,9 Wh erzielt wird, was einer Reduktion um 1,7 % entspricht. Die Strategie E-DYN ist somit energieeffizienter

⁵⁴⁰Vgl. Abschnitt 4.2.3.2.

⁵⁴¹Das Fahrzeitquantil beschreibt die Rangfolge der LP hinsichtlich ihrer Fahrzeiten zum ÜP. Vgl. Fußnote 285.

Strategie	Fahrzeit	Energiebedarf
E-DYN	48,7 s	104,7 Wh
Ein-Zonen zufallsbasiert (RND1)	63,8 s	143,8 Wh
Ein-Zonen <i>closest open location</i> (COL1)	57,0 s	126,9 Wh
Zwei-Zonen <i>closest open location</i> (COL2)	49,7 s	109,1 Wh
Energetische ABC-Zonierung (ENM3)	50,9 s	109,3 Wh
Dynamische Zonierung (DYN)	48,7 s	106,5 Wh

Tabelle 5.2: Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie E-DYN im Basisszenario

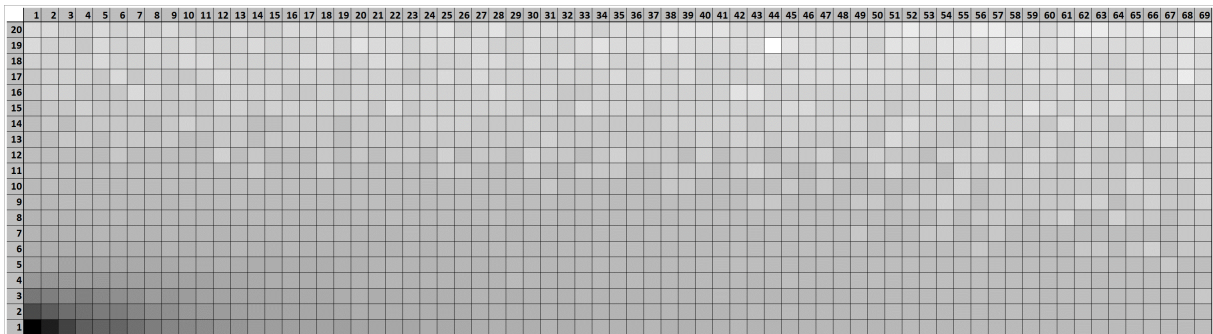


Abbildung 5.3: Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie E-DYN (eigene Darstellung)

als die bisher bekannten Strategien. Ein signifikanter Anstieg der mittleren Fahrzeit kann jedoch nicht gemessen werden. Im Vergleich zur Strategie RND1 verbessert die Strategie E-DYN sowohl die Energieeffizienz als auch den Umschlag deutlich, was sich in Einsparungen in Höhe von 27,2% des Energiebedarfs sowie 23,7% der Fahrzeit widerspiegelt.

Abbildung 5.3 illustriert die Zugriffshäufigkeit der einzelnen LP bei Anwendung der Strategie E-DYN: Je dunkler dabei ein LP eingefärbt ist, desto häufiger wird auf diesen zugegriffen. Sehr helle oder gar weiße LP erfuhren während der Simulation nur sehr wenige oder gar keine Zugriffe. In Abbildung 5.4 sind zum Vergleich die LP der Regalwand anhand ihres mittleren Energiebedarfs eingefärbt. Dabei sind die LP mit dem geringsten mittleren Energiebedarf weiß markiert, während die LP der Regalwand mit dem höchsten mittleren Energiebedarf dunkel hervorgehoben sind. Es zeigt sich, dass die Strategie E-DYN, wie beabsichtigt, zu einem erhöhten Zugriff auf LP mit einem geringen mittleren Energiebedarf führt, während LP mit einem hohen mittleren Energiebedarf nur selten für Einlagerungen genutzt werden. Insbesondere die LP nahe dem ÜP werden sehr häufig angefahren.

Die Strategie E-DYN führt zu einer leichten Verbesserung der Energieeffizienz der

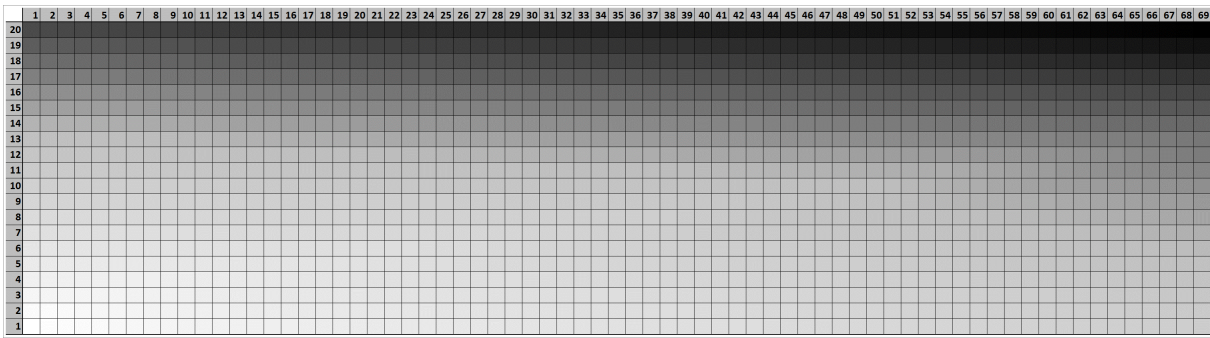


Abbildung 5.4: Mittlerer Energiebedarf der LP der Regalwand (eigene Darstellung)

Lageroperationen, ohne jedoch den unerwünschten Nebeneffekt messbar sinkender Fahrzeiten in Kauf nehmen zu müssen. Auch wenn die Energieeinsparungen gering ausfallen, ist die Strategie im Basisszenario dennoch den bisherigen Strategien zur LP-Zuordnung überlegen. Die Einsparungen gegenüber der Strategie DYN treten auch im Szenario eines hohen LFG (E-DYN: 104,9 Wh gegenüber 106,6 Wh bei DYN) auf, wobei hier beide Strategien eine Fahrzeit von 48,7s erzielen. Im Szenario eines niedrigen LFG (E-DYN: 104,5 Wh gegenüber 106,4 Wh bei DYN) fallen die Einsparungen mit 1,8 % minimal größer aus. Beim niedrigen LFG erzielen sowohl DYN als auch E-DYN eine Fahrzeit von 48,6 s, die etwas höher als die der Strategie COL2 (47,9 s) liegt. Die Massespannweite⁵⁴² hat weder auf die Fahrzeit noch auf den Energiebedarf der Strategie E-DYN signifikante Auswirkungen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Strategie E-DYN, wie auch die Strategie ENM1⁵⁴³, die individuelle Masse der eingehenden LE nicht bei der LP-Zuordnung berücksichtigt und somit aus der Massespannweite keine energetischen Vorteile ziehen kann.

5.2.4 Energieminimal in der Isochrone (EMI)

Durch die in Abschnitt 3.2 beschriebene Überlagerung der horizontalen und vertikalen Bewegung der LE während einer zweidimensionalen Einlagerungsfahrt weist meist mehr als ein LP die gleiche Fahrzeit vom ÜP auf. Dies liegt darin begründet, dass ihre zeitbestimmende Komponente, d. h. $t_{x,i}$ oder $t_{y,i}$, den gleichen Wert aufweist, während die nicht zeitbestimmende Komponente variiert.⁵⁴⁴ Dieser Fall tritt v. a. bei LP in der gleichen horizontalen Reihe oder in der gleichen vertikalen Spalte einer Regalwand auf. LP mit einer gleichen Fahrzeit bilden eine Isochrone der Regalwand.

Beispiele für Isochronen finden sich in den grau markierten Zeilen und Spalten in Abbildung 5.5⁵⁴⁵. Die Anzahl an LP je Isochrone ist, je nach mechanischer Konstruktion

⁵⁴²Vgl. Abschnitt 4.3.

⁵⁴³Ein-Zonen-Strategie mit energieminimaler LP-Zuordnung innerhalb der Zone. Vgl. Abschnitt 5.2.2.

⁵⁴⁴Vgl. Formel 3.5 auf S. 32.

⁵⁴⁵Die Abbildung zeigt Isochronen auf Basis analytischer Fahrzeitberechnungen. Dabei werden Fahrzeiten

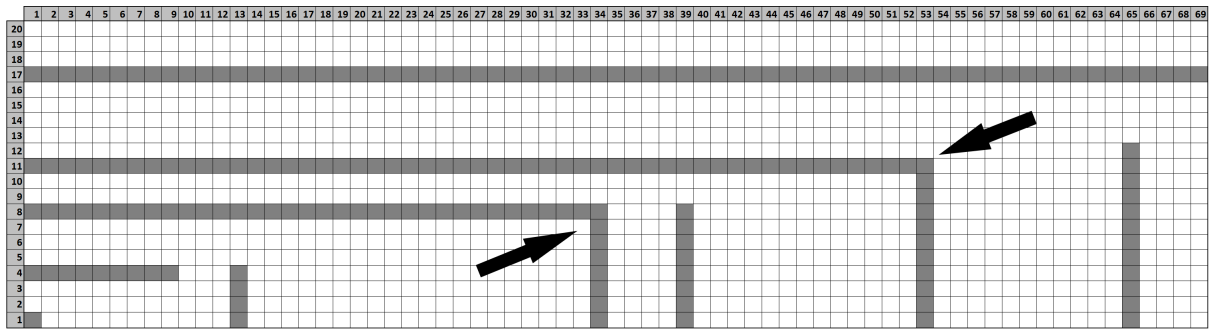
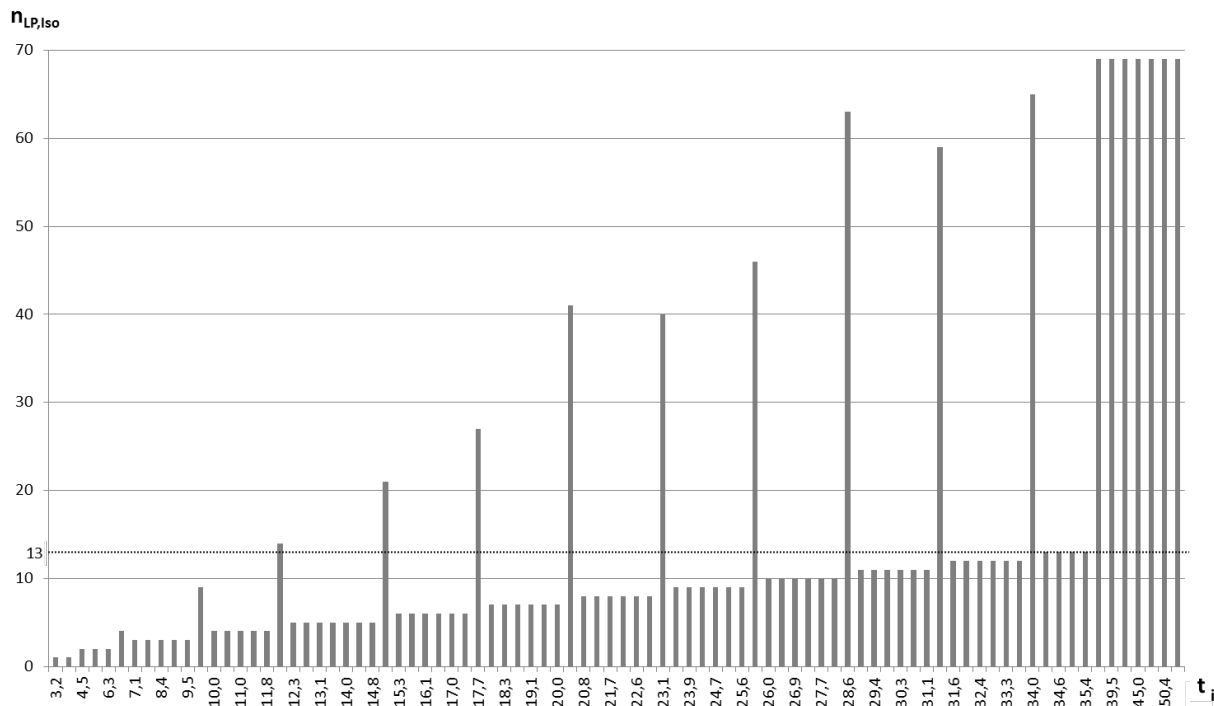


Abbildung 5.5: Isochronen einer Regalwand (eigene Darstellung)

Abbildung 5.6: Umfang der Isochronen ($n_{LP,Iso}$) einer Regalwand (eigene Darstellung)

der Regalwand und kinematischen Eigenschaften des RBG, sehr unterschiedlich. Während in der untersuchten Regalwand mit 69 Spalten und 20 Zeilen die langsamste Isochrone, d. h. die oberste Zeile, aus 69 LP besteht, wird die schnellste Isochrone, d. h. nahe dem ÜP, nur durch einen LP gebildet. Dabei ist es möglich, dass Isochronen nur in einer Spalte oder einer Zeile existieren. Liegt ein LP auf der Synchronfahrgeraden des RBG, so kann sich eine Isochrone L-förmig an einer Ecke der Synchronfahrgeraden fortsetzen (siehe Pfeilmarkierungen in Abbildung 5.5).

Abbildung 5.6 illustriert den Umfang ($n_{LP,Iso}$) der verschiedenen Isochronen der untersuchten Regalwand. Dabei zeigt sich, dass ein großer Teil der Isochronen einen Umfang von höchstens 13 LP aufweist (siehe gestrichelte horizontale Linie in Abbildung 5.6), wäh-

als gleich gewertet, wenn sie sich um weniger als 1 Promille voneinander unterscheiden, wodurch auch Isochronen „übers Eck“ entstehen.

Algorithmus 5 Strategie energieminimal in der Isochrone (EMI)

1. Bestimmung des Verweildauerquantils α der eingehenden LE nach Algorithmus 1
 2. Bestimmung des aus Verweildauersicht optimalen Soll-LP $LP_{Soll,optimal,VW}$
 - (a) Sortiere alle LP der Regalwand $n_{LP,RW}$ nach aufsteigender Fahrzeit
 - (b) Ermittle Index $LP_{Soll,optimal,VW} = n_{LP,RW} \cdot \alpha$ (gerundet)
 3. Ermittlung der zeitlich kompatiblen LP der Isochrone
 - (a) Bestimme $t_{UP,LP_{Soll,VW,real}}$
 - (b) Bestimme die Menge $n_{LP,Iso}$ der LP mit $t_{UP,LP_i} = t_{UP,LP_{Soll,VW,real}}$
 4. Bestimmung des energieminimalen LP der Isochrone
 - (a) Sortiere die Menge $n_{LP,Iso}$ nach aufsteigendem belegt sowie anschließend nach aufsteigendem mittleren Energiebedarf
 - (b) Ermittle Index $LP_{Ist,optimal} = 1$
-

rend nur wenige Isochronen, d. h. v. a. horizontal verlaufende Isochronen, mehr als 20 LP umfassen. Dies bedeutet, dass die Mehrzahl der Isochronen nur jeweils wenige LP aufweisen, was die Einsparpotentiale der Strategie EMI einschränkt. Da die Regalwand einen Regalwandparameter von 1,6 aufweist⁵⁴⁶, ergeben sich mehrere langsame Isochronen, die in den oberen Zeilen der Regalwand horizontal verlaufen (in der Abbildung durch die sieben gleich hohen Balken am rechten Rand dargestellt).

Die LP einer Isochrone unterscheiden sich nicht in ihrer Fahrzeit, jedoch in ihrem mittleren Energiebedarf. So weist beispielsweise der LP in Zeile 1 und Spalte 69 der untersuchten Regalwand einen Energiebedarf von 111 Wh zur Ein- und Auslagerung einer LE mit 650 kg auf, während der Energiebedarf beim LP in Zeile 13 und Spalte 69 der gleichen Isochrone bei 188 Wh liegt. Dieser Umstand soll in der nachfolgend beschriebenen Strategie EMI genutzt werden, um den Energiebedarf von Ein- und Auslagerungen zu reduzieren, ohne Einbußen bei der Fahrzeit in Kauf nehmen zu müssen:

Der Aufbau der Strategie ist in Algorithmus 5 dargestellt. Die Strategie EMI zielt auf geringe mittlere Fahrzeiten ab, indem zunächst für eine eingehende LE ein aus Verweildauersicht optimaler Soll-LP ausgewählt wird. Hierzu werden - analog zur Strategie DYN nach GLASS - alle LP nach ihrem Fahrzeitquantil aufsteigend sortiert. Anschließend wird die LE dem LP zugeordnet, dessen Fahrzeitquantil zum Verweildauerquantil⁵⁴⁷ der LE den geringsten absoluten Abstand aufweist. Der Rang (Index) des entsprechenden LP in der

⁵⁴⁶Vgl. Formel 4.1 auf S. 75.

⁵⁴⁷Vgl. Abschnitt 4.2.3.2.

Strategie	Fahrzeit	Energiebedarf
EMI	49,6 s	106,2 Wh
Ein-Zonen zufallsbasiert (RND1)	63,8 s	143,8 Wh
Ein-Zonen <i>closest open location</i> (COL1)	57,0 s	126,9 Wh
Zwei-Zonen <i>closest open location</i> (COL2)	49,7 s	109,1 Wh
Energetische ABC-Zonierung (ENM3)	50,9 s	109,3 Wh
Dynamische Zonierung (DYN)	48,7 s	106,5 Wh

Tabelle 5.3: Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie EMI im Basisszenario

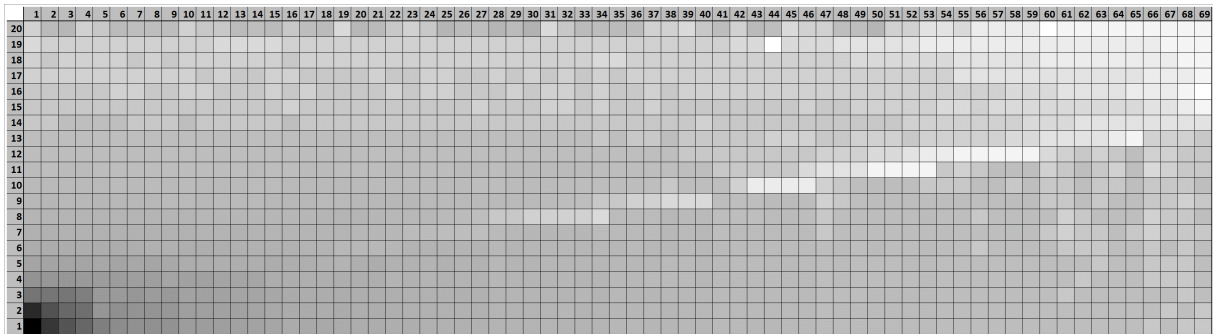


Abbildung 5.7: Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie EMI (eigene Darstellung)

nach aufsteigender Fahrzeit sortierten Tabelle entspricht dabei dem gerundeten Produkt aus dem Verweildauerquantil α der LE und der Anzahl an LP in der Regalwand $n_{LP,RW}$ (Schritt 2b des Algorithmus 5). Darüber hinaus versucht die Strategie Energieeinsparungen zu realisieren, indem für jede eingehende LE auf der für sie passenden Zielisochrone der freie LP mit dem geringsten mittleren Energiebedarf ausgewählt wird. Die Strategie stellt somit eine Kombination aus einer verweildauerbasierten LP-Zuordnung und der in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten energieminimalen LP-Zuordnung (ENM1) dar.

Die Simulationsergebnisse (siehe Tabelle 5.3) zeigen, dass bei Anwendung der Strategie EMI im Vergleich zur Referenzstrategie DYN im Basisszenario eine Energieeinsparung von 0,3 Wh erzielt werden konnte, was einer Reduktion um ca. 0,3 % entspricht. Die Strategie EMI ist somit energieeffizienter als die Strategie DYN, erzielt aber nicht die Einsparungen der Strategie E-DYN.⁵⁴⁸ Die Fahrzeit steigt um 1,0 s, was einer Erhöhung um 2,0 % entspricht. Im Vergleich zur Strategie RND1 verbessert die Strategie EMI sowohl die Energieeffizienz als auch den Umschlag deutlich, was sich in Einsparungen in Höhe von 26,1 % des Energiebedarfs sowie 22,2 % der Fahrzeit widerspiegelt.

⁵⁴⁸Vgl. Abschnitt 5.2.3.

Abbildung 5.7 illustriert die Zugriffshäufigkeit der einzelnen LP bei Anwendung der Strategie EMI. Dabei zeigt sich, dass die Strategie EMI wie beabsichtigt zu einem erhöhten Zugriff auf LP einer Isochrone mit einer geringen Fahrenergie führt, während LP einer Isochrone mit einer hohen Fahrenergie nur selten für Einlagerungen genutzt werden. Beispiel hierfür ist die Zeile 12, die eine Isochrone mit einer Fahrzeit von ca. 31,3 s darstellt. In dieser Zeile wird auf LP mit geringen mittleren Energiebedarfen (z. B. in den Spalten 1-10) häufig zugegriffen, während LP in den Spalten 54-59, die hohe mittlere Energiebedarfe aufweisen, nur eine bis drei Einlagerungen aufweisen.

Der Energiebedarf der Strategie EMI steigt bei einem hohen LFG auf 108,0 Wh an und übersteigt damit sogar den Wert der Strategie DYN (106,6 Wh). Die Fahrzeit (50,1 s) liegt ebenfalls höher als bei der Strategie DYN (48,7 s). Bei niedrigem LFG weist die Strategie EMI jedoch mit einem Energiebedarf von 104,7 Wh eine Reduktion um 1,6 % gegenüber der Strategie DYN auf, wobei die Fahrzeit mit 49,3 s jedoch die der Strategie DYN übersteigt. Der Zusammenhang zwischen dem Energiebedarf der Strategie EMI und dem LFG resultiert daraus, dass die Strategie EMI energetische Vorteile aus der Nichtnutzung von LP mit hohen Energiebedarfen zu ziehen versucht. Bei niedrigem LFG können demnach in jeder Isochrone mehr energetisch ungünstige LP frei bleiben, während diese bei einem hohen LFG genutzt werden müssen. Die Massespannweite⁵⁴⁹ hat weder auf die Fahrzeit noch auf den Energiebedarf der Strategie EMI signifikante Auswirkungen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Strategie EMI, wie auch die Strategien ENM1 und E-DYN, die individuelle Masse der eingehenden LE nicht bei der LP-Zuordnung berücksichtigt und somit aus der Massespannweite keine energetischen Vorteile ziehen kann.

5.2.5 EMI mit Toleranzfaktor r (EMIr)

In der Strategie EMI⁵⁵⁰ wird für eine eingehende LE ein LP ermittelt, dessen Fahrzeitquantil dem Verweildauerquantil⁵⁵¹ der LE entspricht. Anschließend werden alle LP der Isochrone des Ziel-LP ebenfalls in die Ermittlung eines energieeffizienten LP einbezogen, da alle LP der Isochrone gleiche Fahrzeiten aufweisen, sich jedoch in ihrem mittleren Energiebedarf unterscheiden. Ziel ist es dabei, denjenigen freien LP der Ziel-Isochrone auszuwählen, der den geringsten mittleren Energiebedarf aufweist.

Die LP-Belegung reduziert jedoch die Anzahl verfügbarer LP einer Isochrone drastisch: So ist in einer Isochrone mit zehn LP bei einem LFG von 90 % im Durchschnitt nur ein einzelner LP frei verfügbar. Dieser Umstand schränkt die Gestaltungsmöglichkeiten der Strategie EMI stark ein. Daher wird in die Strategie EMI ein Toleranzfaktor r implemen-

⁵⁴⁹Vgl. Abschnitt 4.3.

⁵⁵⁰Vgl. Abschnitt 5.2.4.

⁵⁵¹Vgl. Abschnitt 4.2.3.2.

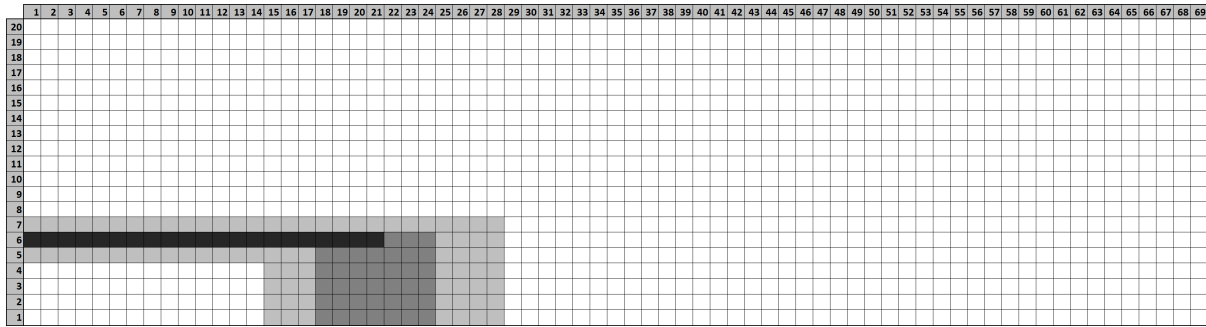


Abbildung 5.8: Wirkung des Toleranzfaktors r (eigene Darstellung)

tiert und auf seine Wirkung hin untersucht. Dieser sorgt dafür, dass nach Bestimmung einer Soll-Fahrzeit, d. h. nach Festlegung der aus Verweildauersicht optimalen Isochrone für die eingehende LE, auch angrenzende Isochronen in die Bestimmung eines energieminimalen LP einbezogen werden. Der Toleranzfaktor r gibt dabei die maximal zulässige Abweichung der Fahrzeit einer Isochrone zur Ziel-Isochrone in Prozent wieder.⁵⁵²

Abbildung 5.8 illustriert die Wirkung dieses Toleranzfaktors r auf die Menge der in Betracht gezogenen LP: Die schwarze Isochrone weist eine Fahrzeit zum ÜP in Höhe von 15,0 s und einen Umfang von 21 LP auf. Durch Einführung eines Toleranzfaktors von $r = 10\%$ werden Isochronen mit einer Fahrzeit zwischen 13,5 und 16,5 s für die Bestimmung eines energieminimalen LP in Betracht gezogen. Damit erhöht sich der Umfang auf 59 LP (21+38) (schwarzer + dunkelgrauer Bereich). Ein Toleranzfaktor von $r = 20\%$ weitet den Betrachtungsbereich auf Isochronen mit einer Fahrzeit zwischen 12,0 und 18,0 s aus, so dass aus insgesamt 140 LP (21+38+81) ein energieminimaler Soll-LP ausgewählt werden kann (schwarzer + dunkelgrauer + hellgrauer Bereich). Bei einem LFG von 90% und einem Toleranzfaktor von $r = 20\%$ könnte somit im Mittel aus $(1 - 0,9) \times 140 = 14,0$ freien LP ein energieminimaler Soll-LP bestimmt werden.

Der Aufbau der Strategie ist in Algorithmus 6 dargestellt. Die Strategie EM_{Ir} zielt auf geringe mittlere Fahrzeiten ab, indem zunächst für eine eingehende LE ein aus Verweildauersicht passender LP ausgewählt wird. Hierzu werden - analog zu den Strategien DYN und EMI - alle LP nach ihrer Fahrzeit aufsteigend sortiert. Anschließend wird die LE dem LP zugeordnet, dessen Fahrzeitquantil zum Verweildauerquantil der LE den geringsten absoluten Abstand aufweist. Um im Anschluss einen energieminimalen LP auszuwählen, werden im Gegensatz zur Strategie EMI auch benachbarte Isochronen beachtet, deren Fahrzeiten in einem Toleranzbereich von $\pm r\%$ um die Fahrzeit der aus Verweil-

⁵⁵²GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990, S. 1126) weisen nach, dass eine LP-Zuordnung in der falschen Zone v. a. bei Soll- und Ist-Zonen mit geringen Fahrzeiten, die für LE mit geringer Verweildauer bestimmt sind, deutlich negative Auswirkungen auf die erzielbare mittlere Fahrzeit hat. Bei Zonen mit höheren Fahrzeiten wirken sich Fehlzusordnungen in einem geringeren Maße aus. Daher wurde für die Strategie EM_{Ir} sowie später für die Strategien MVI_r, MVI_r+ r und MVI_r+ r /w (vgl. Abschnitte 5.3.6 bis 5.3.8) eine relative Abweichung anstelle einer absoluten Abweichung gewählt. Vgl. Fußnote 283.

Algorithmus 6 Strategie energieminimal in der Isochrone mit Toleranzfaktor r (EMIr)

1. Bestimmung des Verweildauerquantils α der eingehenden LE nach Algorithmus 1
 2. Bestimmung des aus Verweildauersicht optimalen Soll-LP $LP_{Soll,optimal,VW}$
 - (a) Sortiere alle LP der Regalwand $n_{LP,RW}$ nach aufsteigender Fahrzeit
 - (b) Ermittle Index $LP_{Soll,optimal,VW} = n_{LP,RW} \cdot \alpha$ (gerundet)
 3. Ermittlung der zeitlich kompatiblen LP
 - (a) Bestimme $t_{UP,LP_{Soll,VW,real}}$
 - (b) Bestimme die Menge $n_{LP,Iso,r}$ der LP mit $t_{UP,LP_{Soll,VW,real}} \cdot (1 - r) \leq t_{UP,LP_i} \leq t_{UP,LP_{Soll,VW,real}} \cdot (1 + r)$
 4. Bestimmung des energieminimalen Ist-LP
 - (a) Sortiere die Menge $n_{LP,Iso,r}$ nach aufsteigendem belegt sowie anschließend nach aufsteigendem mittleren Energiebedarf
 - (b) Ermittle Index $LP_{Ist,optimal} = 1$
-

dauersicht optimalen Isochrone liegen. In dem somit in Betracht gezogenen Bereich wird derjenige LP ausgewählt, der den geringsten mittleren Energiebedarf aufweist. Die Strategie EMIr erweitert somit die Kombination aus einer verweildauerbasierten LP-Zuordnung und der in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten energieminimalen LP-Zuordnung (ENM1) um die Einbeziehung benachbarter Isochronen.

Zur Untersuchung der Auswirkungen des Toleranzfaktors r auf die Fahrzeit und den Energiebedarf werden Toleranzfaktoren von $r = 5\% \dots 50\%$ (EMI5 bis EMI50) in das Simulationsmodell implementiert und bewertet. Tabelle 5.4 stellt die erzielten Simulationsergebnisse dar. Die jeweils niedrigsten Werte für Fahrzeit und Energiebedarf sind wie auch im Rest dieser Arbeit mit einem „*“ gekennzeichnet. Abbildung 5.9 illustriert die Ergebnisse für das Basisszenario. Darin zeigen die roten Balken (Skala auf der linken Seite) die entstehenden Energiebedarfe und die blauen Balken (Skala auf der rechten Seite) die entstehenden Fahrzeiten, jeweils in Abhängigkeit vom gewählten Wert des Toleranzfaktors r . Tendenziell sinken die Fahrzeit und der Energiebedarf bei steigendem Toleranzfaktor r , um nach Erreichen eines Minimums bei $r = 15\%$ bei höheren Werten für r wieder anzusteigen. Bei Anwendung eines Toleranzfaktors von $r = 15\%$ wird der mit 102,3 Wh geringste Energiebedarf erzielt. Dieser Wert unterschreitet den Referenzwert der Strategie DYN um 4,2 Wh oder 4,0%. Dabei wird eine Fahrzeit von 47,9 s erzielt, was 0,8 s oder 1,6% unter der Fahrzeit der Strategie DYN liegt. Die Strategie EMI15 unterbietet die Fahrzeit der Strategie RND1 um 15,9 s bzw. 24,9% sowie den Energiebedarf um 41,5 Wh

Strategie	Fahrzeit	Energiebedarf
EMI	49,6 s	106,2 Wh
EMI5	49,3 s	105,0 Wh
EMI10	48,4 s	103,0 Wh
EMI15	*47,9 s	*102,3 Wh
EMI20	48,8 s	104,8 Wh
EMI25	50,0 s	108,1 Wh
EMI30	51,4 s	112,0 Wh
EMI35	52,2 s	114,5 Wh
EMI40	53,0 s	116,4 Wh
Ein-Zonen zufallsbasiert (RND1)	63,8 s	143,8 Wh
Ein-Zonen <i>closest open location</i> (COL1)	57,0 s	126,9 Wh
Zwei-Zonen <i>closest open location</i> (COL2)	49,7 s	109,1 Wh
Energetische ABC-Zonierung (ENM3)	50,9 s	109,3 Wh
Dynamische Zonierung (DYN)	48,7 s	106,5 Wh

Tabelle 5.4: Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie EMi_r im Basisszenario

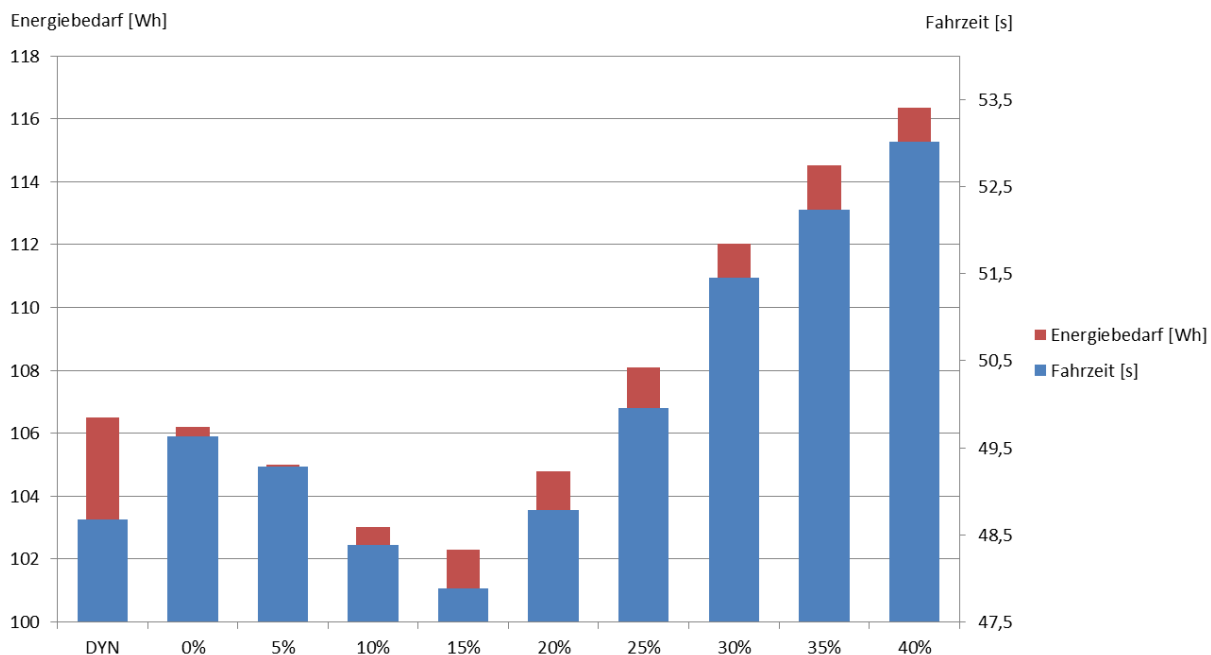


Abbildung 5.9: Auswirkung unterschiedlicher Werte des Toleranzfaktors r bei der Strategie EMi_r auf Fahrzeit und Energiebedarf im Basisszenario mit Vergleich mit Strategie DYN (eigene Darstellung)

bzw. 28,9%. Die Strategie EMI15 ist somit im untersuchten Fall deutlich energieeffizienter als alle bisher untersuchten bekannten oder neu entwickelten Strategien. Gleichzeitig konnte eine leichte Reduktion der Fahrzeit erzielt werden.

Abbildung 5.10 zeigt die Zugriffshäufigkeiten bei Anwendung der Strategien EMIr mit Toleranzfaktoren von 0, 5, 15 und 25% (von oben nach unten).⁵⁵³ Dabei zeigt sich, dass bei steigenden Werten für den Toleranzfaktor r LP mit hohem mittleren Energiebedarf, die sich v. a. in den oberen Zeilen der Regalwand befinden, immer seltener angefahren werden. Dies ist an dem Bereich mit weiß markierten LP in den obersten Zeilen der Regalwand zu sehen, der mit steigenden Werten für den Toleranzfaktor (d. h. in der Abbildung von oben nach unten) wächst.

Der Energiebedarf der Strategie EMI15 steigt bei einem hohen LFG auf 107,6 Wh an und übersteigt damit sogar den Wert der Strategie DYN (106,6 Wh). Die Fahrzeit (50,0 s) liegt ebenfalls höher als bei der Strategie DYN (48,7 s). Bei hohem LFG erzielt jedoch die Strategie EMI10, d. h. mit einem niedrigeren Wert für den Toleranzfaktor r , einen Energiebedarf von 106,8 Wh und eine Fahrzeit von 49,7 s. Beide Werte sind zwar schlechter als bei der Strategie DYN, jedoch scheint ein Zusammenhang zwischen dem LFG und dem optimalen Wert für den Toleranzfaktor r zu bestehen. Bei niedrigem LFG weist die Strategie EMI15 mit einem Energiebedarf von 97,7 Wh eine Reduktion um 8,1% gegenüber der Strategie DYN auf, wobei auch die Fahrzeit mit 46,6 s die der Strategie DYN unterschreitet. Andere Werte für den Toleranzfaktor r führen zu steigenden Fahrzeiten und Energiebedarfen. Demnach kann der vermutete Zusammenhang zwischen dem LFG und dem Wert des Toleranzfaktors r bei einem niedrigen LFG nicht bestätigt werden. Der in Abschnitt 5.2.4 entdeckte Zusammenhang zwischen dem Energiebedarf der Strategie EMI und dem LFG bleibt auch für die Strategie EMIr gültig. Bei niedrigem LFG sind die Werte für die Fahrzeit und den Energiebedarf denen der Strategien DYN und COL2 deutlich überlegen. Die Massespannweite⁵⁵⁴ hat weder auf die Fahrzeit noch auf den Energiebedarf der Strategie EMIr signifikante Auswirkungen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Strategie EMIr, wie auch die Strategien ENM1⁵⁵⁵, E-DYN⁵⁵⁶ und EMI⁵⁵⁷, die individuelle Masse der eingehenden LE nicht bei der LP-Zuordnung berücksichtigt und somit aus der Massespannweite keine energetischen Vorteile ziehen kann.

⁵⁵³Der Toleranzfaktor $r = 0\%$ entspricht der in Abschnitt 5.2.4 vorgestellten Strategie EMI.

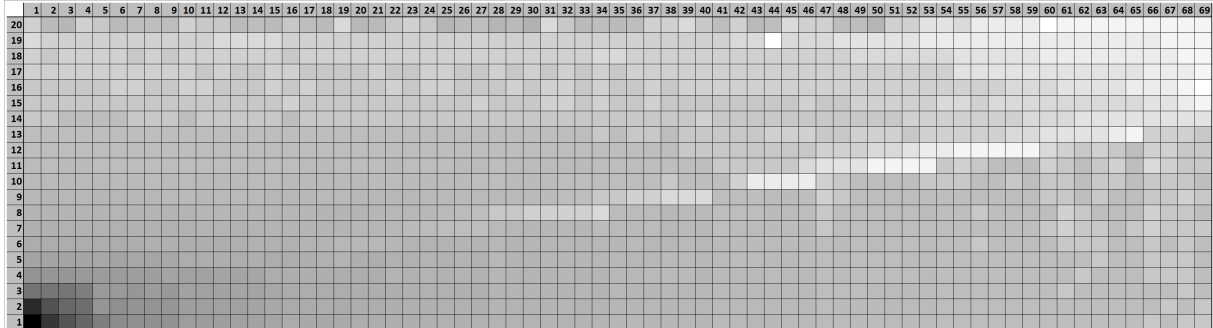
⁵⁵⁴Vgl. Abschnitt 4.3.

⁵⁵⁵Ein-Zonen-Strategie mit energieminimaler LP-Zuordnung innerhalb der Zone. Vgl. Abschnitt 5.2.2.

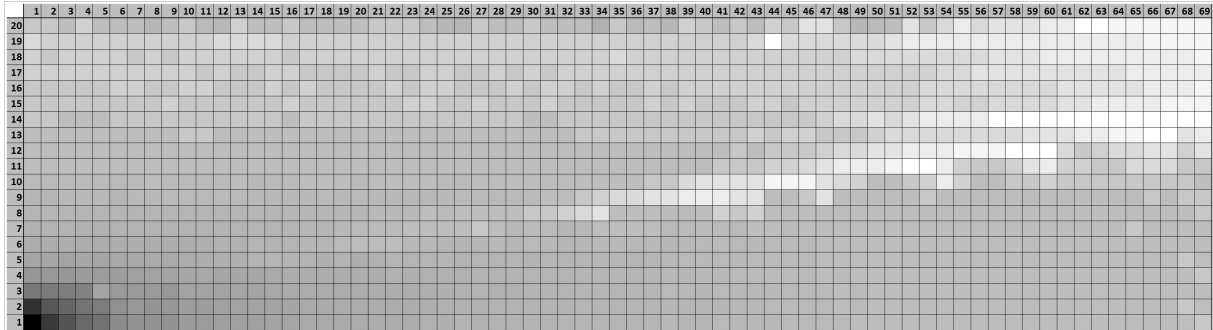
⁵⁵⁶Strategie Energetische dynamische Zonierung. Vgl. Abschnitt 5.2.3.

⁵⁵⁷Strategie Energieminimal in der Isochrone. Vgl. Abschnitt 5.2.4.

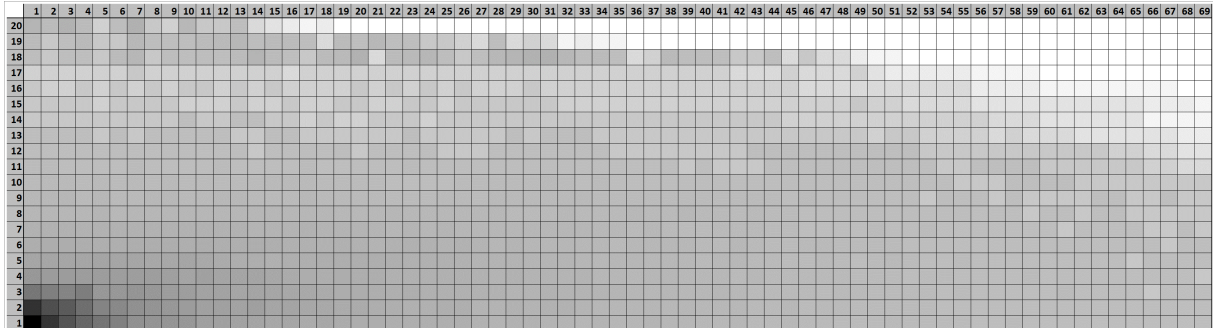
$r = 0\%$:



$r = 5\%$:



$r = 15\%$:



$r = 25\%$:

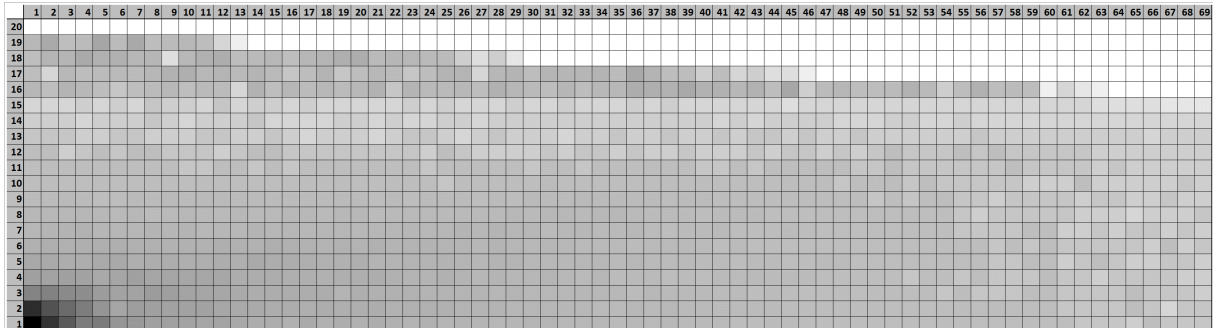


Abbildung 5.10: Zugriffshäufigkeiten bei Anwendung der Strategie EMIR und verschiedene Werte für den Toleranzfaktor r (eigene Darstellung)

5.3 Strategien auf Basis der Energiespannweite je LP

5.3.1 Grundüberlegungen

Abbildung 5.11 illustriert die Masseverteilung bei Anwendung der in Kapitel 4 untersuchten Strategien RND1, COL1, COL2, ENM3 und DYN⁵⁵⁸ (von oben nach unten) im Basisszenario. Diese Form der Darstellung wird an dieser Stelle eingeführt, um Unterschiede zu später vorgestellten Strategien aufzeigen zu können, die die Massespannweite der LE explizit zur Reduktion des Energiebedarfs der Ein- und Auslagerungen auszunutzen. Die Masseverteilung basiert dabei auf der mittleren Masse der in den LP der Regalwand im Simulationslauf eingelagerten LE. Diese mittlere Masse je LP wird bei der Auswertung eines Simulationslaufs gewonnen, indem für jeden LP der Regalwand die Gesamtmasse aller dort eingelagerten LE (Massesumme) gebildet und durch die Anzahl an Einlagerungen geteilt wird.⁵⁵⁹ Die in der Abbildung dunkel markierten LP wurden im Mittel mit einer relativ hohen LE-Masse belegt, während hell markierte LP im Mittel nur mit einer relativ geringen LE-Masse belastet wurden. Da keine der Strategien aus der Massespannweite der LE energetische Vorteile zu ziehen versucht, zeigt sich kein erkennbares Muster in der Masseverteilung innerhalb der Regalwand.⁵⁶⁰

Es werden nun Strategien entwickelt, die die heterogenen Energiebedarfe der LP einer Regalwand zur Ein- und Auslagerung derart ausnutzen, dass der mittlere Energiebedarf der Ein- und Auslagerungen reduziert wird. Heterogene Energiebedarfe der LP resultieren aus unterschiedlich hohem Energiebedarf zur Ein- und Auslagerung schwerer und leichter LE.⁵⁶¹ Um den Energiebedarf für die Ein- und Auslagerung von schweren LE zu reduzieren, werden alle LP der Regalwand auf ihre Eignung zur Lagerung schwerer LE hin bewertet. Hierzu werden die maximal und die minimal mögliche Masse von LE bestimmt, die in dieser Regalwand eingelagert werden. Approximativ eignet sich bei einer eingeschwungenen LP-Belegung die Erfassung der in der Regalwand aktuell eingelagerten schwersten und leichtesten LE. Anschließend wird mittels empirischer Messungen oder unter Anwendung eines validen Energiemodells der Energiebedarf der Ein- und Auslagerung der schwersten LE für alle LP einer Regalwand ermittelt. Die gleiche Berechnung wird für die leichteste LE durchgeführt. Daraufhin wird für jeden LP die Differenz aus

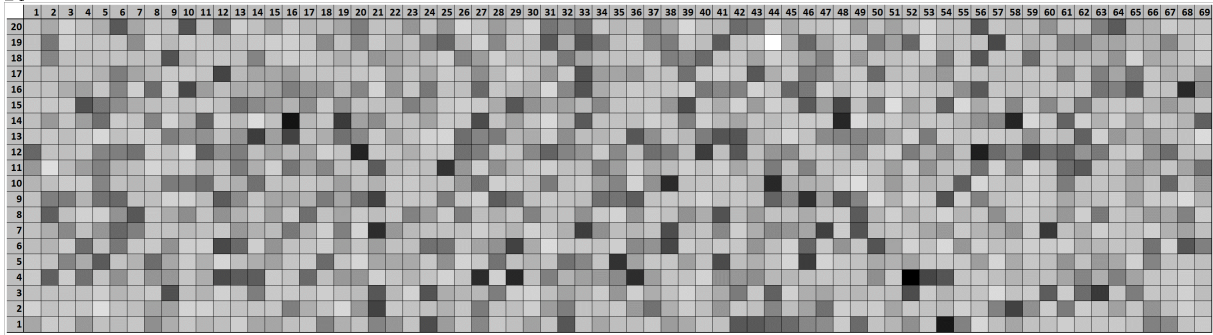
⁵⁵⁸Ein-Zonen-Strategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zone (RND1), Ein-Zonen-Strategie mit Auswahl der *closest open location* innerhalb der Zone (COL1), Zwei-Zonen-Strategie mit Auswahl der *closest open location* innerhalb der Zonen (COL2), energetische ABC-Zonierung (ENM3) und Dynamische Zonierung (DYN). Vgl. Abschnitt 4.2.4.2.4.

⁵⁵⁹Vgl. Tabelle 4.3.

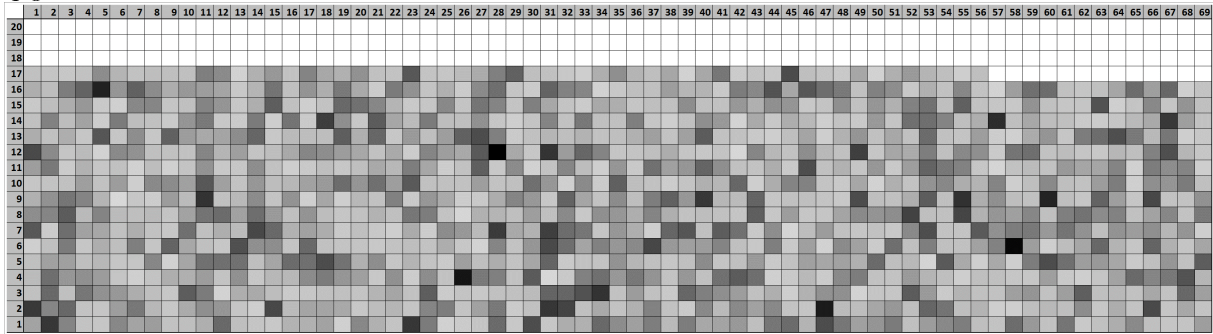
⁵⁶⁰Die Strategien COL1, COL2 und ENM3 führen hingegen bei einem LFG < 1 dazu, dass in langsamen bzw. energiebedürftigen LP selten oder gar nicht eingelagert wird. Daher beträgt die mittlere LE-Masse bei diesen LP teilweise 0.

⁵⁶¹Auf unterschiedlich hohe Energiebedarfe zur Ein- und Auslagerung einer schweren bzw. einer leichten LE in zwei exemplarische LP einer Regalwand weisen auch BRUNS/ GÜNTNER/ FURMANS (Hrsg.) *et al.* (2013, S. 189f) hin, jedoch erfolgt weder eine detaillierte Untersuchung dieses Zusammenhangs noch eine entsprechende Strategieentwicklung.

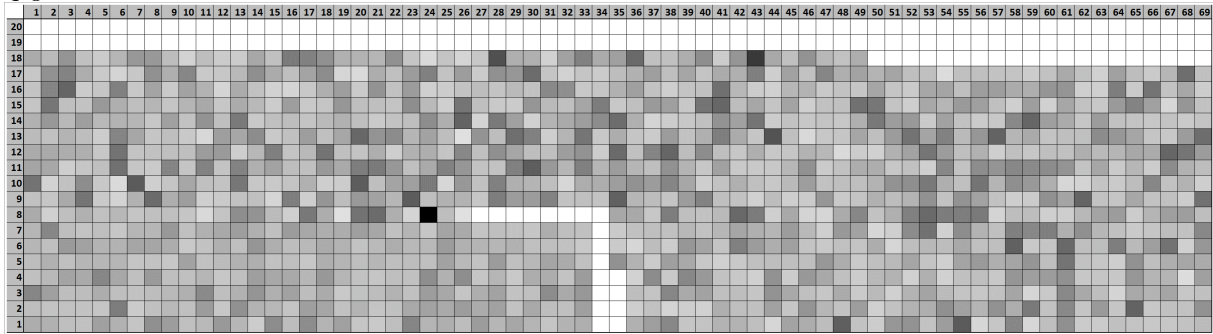
RND1:



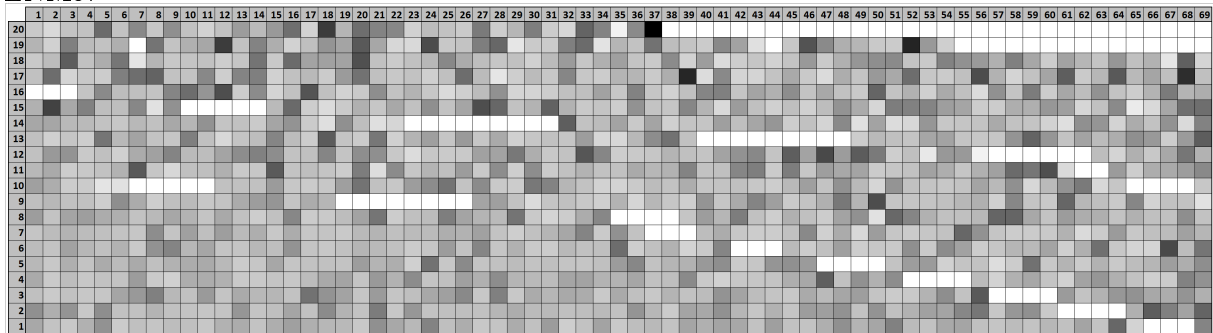
COL1:



COL2:



ENM3:



DYN:

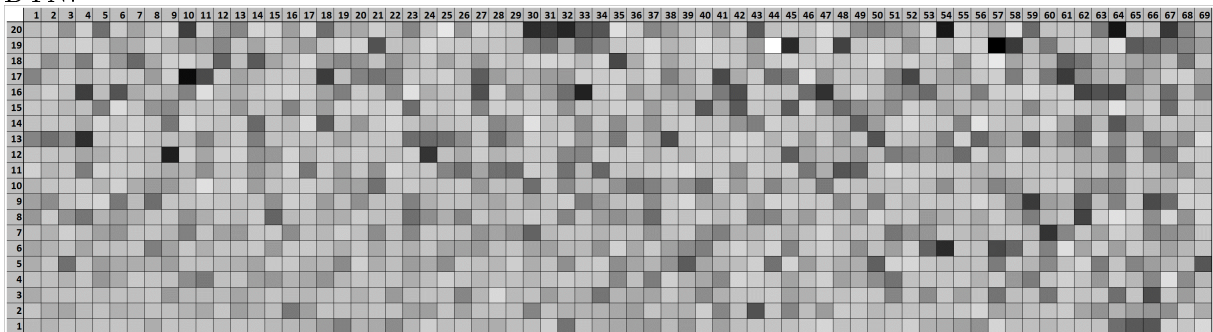


Abbildung 5.11: Masseverteilung bei bekannten Strategien (eigene Darstellung)

beiden Beträgen errechnet. Die Differenz reflektiert die Nichteignung eines LP für schwere LE: So impliziert ein im Vergleich zu den anderen LP der Regalwand hoher Differenzwert, dass es für diesen LP einen sehr großen absoluten energetischen Mehraufwand bedeuten würde, eine schwere LE anstelle einer leichten LE ein- und auszulagern.⁵⁶² Der Differenzwert wird im Folgenden als Energiespannweite eines LP bezeichnet und somit als neue Kennzahl zur Bewertung von LP eingeführt (siehe Formel 5.12):

$$\text{Energiespannweite}_{LP} = \text{Energiebedarf}_{f_{LP,schwere LE}} - \text{Energiebedarf}_{f_{LP,leichte LE}} \quad (5.12)$$

Bildlich gesprochen handelt es sich bei der Energiespannweite um eine „energetische Strafe“ für das Einlagern einer schweren LE in den betreffenden LP. Der konkrete Verlauf der Werte der Energiespannweite innerhalb der Regalwand ist von konstruktiven Merkmalen des Lagermittels (z. B. Breite der Ständer, Abstand zwischen LP), den Abmessungen des LE sowie kinematischen, elektrotechnischen und konstruktiven Merkmalen des RBG, beispielsweise den Reibbeiwerten zwischen den Laufrädern und der Fahrschiene, abhängig. Hierbei ist zu beachten, dass die Energiespannweite innerhalb einer Regalwand einen anderen Verlauf annimmt als der mittlere Energiebedarf⁵⁶³ pro LP.

Abbildung 5.12 zeigt den Verlauf beider Kennwerte innerhalb der gleichen Regalwand des betrachteten aHRL: In der Abbildung sind diejenigen LP dunkelgrau markiert, deren mittlerer Energiebedarf über dem Median liegt (obere Hälfte der Abbildung) bzw. deren Energiespannweite über dem Median liegt (untere Hälfte der Abbildung). Die 10 % der LP mit dem geringsten mittleren Energiebedarf (obere Hälfte der Abbildung) bzw. mit der geringsten Energiespannweite (untere Hälfte der Abbildung) sind in weiß gehalten. Wie die Lage der Flächen zeigt, kommt es zu einer Abweichung des Verlaufs beider Kennwerte.⁵⁶⁴ Dieser Umstand macht deutlich, dass der mittlere Energiebedarf und die Energiespannweite zu einer unterschiedlichen Bewertung der gleichen Regalwand führen und eine Verwendung des mittleren Energiebedarfs zur Beurteilung der Eignung eines LP für schwere bzw. leichte LE zu Verfälschungen führt.⁵⁶⁵

Die nachfolgend dargestellten Strategien zielen darauf ab, aus der Massespannweite⁵⁶⁶

⁵⁶²Alternativ wäre der relative energetische Mehraufwand denkbar, indem der Quotient aus beiden Größen anstelle der Differenz gebildet wird. Experimentelle Untersuchungen des Autors zeigten jedoch die Vorteilhaftigkeit der Nutzung des absoluten Mehraufwands.

⁵⁶³Vgl. Abschnitt 5.2.

⁵⁶⁴In der unteren Hälfte der Abbildung ist ersichtlich, dass in Zeile 4 die LP der Spalten 6-16 eine geringere Energiespannweite als die LP der Spalten 1-5 der gleichen Zeile aufweisen. Die Ursache hierfür ist in der Ausstattung des RBG mit einer Zwischenkreiskopplung zu suchen und wird in Abschnitt 5.3.4 erläutert.

⁵⁶⁵Simulationen des Autors haben ergeben, dass die Zuordnung schwerer LE zu LP mit einer geringen Energiespannweite zu geringeren mittleren Energiebedarfen als eine Zuordnung schwerer LE zu LP mit einem geringen mittleren Energiebedarf führt. Daher wird im Folgenden die Energiespannweite als Eignung der LP für heterogene LE-Massen verwendet.

⁵⁶⁶Vgl. Abschnitt 4.3.

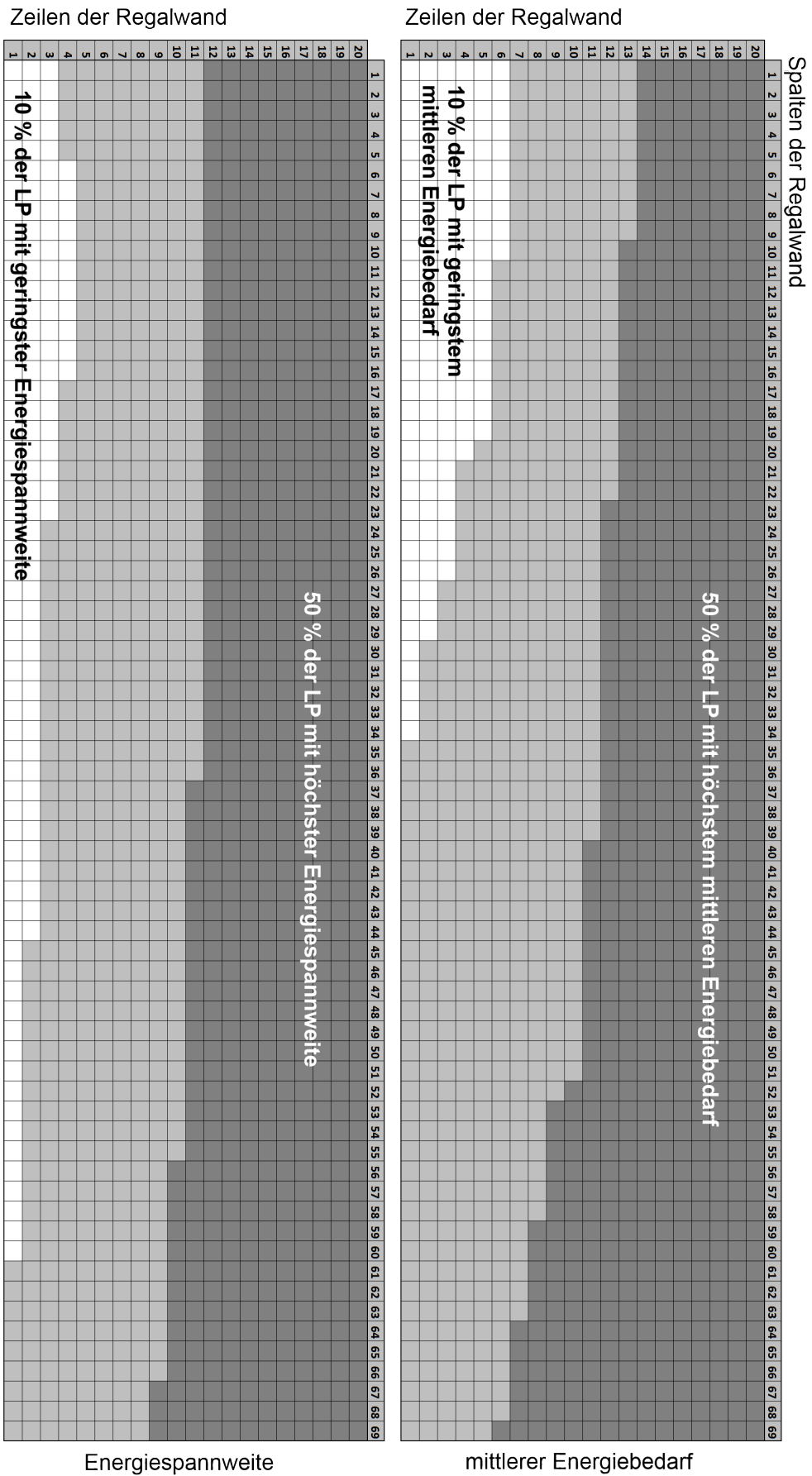


Abbildung 5.12: Mittlerer Energiebedarf vs. Energiespannweite der LP einer Regalwand (eigene Darstellung)

Algorithmus 7 Strategie Masseverteilung in der Regalwand (MVRW)

1. Bestimmung des Massequantils β der eingehenden LE nach Algorithmus 2
 2. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Soll-LP
 - (a) Sortiere die Menge $n_{LP,RW}$ nach absteigender Energiespannweite
 - (b) Index $LP_{Soll,optimal,Masse} = n_{LP,RW} \cdot \beta$ (gerundet)
 3. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Ist-LP
 - (a) Ermittle $Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}$
 - (b) Wähle den $LP_{Ist,optimal,Masse}$ aus der Menge $n_{LP,RW}$, der die $|Energiespannweite_{LP} - Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}|$ minimiert
-

der eingehenden LE energetische Vorteile zu generieren, ohne jedoch ansteigende Fahrzeiten in Kauf nehmen zu müssen.

5.3.2 Masseverteilung in der Regalwand (MVRW)

Im Folgenden wird die Strategie MVRW beschrieben und bewertet. Dahinter steht die Überlegung, aus der optimalen Masseverteilung innerhalb einer Regalwand energetische Vorteile zu ziehen. Die Strategie zielt darauf ab, schwere LE bevorzugt auf LP mit einer geringen Energiespannweite einzulagern, während leichte LE LP mit einer hohen Energiespannweite zugeordnet werden.⁵⁶⁷ Hierfür dient der Vergleich des Massequantils der LE mit dem Quantil der Energiespannweite der LP.⁵⁶⁸ Algorithmus 7 stellt den Ablauf der Strategie MVRW dar.

Nach Bestimmung des Massequantils β der eingehenden LE wird ein aus Massesicht optimaler LP gewählt. Hierfür werden die LP der Regalwand nach absteigender Energiespannweite sortiert. Anschließend wird aus der sortierten Liste derjenige LP ausgewählt, dessen Rang dem gerundeten Produkt aus dem Massequantil β und der Anzahl der LP der betrachteten Regalwand $n_{LP,RW}$ entspricht. Sollte der optimale LP ($LP_{Soll,optimal,Masse}$) belegt sein, so wird derjenige freie LP ($LP_{Ist,optimal,Masse}$) der Regalwand ausgewählt, dessen Energiespannweite zur Energiespannweite des optimalen LP den geringsten absoluten Abstand aufweist.

Die Simulationsergebnisse (siehe Tabelle 5.5) zeigen, dass bei Anwendung der Strategie MVRW im Vergleich zur Referenzstrategie DYN im Basisszenario ein Energiebedarf

⁵⁶⁷Die Energiespannweite stellt, wie in Abschnitt 5.3.1 erläutert, eine „energetische Strafe“ für die Ein- und Auslagerung einer schweren LE dar. Ein LP mit einer hohen Energiespannweite ist daher kaum für die Ein- und Auslagerung einer schweren LE geeignet

⁵⁶⁸Vgl. die Ausführungen zu Quantilen in Abschnitt 4.2.3.2.

Strategie	Fahrzeit	Energiebedarf
MVRW	63,8 s	135,2 Wh
Ein-Zonen zufallsbasiert (RND1)	63,8 s	143,8 Wh
Ein-Zonen <i>closest open location</i> (COL1)	57,0 s	126,9 Wh
Zwei-Zonen <i>closest open location</i> (COL2)	49,7 s	109,1 Wh
Energetische ABC-Zonierung (ENM3)	50,9 s	109,3 Wh
Dynamische Zonierung (DYN)	48,7 s	106,5 Wh

Tabelle 5.5: Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie MVRW im Basisszenario

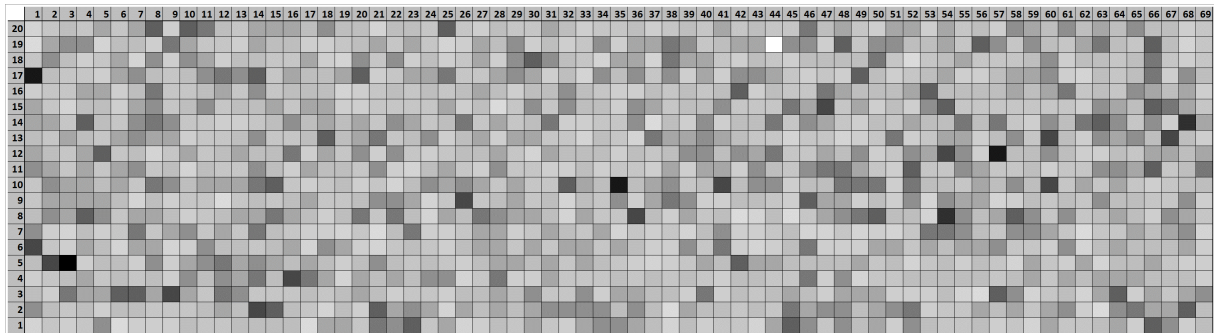


Abbildung 5.13: Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie MVRW (eigene Darstellung)

in Höhe von 135,2 Wh erzielt wird, was einer Erhöhung um 26,3 % entspricht. Die Strategie MVRW ist somit energieineffizienter als die Strategie DYN. Die Fahrzeit steigt im Vergleich zur Strategie DYN um 15,2 s, was einer Erhöhung um 31,2 % entspricht. Im Vergleich zur Strategie RND1 verbessert die Strategie MVRW die Energieeffizienz, was sich in Einsparungen in Höhe von 6,3 % des Energiebedarfs widerspiegelt. Die Strategien RND1 und MVRW nehmen beide keine Rücksicht auf die Verweildauer der LE oder auf die Fahrzeiten der LP. Bei beiden Strategien ist die durchschnittliche Verweildauer der LE in der Regalwand gleich, so dass alle LP mit einer gleichen Wahrscheinlichkeit angefahren werden. Hieraus resultiert, dass die Fahrzeiten bei beiden Strategien gleich sind. Gleichwohl führt die Strategie MVRW zu einem geringeren Energiebedarf als die Strategie RND1. Dies liegt darin begründet, dass die Strategie MVRW schwere LE bevorzugt auf LP mit geringer Energiespannweite zuordnet, was bei schweren LE bevorzugt LP in den unteren Zeilen der Regalwand sind. Zur Bestätigung dieser Vermutung werden die Zugriffshäufigkeit und die Masseverteilung der LP bei Anwendung der Strategie MVRW ausgewertet.

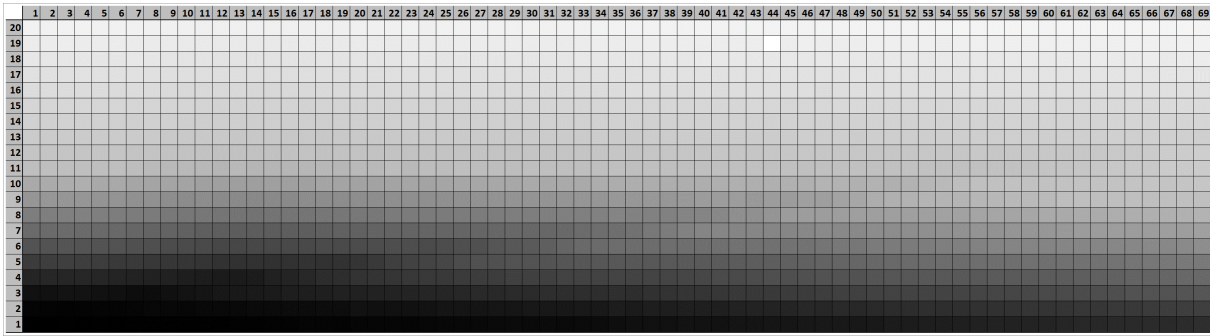


Abbildung 5.14: Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVRW (eigene Darstellung)

Abbildung 5.13 illustriert die Zugriffshäufigkeit, Abbildung 5.14 die Masseverteilung der einzelnen LP bei Anwendung der Strategie MVRW. Beide Darstellungen sind im Vergleich zu den Zugriffshäufigkeiten (siehe Abbildung 4.9) und der Masseverteilung (siehe Abbildung 5.11) bei Anwendung der Strategie RND1 zu sehen, da beide Strategien weder Rücksicht auf die Verweildauer der LE noch auf die Fahrzeiten der LP nehmen. Der Vergleich der Zugriffshäufigkeiten zeigt, dass bei der Strategie MVRW keine systematischen Unterschiede zwischen den LP der jeweiligen Zone identifiziert werden können. Demzufolge findet sich in Abbildung 5.13 kein systematisches Muster von LP mit hohen Zugriffszahlen (dunkle Markierungen) und selten angefahrenen LP (helle Markierungen). Im Gegensatz dazu findet sich in Abbildung 5.14 ein eindeutig beobachtbares Muster bei der Masseverteilung der eingelagerten LE in die LP der Regalwand: So werden in LP in unteren Zeilen im Mittel sehr schwere LE (dunkle Markierung) eingelagert, während in hohen Zeilen im Mittel nur sehr leichte LE (helle Markierung) eingelagert werden. Die Masseverteilung innerhalb der Regalwand korrespondiert dabei mit der Energiespannweite der LP (siehe Abbildung 5.12), da schwere LE vorzugsweise LP mit einer geringen Energiespannweite zugeordnet werden. Die Strategie MVRW kann somit energetische Vorteile aus der Massespannweite der eingehenden LE ziehen.

Dies gilt unabhängig vom untersuchten LFG, da auch bei hohem (135,2 Wh, Szenario #9) oder niedrigem LFG (135,1 Wh, Szenario #7) keine signifikanten Abweichungen der Fahrzeiten und Energiebedarfe bei Anwendung der Strategie MVRW gegenüber den Werten im Basisszenario auftreten. Eine niedrige Massespannweite (Szenario #5⁵⁶⁹) der eingehenden LE führt jedoch zu einem höheren Energiebedarf von 141,0 Wh⁵⁷⁰. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Strategie MVRW einzig darauf abzielt, aus einer hohen Massespannweite energetische Vorteile bei der LP-Zuordnung zu ziehen. Bei einer niedrigen Massespannweite kann somit dieser Hebel nur bedingt genutzt werden. Da die Verweildauer der LE nicht in die Auswahl eines freien LP einbezogen wird, kann die Stra-

⁵⁶⁹Vgl. Abschnitt 4.3.

⁵⁷⁰Der entsprechende Wert für eine mittlere Massespannweite (Szenario #5) beträgt 138,1 Wh.

Algorithmus 8 Strategie Masseverteilung in zwei Zonen (MVZ2)

1. Bestimmung des Verweildauerquantils α der eingehenden LE nach Algorithmus 1
 2. Bestimmung des Massequantils β der eingehenden LE nach Algorithmus 2
 3. Zuordnung zu einer optimalen Soll-Zone anhand des Verweildauerquantils α
 4. Bestimmung der Anzahl an LP in der optimalen Soll-Zone aus Verweildauersicht $n_{LP,Zone}$
 5. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Soll-LP
 - (a) Sortiere die Menge $n_{LP,Zone}$ nach absteigender Energiespannweite
 - (b) Index $LP_{Soll,optimal,Masse} = n_{LP,Zone} \cdot \beta$ (gerundet)
 6. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Ist-LP
 - (a) Ermittle $Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}$
 - (b) Auswahl des $LP_{Ist,optimal,Masse}$ aus der Menge $n_{LP,Zone}$, der die Funktion $|Energiespannweite_{LP} - Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}|$ minimiert
-

ategie keine Vorteile aus dem häufigeren Anfahren fahrzeit- oder energieminimaler⁵⁷¹ LP ziehen. Somit bleibt die Fahrzeit und der Energiebedarf der Strategie MVRW deutlich hinter den Werten entsprechender Strategien, wie COL2 oder DYN, zurück.

5.3.3 Masseverteilung in zwei Zonen (MVZ2)

Hierbei handelt es sich um eine Adaption der Strategie MVRW⁵⁷², wobei nun die Regalwand in zwei durch ihre Fahrzeit definierte Zonen eingeteilt wird (MVZ2).⁵⁷³ Es wird also angestrebt, dass sowohl in der Schnellläuferzone als auch in der Langsamläuferzone eine optimale Masseverteilung vorliegt, d. h. in beiden Zonen sollen schwere LE bevorzugt auf LP mit einer geringen Energiespannweite eingelagert werden.⁵⁷⁴ Darüber hinaus soll durch die Zonierung eine geringe Fahrzeit erzielt werden.

Algorithmus 8 stellt den Ablauf der Strategie MVZ2 dar: Nach Bestimmung des Verweildauerquantils und des Massequantils⁵⁷⁵ wird für die LE eine optimale Soll-Zone bestimmt. Sollte in der Soll-Zone kein LP mehr frei sein, so erfolgt eine Zuordnung zur

⁵⁷¹Vgl. die in Abschnitt 5.2 dargestellten Zusammenhänge zwischen der Fahrzeit und dem Energiebedarf der LP einer Regalwand.

⁵⁷²Strategie Masseverteilung in der Regalwand. Vgl. Abschnitt 5.3.2.

⁵⁷³Analog dazu könnte die Strategie MVRW auch als MVZ1 bezeichnet werden.

⁵⁷⁴Vgl. die detailliertere Erläuterung in Abschnitt 5.3.2.

⁵⁷⁵Vgl. Abschnitt 4.2.3.2.

Strategie	Fahrzeit	Energiebedarf
MVZ2	53,5 s	112,3 Wh
Ein-Zonen zufallsbasiert (RND1)	63,8 s	143,8 Wh
Ein-Zonen <i>closest open location</i> (COL1)	57,0 s	126,9 Wh
Zwei-Zonen <i>closest open location</i> (COL2)	49,7 s	109,1 Wh
Energetische ABC-Zonierung (ENM3)	50,9 s	109,3 Wh
Dynamische Zonierung (DYN)	48,7 s	106,5 Wh

Tabelle 5.6: Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie MVZ2 im Basisszenario

jeweils anderen Zone (geteilte Zonen⁵⁷⁶). Innerhalb der optimalen Soll-Zone werden die LP ($n_{LP,Zone}$) nach absteigender Energiespannweite sortiert und es wird anhand des Massequantils der Index des aus Massesicht optimalen Soll-LP ($LP_{Soll,optimal,Masse}$) bestimmt. Sollte dieser LP belegt sein, wird derjenige freie LP der optimalen Soll-Zone ausgewählt, dessen Energiespannweite zu der des aus Massesicht optimalen Soll-LP die geringste absolute Abweichung aufweist ($LP_{Ist,optimal,Masse}$).

Die Simulationsergebnisse (siehe Tabelle 5.6) zeigen im Basisszenario, dass bei Anwendung der Strategie MVZ2 im Vergleich zur Referenzstrategie DYN ein Energiemehrbedarf in Höhe von 5,8 Wh besteht, was einer Erhöhung um 5,4 % entspricht. Die Strategie MVZ2 ist somit energieineffizienter als die Strategie DYN. Die mittlere Fahrzeit steigt im Vergleich zur Strategie DYN um 4,8 s, was einer Erhöhung um 9,9 % entspricht. Im Vergleich zur Strategie RND1 verbessert die Strategie MVZ2 sowohl die Energieeffizienz als auch den Umschlag deutlich, was sich in Einsparungen in Höhe von 21,9 % der Fahrenergie sowie 16,2 % der Fahrzeit widerspiegelt. Der Vergleich mit der Strategie COL2 offenbart, dass die Strategie MVZ2 sowohl zu einer höheren Fahrzeit (+ 7,6 %) als auch zu einem höheren Energiebedarf (+ 2,9 %) führt. Zunächst verwundern die beiden gestiegenen Werte: Da beide Strategien eine gleiche Lage der beiden Zonen innerhalb der Regalwand aufweisen, sollten sich keine Erhöhungen der Fahrzeit ergeben. Da die Strategie MVZ2 zudem auf eine optimale Masseverteilung innerhalb der beiden Zonen abzielt, werden energetische Vorteile gegenüber der Strategie COL2 erwartet. Zur Aufklärung dieses Sachverhalts werden die Zugriffshäufigkeit und die Masseverteilung der LP bei Anwendung der Strategie MVZ2 ausgewertet.

Abbildung 5.15 illustriert die Zugriffshäufigkeit, Abbildung 5.17 die Masseverteilung der einzelnen LP bei Anwendung der Strategie MVZ2 im Basisszenario. Beide Darstel-

⁵⁷⁶Vgl. Abschnitt 3.3.5.2.3.

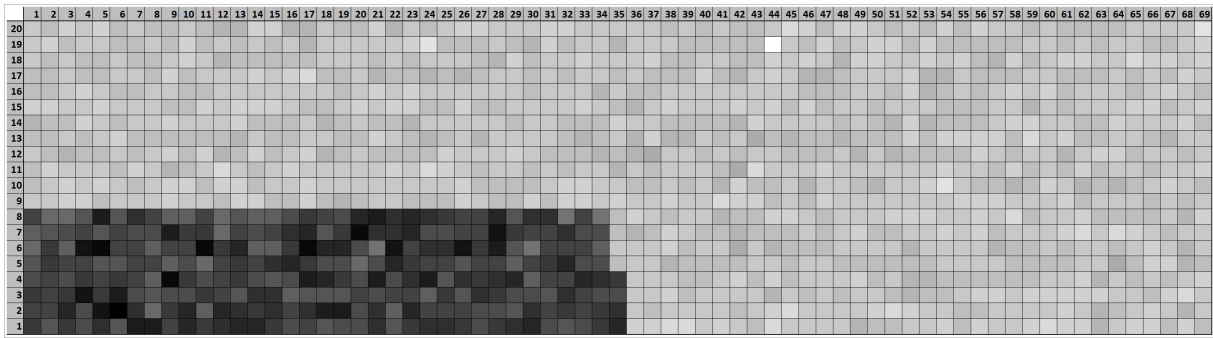


Abbildung 5.15: Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie MVZ2 (eigene Darstellung)

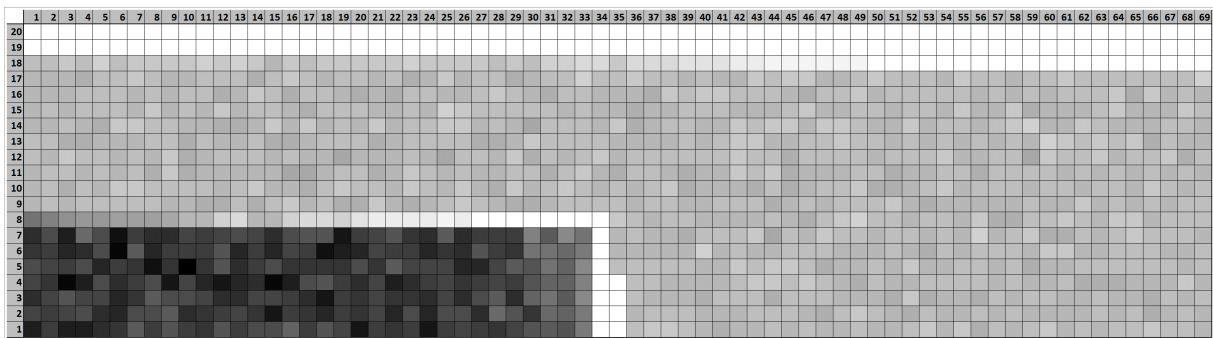


Abbildung 5.16: Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie COL2 (eigene Darstellung)

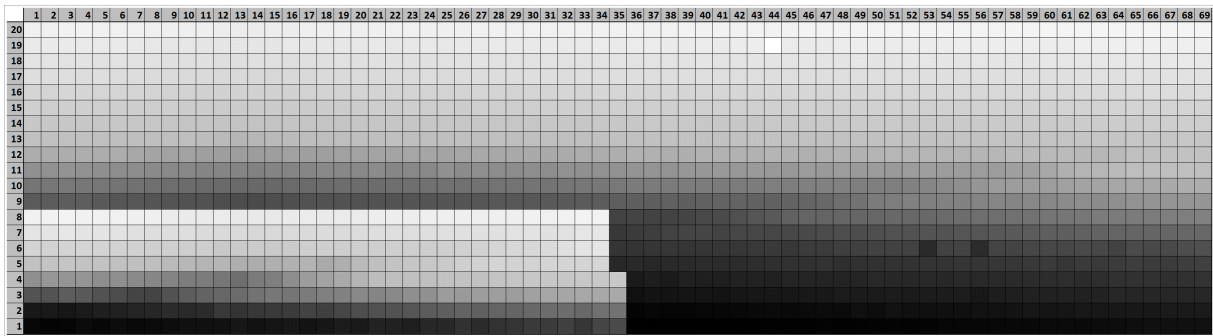


Abbildung 5.17: Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVZ2 (eigene Darstellung)

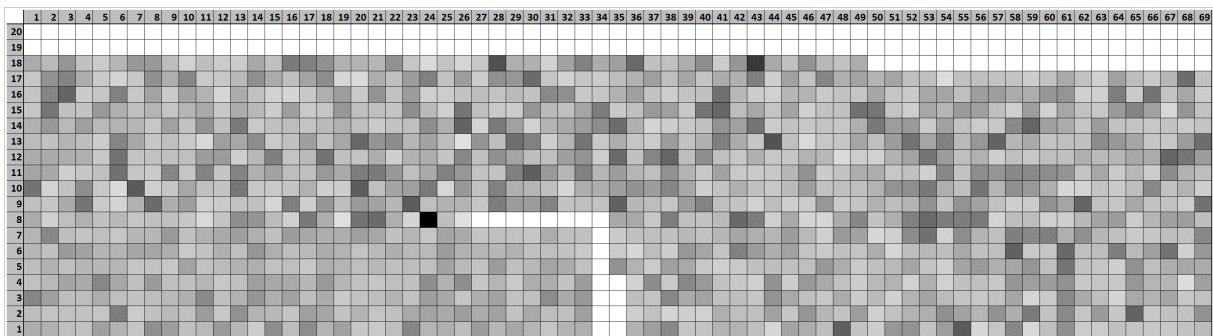


Abbildung 5.18: Masseverteilung bei Anwendung der Strategie COL2 (eigene Darstellung)

lungen sind im Vergleich zu den Zugriffshäufigkeiten (Abbildung 5.16) und der Masseverteilung (Abbildung 5.18) bei Anwendung der Strategie COL2 zu sehen. Der Vergleich der Zugriffshäufigkeiten zeigt, dass bei der Strategie MVZ2 kein systematischer Unterschied zwischen den LP der jeweiligen Zone identifiziert werden kann. Im Gegensatz dazu werden durch die Strategie COL2 langsame LP beider Zonen nicht genutzt, da eingehende LE immer dem fahrzeitminimalen freien LP der Zielzone zugeordnet werden (siehe weiße LP der Regalwand). Da an der untersuchten Regalwand langsame LP häufig in oberen Zeilen auftreten, sind diese meist mit einem hohen mittleren Energiebedarf verbunden. Die Strategie COL2 kann somit energetische Vorteile aus der Nichtnutzung langsamer und gleichzeitig energiebedürftiger LP ziehen. Da die Strategie MVZ2 auch bei einem $LFG < 1$ freie LP der Zielzone unabhängig von ihrer Fahrzeit betrachtet, werden auch langsame und energieintensive LP bei der Bestimmung eines aus Massesicht optimalen LP für die eingehende LE berücksichtigt. Dies führt zu einer steigenden Fahrzeit im Vergleich zur Strategie COL2. Wie Abbildung 5.17 zeigt, werden bei Anwendung der Strategie MVZ2 schwere LE bevorzugt in unteren Zeilen der beiden Zonen eingelagert, während bei Anwendung der Strategie COL2 (Abbildung 5.18) die Masseverteilung keinem erkennbaren Muster folgt. Die hieraus erwarteten energetischen Vorteile für die Strategie MVZ2 werden jedoch durch das im Vergleich zur Strategie COL2 häufigere Anfahren langsamer, energieintensiver LP mehr als ausgeglichen, wodurch sich der gestiegene Energiebedarf erklären lässt. Weder Fahrzeit noch Energiebedarf der Strategie MVZ2 weisen eine Abhängigkeit vom LFG auf und zeigen weder bei niedrigem (Szenario #7) noch bei hohem LFG (Szenario #9) eine signifikante Abweichung zum Basisszenario auf. Einzig eine sinkende Massespannweite⁵⁷⁷ führt zu steigenden Energiebedarfen: So liegt der Wert bei einer mittleren Massespannweite (Szenario #5) bei 114,7 Wh und bei niedriger Massespannweite bei 116,7 Wh. Analog zur Strategie MVRW versucht auch die Strategie MVZ2 energetische Vorteile aus einer hohen Massespannweite zu ziehen, was v. a. bei einer sinkenden Massespannweite immer weniger gelingt.⁵⁷⁸

5.3.4 Masseverteilung in der Isochrone (MVI)

Die Strategie MVI stellt eine Verfeinerung der Strategie MVZ2⁵⁷⁹ dar und zielt auf eine optimale Masseverteilung innerhalb einer jeden Isochrone ab, um im Falle heterogener Massen der eingehenden LE den Energiebedarf von Ein- und Auslagerungen zu reduzieren.

Die Strategie ist in Algorithmus 9 erläutert. Zunächst werden für eine eingehende LE im ersten Schritt das Verweildauerquantil α und im zweiten Schritt das Massequan-

⁵⁷⁷Vgl. Abschnitt 4.3.

⁵⁷⁸Als Analogieschluss zum Vergleich der Strategien MVRW und RND1 in Abschnitt 5.3.2 ist anzunehmen, dass die Strategie MVZ2 gegenüber einer Zwei-Zonen-Strategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zonen (RND2) zu einem sinkenden Energiebedarf bei gleichbleibender Fahrzeit führt.

⁵⁷⁹Strategie Masseverteilung in zwei Zonen. Vgl. Abschnitt 5.3.3.

Algorithmus 9 Strategie Masseverteilung in der Isochrone (MVI)

1. Bestimmung des Verweildauerquantils α der eingehenden LE nach Algorithmus 1
 2. Bestimmung des Massequantils β der eingehenden LE nach Algorithmus 2
 3. Bestimmung des aus Verweildauersicht optimalen Soll-LP $LP_{Soll,optimal,VW}$
 - (a) Sortiere alle LP der Regalwand $n_{LP,RW}$ nach aufsteigender Fahrzeit
 - (b) Ermittle Index $LP_{Soll,optimal,VW} = n_{LP,RW} \cdot \alpha$ (gerundet)
 4. Ermittlung der zeitlich kompatiblen LP der Isochrone
 - (a) Bestimme $t_{UP,LP_{Soll,VW,real}}$
 - (b) Bestimme die Menge $n_{LP,Iso}$ der LP mit $t_{UP,LP_i} = t_{UP,LP_{Soll,VW,real}}$
 5. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Soll-LP
 - (a) Sortiere die Menge $n_{LP,Iso}$ nach absteigender Energiespannweite
 - (b) Index $LP_{Soll,optimal,Masse} = n_{LP,Iso} \cdot \beta$ (gerundet)
 6. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Ist-LP
 - (a) Ermittle $Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}$
 - (b) Auswahl des $LP_{Ist,optimal,Masse}$ aus der Menge $n_{LP,Iso}$, der die Funktion $|Energiespannweite_{LP} - Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}|$ minimiert
-

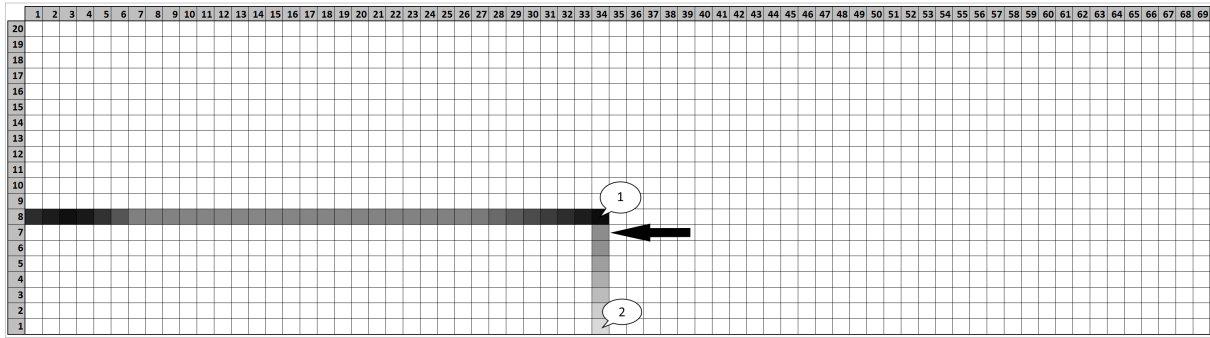


Abbildung 5.19: Auswahl des aus Massesicht realen Soll-LP der aus Verweildauersicht optimalen Isochrone bei Anwendung der Strategie MVI (eigene Darstellung)

til β bestimmt. Anschließend wird im dritten Schritt für die LE aus den freien LP der Regalwand ein aus Verweildauersicht geeigneter LP $LP_{Soll,optimal,VW}$ bestimmt. Im vierten Schritt werden alle LP mit gleicher Fahrzeit wie der geeignete LP, d. h. alle LP der Isochrone ($n_{LP,Iso}$), markiert. Nun wird innerhalb der Isochrone ein aus Massesicht optimaler LP gewählt. Hierzu werden im fünften Schritt die LP der Ziel-Isochrone nach absteigender Energiespannweite sortiert, so dass LP mit einer hohen Energiespannweite in der entsprechenden Tabelle oben angeordnet sind. Auf Basis des Massequantils der eingehenden LE wird aus der sortierten Tabelle der LP ein optimaler LP ($LP_{Soll,optimal,Masse}$) ausgewählt.⁵⁸⁰ Hierfür wird das Massequantil β mit der Anzahl der LP der Ziel-Isochrone $n_{LP,Iso}$ multipliziert (siehe Formel 5.13).

$$LP_{Soll,optimal,Masse} = n_{LP,Iso} \cdot \beta \quad (5.13)$$

Das Ergebnis ist der Index desjenigen LP der nach absteigender Energiespannweite sortierten LP der Ziel-Isochrone, der für die eingehende LE-Masse optimal ist. Einer leichten LE, d. h. einer LE mit einem geringen Massequantil, wird somit ein LP mit einer hohen Energiespannweite zugeordnet. Sollte der gewünschte LP nicht frei sein, so wird im sechsten Schritt der Nachbarplatz innerhalb der Isochrone gewählt, dessen Energiespannweite der des optimalen LP am nächsten liegt ($LP_{Ist,optimal,Masse}$).

Die in Abbildung 5.19 hervorgehobene Isochrone mit $n_{LP,Iso} = (33 + 7) = 41$ LP dient zur Illustration dieser Regel. Dabei sind die LP der Isochrone je nach ihrer Energiespannweite farblich markiert, so dass ein dunkel markierter LP über eine hohe Energiespannweite verfügt. Ziel ist es nun, für eine eingehende LE einen aus Massesicht optimalen LP auszuwählen. Hierfür werden die LP der Isochrone anhand ihrer Energiespannweite, d. h.

⁵⁸⁰Sollte in einem Anwendungsszenario eine Abhängigkeit zwischen der Verweildauer- und der Masseverteilung der LE bestehen, so dass beispielsweise LE mit einer kurzen Verweildauer häufig hohe Massen aufweisen, kann die Bestimmung des Massequantils modifiziert werden, um diesem Umstand zu begegnen. So ist denkbar, das Massequantil einer eingehenden LE nicht im Vergleich zu allen LE der Regalwand, sondern nur zu denen der Ziel-Isochrone zu bestimmen. Somit würde das Massequantil nur im Vergleich zu den LE mit (nahezu) gleicher Verweildauer gelten.

Zeile	Spalte	Energiespannweite		Zeile	Spalte	Energiespannweite	Rang
1	34	8,4 Wh		8	34	36,9 Wh	1
2	34	12,4 Wh		8	3	36,9 Wh	2
3	34	17,6 Wh		8	4	36,8 Wh	3
...
7	34	32,3 Wh		8	13	34,5 Wh	33
8	1	36,7 Wh	→ Sortierung →	8	14	34,4 Wh	34
8	2	36,8 Wh		*7	*34	*32,3 Wh	*35
8	3	36,9 Wh		6	34	31,4 Wh	36
8	4	36,8 Wh		5	34	26,8 Wh	37
...		4	34	22,2 Wh	38
8	32	36,6 Wh		3	34	17,6 Wh	39
8	33	36,8 Wh		2	34	12,4 Wh	40
8	34	36,9 Wh		1	34	8,4 Wh	41

Abbildung 5.20: Sortieren der LP der Isochrone nach absteigender Energiespannweite

anhand der „energetischen Strafe“ für das Einlagern einer schweren LE, in eine absteigende Rangfolge gebracht. Diese Sortierung ist in Abbildung 5.20 dargestellt: In der linken Hälfte der Abbildung 5.20 sind die 41 LP der Isochrone mit ihren Koordinaten (Zeile und Spalte) und ihrer Energiespannweite aufgelistet. In der rechten Hälfte der Abbildung wurden diese LP nun nach absteigender Energiespannweite sortiert. Folglich ist der erste LP dieser Rangliste der LP mit der höchsten Energiespannweite. Im vorliegenden Fall handelt es sich dabei um den LP in Zeile 8 und Spalte 34 der Regalwand (in Abbildung 5.19 durch eine sehr dunkle Markierung und die Zahl 1 hervorgehoben). Aus energetischer Sicht ist es sinnvoll, in diesen LP eine leichte LE einzulagern, da die Einlagerung einer schweren LE hier eine hohe „energetischen Strafe“ nach sich ziehen würde. Der letzte LP der Rangliste ist derjenige mit der geringsten Energiespannweite. Im vorliegenden Fall handelt es sich dabei um den LP in Zeile 1 und Spalte 34 der Regalwand (in Abbildung 5.19 durch eine sehr helle Markierung und die Zahl 2 hervorgehoben). Dieser letzte LP ist sehr gut für schwere LE geeignet, da eine schwere LE nur eine sehr geringe „energetische Strafe“ verursacht. Gilt es nun, für eine eingehende LE mit einem Massequantil von z. B. $\beta = 0,86$ aus den LP der Isochrone einen aus Massesicht optimalen LP auszuwählen, so ist gemäß Formel 5.13 $LP_{Soll,optimal,Masse} = 0,86 \times 41 = 35,26$, gerundet 35. Dies bedeutet, dass der 35. LP der nach absteigender Energiespannweite sortierten Tabelle (siehe rechte Seite der Abbildung 5.20) der aus Massesicht optimale LP ist. Dies ist der LP in Zeile 7 und Spalte 34 (siehe Pfeil in Abbildung 5.19 sowie „*-Markierung in Abbildung 5.20). Sollte dieser LP belegt sein, so wird - wie oben beschrieben - der Nachbarplatz innerhalb der Isochrone gewählt, dessen Energiespannweite der des optimalen LP am nächsten liegt ($LP_{Soll,real,Masse}$).

Strategie	Fahrzeit	Energiebedarf
MVI	48,8 s	105,3 Wh
Ein-Zonen zufallsbasiert (RND1)	63,8 s	143,8 Wh
Ein-Zonen <i>closest open location</i> (COL1)	57,0 s	126,9 Wh
Zwei-Zonen <i>closest open location</i> (COL2)	49,7 s	109,1 Wh
Energetische ABC-Zonierung (ENM3)	50,9 s	109,3 Wh
Dynamische Zonierung (DYN)	48,7 s	106,5 Wh

Tabelle 5.7: Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie MVI im Basisszenario

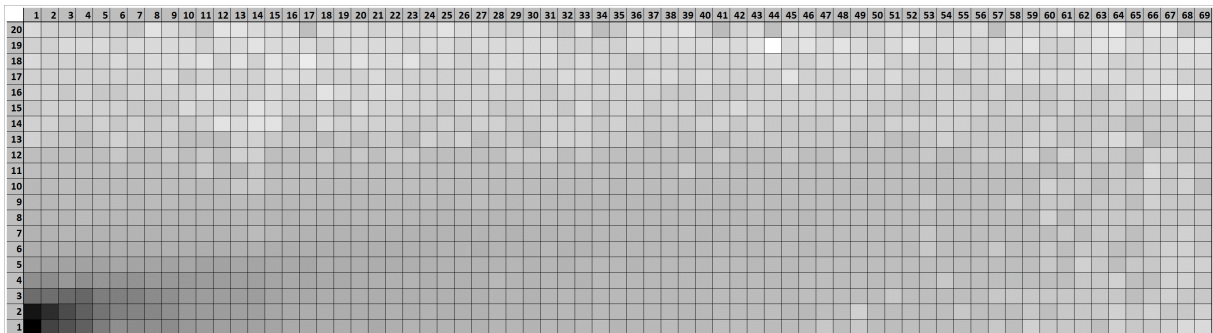


Abbildung 5.21: Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie MVI (eigene Darstellung)

Die Simulationsergebnisse (siehe Tabelle 5.7) zeigen im Basisszenario, dass bei Anwendung der Strategie MVI im Vergleich zur Referenzstrategie DYN eine Energieeinsparung in Höhe von 1,2 Wh erzielt werden kann, was einer Reduktion um 1,1 % entspricht. Die Strategie MVI ist somit energieeffizienter als die Strategie DYN, erreicht aber ebenso wie die Strategie EMI⁵⁸¹ nicht die Einsparungen der Strategie E-DYN⁵⁸². Die Fahrzeit steigt im Vergleich zur Strategie DYN geringfügig um 0,1 s, was einer Erhöhung um 0,2 % entspricht. Im Vergleich zur Strategie RND1 verbessert die Strategie MVI sowohl die Energieeffizienz als auch den Umschlag deutlich, was sich in Einsparungen in Höhe von 26,8 % des Energiebedarfs sowie 23,5 % der Fahrzeit widerspiegelt.

Abbildung 5.21 illustriert die Zugriffshäufigkeit der einzelnen LP bei Anwendung der Strategie MVI. Dabei zeigt sich, dass die Strategie MVI wie beabsichtigt zu einem erhöhten Zugriff auf LP mit einer geringen Fahrzeit führt, während LP mit einer hohen Fahrzeit nur selten für Einlagerungen genutzt werden. Abbildung 5.22 illustriert die Masseverteilung in der Regalwand bei Anwendung der Strategie MVI. Ein dunkel eingefärbter LP

⁵⁸¹Vgl. Abschnitt 5.2.4.

⁵⁸²Vgl. Abschnitt 5.2.3

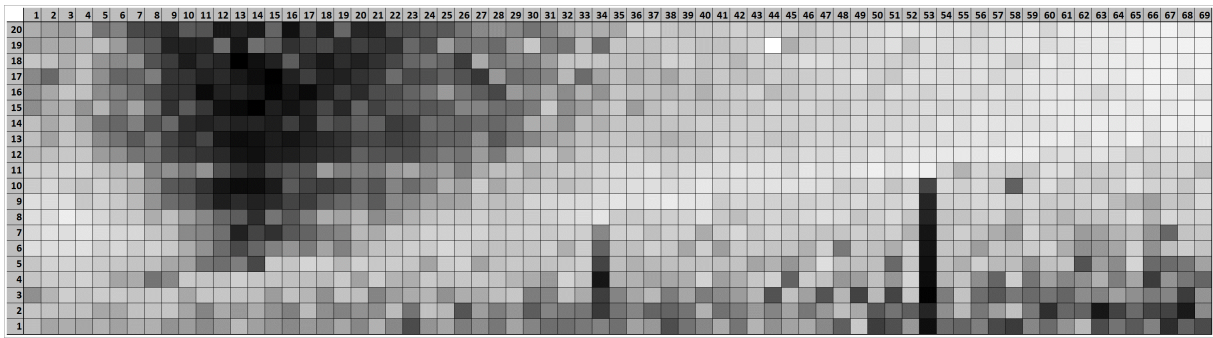


Abbildung 5.22: Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVI (eigene Darstellung)

wurde im Simulationslauf im Durchschnitt mit einer hohen LE-Masse belegt, während in hell markierte LP im Mittel nur leichte LE eingelagert wurden. Dabei zeigt sich, dass sich LP mit hoher mittlerer LE-Masse vor allem in zwei Bereichen der Regalwand befinden: Der erste Bereich liegt etwa im Bereich der Spalten 9-23 und den Zeilen 9-20, während sich der zweite Bereich in den unteren Zeilen aller Spalten befindet. Hierbei ist festzustellen, dass die erste Zone vor allem aus hubzeitkritischen Isochronen⁵⁸³ besteht, bei denen die Strategie MVI versucht, LE gemäß ihrer Masse in den horizontal verlaufenden Isochronen zu verteilen. Auf den ersten Blick verwundert es, dass dabei die höchsten Durchschnittsmassen nicht in den vordersten Spalten, sondern erst etwa ab der neunten Spalte auftreten. Dies lässt sich durch die Ausrüstung des RBG mit einer Zwischenkreiskopplung erklären, bei der ein Leistungsausgleich zwischen dem Fahr- und Hubantrieb stattfindet, falls einer der beiden Antriebe im Generatormodus arbeitet.⁵⁸⁴ Wird beispielsweise vom ÜP aus der LP in Spalte 1 und Zeile 20 angefahren, so kann die Hubbewegung nicht von bereitgestellter Bremsenergie des Fahrtriebs profitieren und die Senkbewegung keine Energie zur horizontalen Bewegung des RBG liefern. Bei Anfahrt des LP in Spalte 12 und Zeile 20 sind jedoch diese beiden Energieausgleiche möglich, was zu einer höheren Energiespannweite dieses LP führt. Daher werden bei Anwendung der Strategie MVI schwere LE eher diesem LP zugeordnet. Die dunkel markierten LP der zweiten Zone liegen in fahrzeitkritischen Isochronen, d. h. schwere LE werden in diesen vertikal verlaufenden Isochronen bevorzugt LP in den untersten Zeilen zugeordnet. Ein vertikaler Versatz der LP mit den höchsten Durchschnittsmassen, ähnlich wie in Zone 1, ist jedoch nicht erkennbar. Eine Besonderheit in dem Bereich ist die Zeile 11, die zusammen mit der Spalte 53 eine „übers Eck“ laufende Isochrone mit einer Fahrzeit von ca. 28,6 s bildet: Somit stehen für die Masseverteilung sowohl die horizontalen als auch die vertikalen LP der Isochrone zur Verfügung. Dies führt dazu, dass in dieser Isochrone die LP mit der höchsten Durchschnittsmasse in den Zeilen 1-10 der Spalte 53 zu finden sind, während in der Zeile 11 geringere durchschnittliche LE-Massen eingelagert werden. Ähnliches gilt auch für eine weitere, „übers Eck“ verlaufende

⁵⁸³Vgl. die Ausführungen zur Fahrzeitbestimmung in Abschnitt 3.2.

⁵⁸⁴Vgl. Abschnitt 3.3.3.

Isochrone, die aus der Spalte 34 und der Zeile 8 gebildet wird.

Ähnlich wie bei den Strategien MVRW und MVZ2 sind die Fahrzeit und der Energiebedarf der Strategie MVI nur geringfügig vom LFG abhängig. So resultiert ein hoher LFG in einem Energiebedarf von 105,6 Wh und in einer Fahrzeit von 48,9s, während ein niedriger LFG zu einem Energiebedarf von 105,2 Wh und einer Fahrzeit von 48,7s führt. Offensichtlich gelingt es der Strategie bei einem niedrigen LFG etwas besser, einen aus Massesicht optimalen LP für die eingehende LE zu nutzen, da die mittlere Verfügbarkeit der LP bei sinkendem LFG steigt.⁵⁸⁵ Hinsichtlich der Massespannweite⁵⁸⁶ lässt sich jedoch ein Zusammenhang erkennen: So führt eine mittlere Massespannweite zu einem Energiebedarf von 106,0 Wh, während eine niedrige Massespannweite einen Energiebedarf von 106,2 Wh mit sich bringt.⁵⁸⁷ Auch wenn selbst dieser Wert unter dem der Referenzstrategie DYN liegt, zeigt sich auch hier, analog zu den Strategien MVRW und MVZ2, die Abhängigkeit der erzielbaren Energieeinsparungen von der dazu nutzbaren Massespannweite der eingehenden LE.

5.3.5 MVI mit aktuellem Lagerfüllgrad (MVI+)

Eine Erweiterung der Strategie MVI⁵⁸⁸ ergibt sich, wenn der aktuelle LFG in die Ermittlung eines aus Massesicht optimalen LP einbezogen wird. Hierfür wird in Schritt 5 des Algorithmus 9 der optimale LP der aus Verweildauersicht optimalen Isochrone nicht mehr nur auf Basis des Massequantils β der eingehenden LE bestimmt. Statt dessen wird der Algorithmus dahingehend erweitert, dass die LP der Isochrone, die die größten Energiespannweiten aufweisen, nicht in die Bestimmung des aus Massesicht optimalen LP einbezogen werden.⁵⁸⁹ Dabei beschreibt der erste Summand den Anteil der LP von $n_{LP,Iso}$, der bei der LP-Zuordnung möglichst ausgelassen wird (diejenigen LP mit einer hohen Energiespannweite) und der zweite Summand die LP-Zuordnung innerhalb der Restmenge von $n_{LP,Iso}$:

$$\begin{aligned} LP_{Soll,optimal,Masse} &= (1 - LFG) \cdot n_{LP,Iso} + \beta \cdot LFG \cdot n_{LP,Iso} = \\ &= (1 - LFG + \beta \cdot LFG) \cdot n_{LP,Iso} \quad (5.14) \end{aligned}$$

⁵⁸⁵Vgl. Abschnitt 5.3.8.

⁵⁸⁶Vgl. Abschnitt 4.3.

⁵⁸⁷Die Fahrzeiten in beiden Fällen betragen weiterhin 48,8s.

⁵⁸⁸Strategie Masseverteilung in der Isochrone. Vgl. Abschnitt 5.3.4.

⁵⁸⁹Aus logischer Sicht sollten nicht LP mit einer hohen Energiespannweite, sondern mit einem hohen mittleren Energiebedarf bei einem $LFG < 1$ frei bleiben. Dies führt jedoch zu einer komplexeren Entscheidungssituation, die einen aufwändigeren Algorithmus erfordert. Da die Rangfolgeunterschiede der LP hinsichtlich mittlerem Energiebedarf und Energiespannweite jedoch gering sind (siehe Abbildung 5.12) und somit nur geringe Effekte der alternativen Vorgehensweise zu erwarten sind, werden in der Strategie MVI+ LP mit einer hohen Energiespannweite frei gelassen.

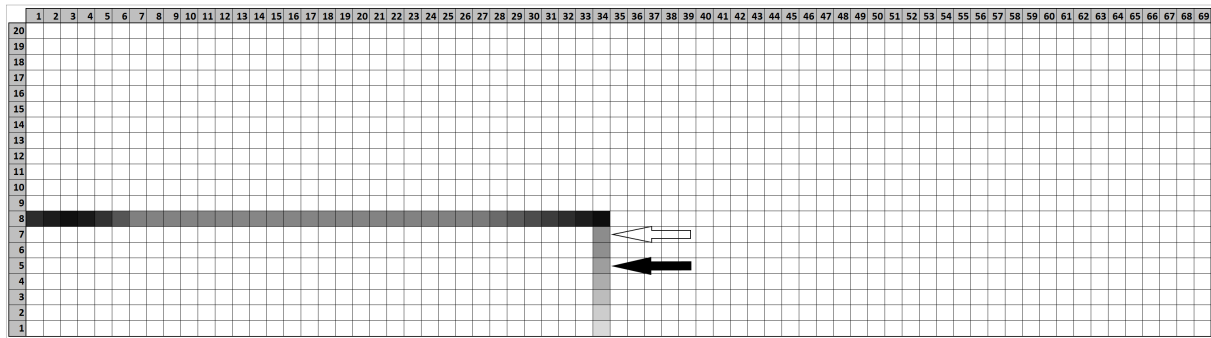


Abbildung 5.23: Auswahl des aus Massesicht realen Soll-LP der aus Verweildauersicht optimalen Isochrone bei Anwendung der Strategie MVI+ (eigene Darstellung)

Die in Abbildung 5.23 dargestellte Isochrone dient zur Illustration dieser Regel. Bei einem LFG von 78 %, einem Massequantil $\beta = 0,86$ und $n_{LP,Iso} = 41$ liegt der optimale LP bei Anwendung der Strategie MVI+ nun an der Position $LP_{Soll,optimal,Masse} = (1 - 0,78 + 0,86 \times 0,78) \times 41 = 36,52$, gerundet 37 (MVI: 35⁵⁹⁰). Dies bedeutet, dass aus der nach absteigender Energiespannweite sortierten Rangliste der LP der Ziel-Isochrone (siehe Abbildung 5.20) nun der 37. LP für die LE aus Massesicht optimal ist. Dabei handelt es sich um den LP in Zeile 5 und Spalte 34 der Regalwand (siehe dunkle Pfeilmarkierung in Abbildung 5.20). Die LE wird somit im Vergleich zur Strategie MVI in einen LP mit einer niedrigeren Energiespannweite eingelagert, der sich in einer niedrigeren Zeile (5 statt 7) der Spalte 34 befindet. Zum besseren Vergleich ist der nach Strategie MVI optimale LP in Abbildung 5.23 mit einem hellen Pfeil markiert. Die Strategie MVI+ ist in Algorithmus 10 in ihrem Ablauf beschrieben.

Die Simulationsergebnisse (siehe Tabelle 5.8) zeigen im Basisszenario, dass bei Anwendung der Strategie MVI+ im Vergleich zur Referenzstrategie DYN eine mittlere Energieeinsparung in Höhe von 1,5 Wh erzielt wird, was einer Reduktion um 1,5 % entspricht. Die Strategie MVI+ ist somit energieeffizienter als die Strategie DYN, erzielt jedoch nicht die Einsparungen der Strategie E-DYN⁵⁹¹. Die Fahrzeit steigt gegenüber der Strategie DYN um 0,2 s, was einer Erhöhung um 0,5 % entspricht. Im Vergleich zur Strategie RND1 verbessert die Strategie MVI+ sowohl die Energieeffizienz als auch den Umschlag deutlich, was sich in Einsparungen in Höhe von 27,0 % des Energiebedarfs sowie 23,4 % der Fahrzeit widerspiegelt.

Abbildung 5.24 illustriert die Zugriffshäufigkeit auf die LP bei Anwendung der Strategie MVI+ im Basisszenario. Dabei zeigt sich, dass die Strategie MVI+ zu einem erhöhten Zugriff auf LP mit einer geringen Fahrzeit führt, während LP mit einer hohen Fahrzeit nur selten für Einlagerungen genutzt werden. Von besonderer Bedeutung sind die sehr geringen Werte, z. B. vier Zugriffe in Zeile 10 und Spalte 46. Hierbei handelt es sich um

⁵⁹⁰Vgl. Abschnitt 5.3.4.

⁵⁹¹Vgl. Abschnitt 5.2.3.

Algorithmus 10 Strategie Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem Lagerfüllgrad (MVI+)

1. Bestimmung des Verweildauerquantils α der eingehenden LE nach Algorithmus 1
 2. Bestimmung des Massequantils β der eingehenden LE nach Algorithmus 2
 3. Bestimmung des aus Verweildauersicht optimalen Soll-LP $LP_{Soll,optimal,VW}$
 - (a) Sortiere alle LP der Regalwand $n_{LP,RW}$ nach aufsteigender Fahrzeit
 - (b) Ermittle Index $LP_{Soll,optimal,VW} = n_{LP,RW} \cdot \alpha$ (gerundet)
 4. Ermittlung der zeitlich kompatiblen LP der Isochrone
 - (a) Bestimme $t_{UP,LP_{Soll,VW,real}}$
 - (b) Bestimme die Menge $n_{LP,Iso}$ der LP mit $t_{UP,LP_i} = t_{UP,LP_{Soll,VW,real}}$
 5. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Soll-LP
 - (a) Sortiere die Menge $n_{LP,Iso}$ nach absteigender Energiespannweite
 - (b) Index $LP_{Soll,optimal,Masse} = (1 - LFG + \beta \cdot LFG) \cdot n_{LP,Iso}$ (gerundet)
 6. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Ist-LP
 - (a) Ermittle $Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}$
 - (b) Auswahl des $LP_{Ist,optimal,Masse}$ aus der Menge $n_{LP,Iso}$, der die Funktion $|Energiespannweite_{LP} - Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}|$ minimiert
-

Strategie	Fahrzeit	Energiebedarf
MVI+	48,9 s	105,0 Wh
MVI	48,8 s	105,3 Wh
Ein-Zonen zufallsbasiert (RND1)	63,8 s	143,8 Wh
Ein-Zonen <i>closest open location</i> (COL1)	57,0 s	126,9 Wh
Zwei-Zonen <i>closest open location</i> (COL2)	49,7 s	109,1 Wh
Energetische ABC-Zonierung (ENM3)	50,9 s	109,3 Wh
Dynamische Zonierung (DYN)	48,7 s	106,5 Wh

Tabelle 5.8: Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie MVI+ im Basiszenario

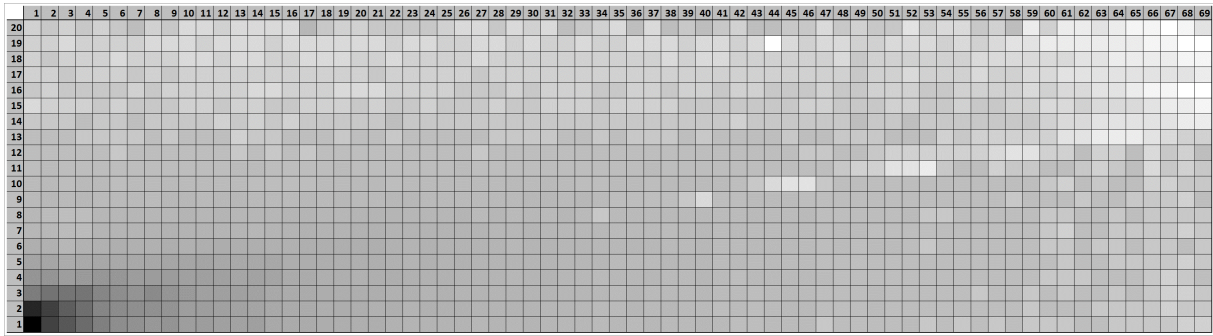


Abbildung 5.24: Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie MVI+ (eigene Darstellung)

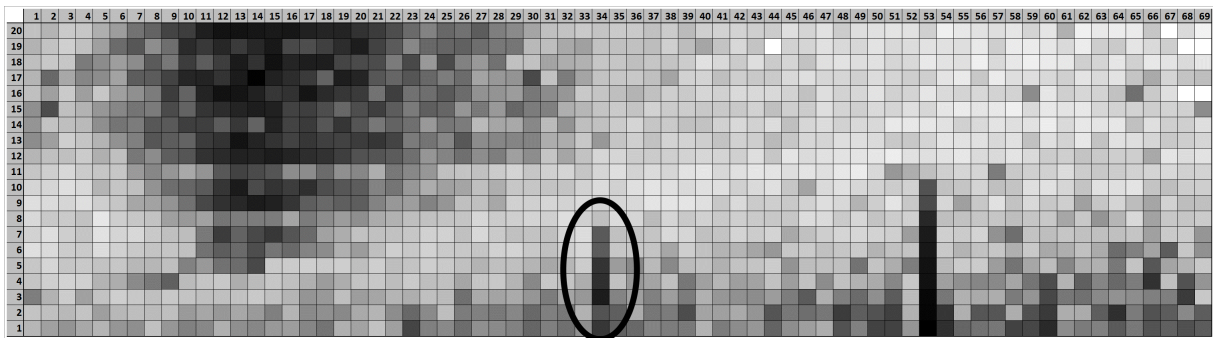


Abbildung 5.25: Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVI+ mit Hervorhebung der Masseverteilung in einer „übers Eck“ verlaufenden Isochrone (eigene Darstellung)

LP, die die größte Energiespannweite innerhalb ihrer Isochronen aufweisen. Da die Strategie MVI+ versucht, in Abhängigkeit vom aktuellen LFG eine bestimmte Anzahl LP einer Isochrone mit hoher Energiespannweite unbelegt zu lassen, werden diese LP seltener für Einlagerungen genutzt.

Abbildung 5.25 illustriert die Masseverteilung in der Regalwand bei Anwendung der Strategie MVI+. Die Werte in Spalte 34 (siehe elliptische Markierung) zeigen, wie die Strategie relativ schwere LE bevorzugt in LP mit geringer Energiespannweite einlagert: Die Spalte 34 bildet zusammen mit der Zeile 8 eine „übers Eck“ verlaufende Isochrone, bei der LP mit einer hohen Energiespannweite v. a. in Zeile 8 anzufinden sind. Auf diese LP werden daher bevorzugt leichte LE eingelagert. Dies führt dazu, dass die LP in den unteren Zeilen von Spalte 34 sehr hohe mittlere Massen aufweisen. Im Gegensatz dazu werden LP mit hoher Energiespannweite nur mit geringen mittleren LE-Massen belegt, wie die Spalten 27-33 in Zeile 8 belegen. Der Verlauf der mittleren LE-Masse in Zeile 20 zeigt, dass die größten Werte nicht bei Beginn der Zeile auftreten, sondern erst im Bereich der Spalten 11-17: Dies ist erneut darauf zurückzuführen, dass die durch die Zwischenkreiskopplung bereitgestellte Momentanleistung in Senkbewegungen erst bei LP der Zeile mit einem geringen horizontalen Abstand zum ÜP zur Reduktion des Energiebedarfs der

Auslagerungsfahrt beiträgt.⁵⁹²

Im Vergleich zu den Strategien MVI, MVRW und MVZ2 sind die Fahrzeit und der Energiebedarf der Strategie MVI+ in höherem Maße vom LFG abhängig: Ein hoher LFG (Szenario #9) resultiert in einem Energiebedarf von 105,7 Wh und in einer Fahrzeit von 49,0 s, während ein niedriger LFG (Szenario #7) zu einem Energiebedarf von 104,0 Wh und einer Fahrzeit von 48,8 s führt. Analog zur Strategie MVI dürfte es der Strategie MVI+ bei einem niedrigen LFG besser gelingen, einen aus Massesicht optimalen LP für die eingehende LE zu nutzen, da die mittlere Verfügbarkeit der LP bei sinkendem LFG steigt.⁵⁹³ Zur Untersuchung dieser These wird im Folgenden die Anzahl der für eine aus Massesicht optimale Einlagerung in Betracht gezogenen LP erhöht, indem angrenzende Isochronen (Abschnitte 5.3.6 und 5.3.7) bzw. weitere Regalwände (Abschnitt 5.3.8) in die Suche nach einem aus Massesicht optimalen LP einbezogen werden. Da die Strategie MVI+ zusätzlich von der Nichtnutzung energiebedürftiger LP zu profitieren versucht, kann dieser zweite Effekt bei einem steigenden LFG weniger gut genutzt werden.

Hinsichtlich der Massespannweite lässt sich ebenfalls ein Zusammenhang erkennen: So führt bei einem mittleren LFG eine mittlere Massespannweite (Szenario #5) zu einem Energiebedarf von 105,4 Wh, während eine niedrige Massespannweite (Szenario #2) einen Energiebedarf von 105,6 Wh mit sich bringt.⁵⁹⁴ Die Kombination aus hohem LFG und niedriger Massespannweite (Szenario #3) führt zu einem Energiebedarf von 106,0 Wh, was dem schlechtesten Wert aller untersuchten Szenarien entspricht. In diesem Fall kann kaum von der Massespannweite oder der Nichtnutzung energiebedürftiger LP profitiert werden. Dennoch unterbietet selbst dieser Wert die Referenzstrategie DYN und zeigt die Abhängigkeit der erzielbaren Energieeinsparungen von der dazu genutzten Massespannweite der LE und dem LFG. Dies unterstreicht der Energiebedarf in der Kombination aus niedrigem LFG und hoher Massespannweite (Szenario #7), der, wie oben genannt, 104,0 Wh beträgt.

5.3.6 MVI mit Toleranzfaktor r (MVI r)

In den Strategien MVI⁵⁹⁵ und MVI+⁵⁹⁶ wird jeweils für die eingehende LE ein LP ermittelt, dessen Fahrzeitquantil dem Verweildauerquantil⁵⁹⁷ der LE entspricht. Anschließend werden alle LP der Isochrone des Ziel-LP ebenfalls in die Ermittlung eines aus Massesicht optimalen LP einbezogen, da alle LP der Isochrone gleiche Fahrzeiten aufweisen, sich jedoch in ihrer Energiespannweite unterscheiden. Ziel ist es dabei, einen für das Mas-

⁵⁹²Vgl. Abschnitt 5.3.4.

⁵⁹³Vgl. Abschnitt 5.3.8.

⁵⁹⁴Die Fahrzeiten in beiden Fällen betragen weiterhin 48,9 s.

⁵⁹⁵Strategie Masseverteilung in der Isochrone. Vgl. Abschnitt 5.3.4.

⁵⁹⁶Strategie Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem Lagerfüllgrad. Vgl. Abschnitt 5.3.5.

⁵⁹⁷Vgl. Abschnitt 4.2.3.2.

sequantil der eingehenden LE optimalen LP der Isochrone zu determinieren, um so eine möglichst energieeffiziente Verteilung heterogener LE-Massen in der Isochrone zu erzielen.

Wie bereits im Abschnitt zur Strategie EMI⁵⁹⁸ beschrieben wurde, reduziert ein hoher LFG die Anzahl verfügbarer LP einer Isochrone drastisch: So ist in einer Isochrone mit zehn LP bei einem LFG von 90 % im Durchschnitt nur ein einziger LP verfügbar. Dieser Umstand schränkt auch die Gestaltungsmöglichkeiten der Strategien MVI und MVI+ beim Auffinden eines aus Massesicht optimalen LP stark ein.

Daher wird für beide Strategien, ähnlich zur Strategie EMIr⁵⁹⁹, ein Toleranzfaktor r implementiert und auf seine Wirkung hin untersucht. Dieser sorgt dafür, dass nach Bestimmung einer Soll-Fahrzeit, d. h. nach Festlegung der zeitoptimalen Isochrone für die eingehende LE, auch angrenzende Isochronen in die Bestimmung eines aus Massesicht optimalen LP einbezogen werden. Der Toleranzfaktor r gibt auch hier die maximal zulässige prozentuale Abweichung der Fahrzeit einer Isochrone zur Ziel-Isochrone in Prozent wieder.⁶⁰⁰ Zur Wirkung des Toleranzfaktors r sei auf Abbildung 5.26 verwiesen: In Abbildung 5.26⁶⁰¹ ist eine Isochrone in Zeile 6 der betrachteten Regalwand mit schwarzer Farbe hervorgehoben. Innerhalb dieser Isochrone würde eine sehr schwere LE in den mit der Ziffer 1 markierten LP (LP #1) eingelagert werden, da dieser LP innerhalb der Isochrone die geringste Energiespannweite (aus den Auswertungen entnommen) aufweist. Bei einem Toleranzfaktor von $r = 10\%$ werden nun auch die dunkelgrau markierten LP für die LP-Zuordnung in Betracht gezogen. Der mit der Ziffer 2 markierte LP (LP #2) ist der LP des schwarzen und dunkelgrauen Bereichs mit der geringsten Energiespannweite; daher würde die sehr schwere LE bei einem Toleranzfaktor von $r = 10\%$ in den LP #2 eingelagert. Da sich dieser in einer geringeren Zeile als der LP #1 befindet, reduziert sich die einzubringende Hubarbeit. Bei einem Toleranzfaktor von $r = 20\%$ werden nun auch die hellgrau markierten LP für die LP-Zuordnung in Betracht gezogen. Der mit der Ziffer 3 markierte LP (LP #3) ist der LP des schwarzen, dunkelgrauen und hellgrauen Bereichs mit der geringsten Energiespannweite; daher würde die LE bei einem Toleranzfaktor von $r = 20\%$ in den LP #3 eingelagert. Da dieser im Vergleich zum LP #2 einen geringeren horizontalen Abstand zum ÜP aufweist, reduziert sich die einzubringende Reibungsarbeit in x-Richtung.

Durch Einführung des Toleranzfaktors r wird das Ziel eines aus Massesicht optimalen LP innerhalb der Soll-Isochrone verletzt, was einer Aufweichung dieser Nebenbedingung in den Strategien MVI und MVI+ entspricht. Es gilt zu untersuchen, welche Auswirkungen unterschiedliche Werte von r auf die durchschnittliche Fahrzeit sowie den durchschnittli-

⁵⁹⁸Vgl. Abschnitt 5.2.4.

⁵⁹⁹Vgl. Abschnitt 5.2.5.

⁶⁰⁰Vgl. Abschnitt 5.2.5 sowie die darin aufgeführte Begründung der Wahl einer relativen Abweichung anstelle einer absoluten Abweichung der Fahrzeit.

⁶⁰¹Abbildung 5.26 stellt eine ergänzte Version von Abbildung 5.8 dar.

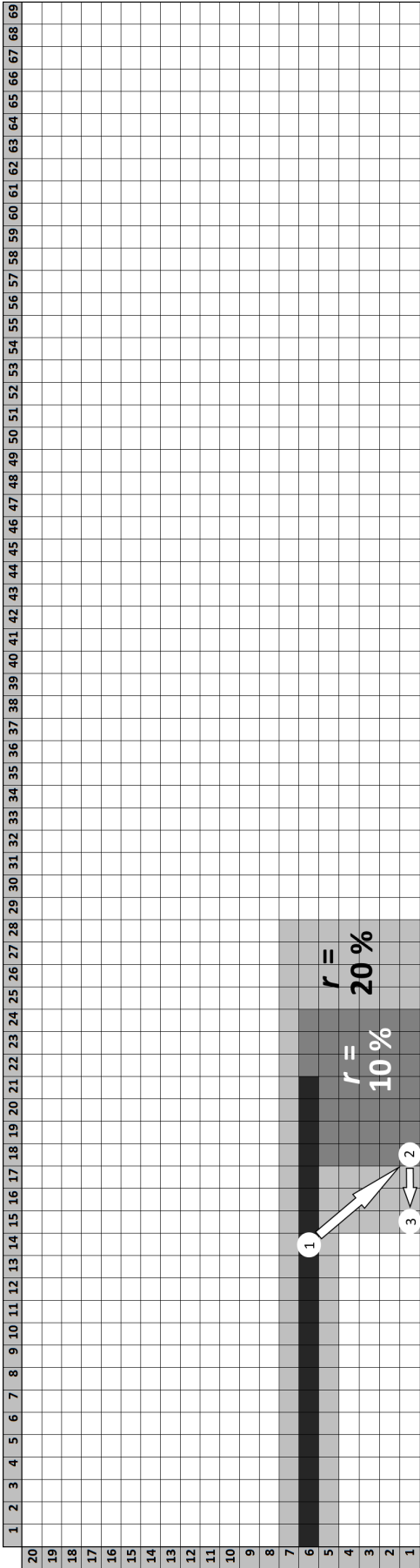


Abbildung 5.26: Auswirkung des Toleranzfaktors r auf die LP-Zuordnung für eine sehr schwere LE (eigene Darstellung)

Algorithmus 11 Strategie Masseverteilung in der Isochrone mit Toleranzfaktor r (MVIr)

1. Bestimmung des Verweildauerquantils α der eingehenden LE nach Algorithmus 1
2. Bestimmung des Massequantils β der eingehenden LE nach Algorithmus 2
3. Bestimmung des aus Verweildauersicht optimalen Soll-LP $LP_{Soll,optimal,VW}$
 - (a) Sortiere alle LP der Regalwand $n_{LP,RW}$ nach aufsteigender Fahrzeit
 - (b) Ermittle Index $LP_{Soll,optimal,VW} = n_{LP,RW} \cdot \alpha$ (gerundet)
4. Ermittlung der zeitlich kompatiblen LP
 - (a) Bestimme $t_{UP,LP_{Soll,VW,real}}$
 - (b) Bestimme die Menge $n_{LP,Iso,r}$ der LP mit $t_{UP,LP_{Soll,VW,real}} \cdot (1 - r) \leq t_{UP,LP_i} \leq t_{UP,LP_{Soll,VW,real}} \cdot (1 + r)$
5. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Soll-LP
 - (a) Sortiere die Menge $n_{LP,Iso,r}$ nach absteigender Energiespannweite
 - (b) Index $LP_{Soll,optimal,Masse} = n_{LP,Iso,r} \cdot \beta$ (gerundet)
6. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Ist-LP
 - (a) Ermittle $Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}$
 - (b) Auswahl des $LP_{Ist,optimal,Masse}$ aus der Menge $n_{LP,Iso}$, der die Funktion $|Energiespannweite_{LP} - Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}|$ minimiert

chen Energiebedarf von Ein- und Auslagerungen haben. Zu diesem Zweck werden für die Strategien MVI⁶⁰² und MVI+⁶⁰³ Simulationsläufe mit unterschiedlichen Werten für den Toleranzfaktor r durchgeführt.

Zunächst wird für die Strategie MVI ein Toleranzfaktor r implementiert, wodurch sich die Strategie MVIr ergibt. Anschließend werden Werte für den Toleranzfaktor von $r = 5...50\%$ (MVI5 bis MVI50) hinterlegt und die Auswirkungen hinsichtlich Fahrzeit und Energiebedarf ermittelt. Ein Toleranzfaktor von $r = 40\%$ bedeutet dabei, dass nach Bestimmung einer aus Verweildauersicht optimalen Isochrone auch diejenigen Isochronen, deren Fahrzeit um $\pm 40\%$ von der Fahrzeit der optimalen Isochrone abweicht, in die Bestimmung eines aus Massesicht optimalen LP einbezogen werden. Die Strategie MVIr ist in Algorithmus 11 in ihrem Ablauf beschrieben.

Tabelle 5.9 fasst die erzielten Simulationsergebnisse im Basisszenario zusammen.⁶⁰⁴ Zu-

⁶⁰²Vgl. Abschnitt 5.3.4.

⁶⁰³Vgl. Abschnitt 5.3.5.

⁶⁰⁴Die jeweils niedrigsten Werte für Fahrzeit und Energiebedarf sind mit einem „*“ gekennzeichnet.

Strategie	Fahrzeit	Energiebedarf
MVI	48,8 s	105,3 Wh
MVI5	48,8 s	104,3 Wh
MVI10	49,6 s	105,5 Wh
MVI15	49,5 s	105,2 Wh
MVI20	49,4 s	104,8 Wh
MVI25	49,2 s	103,8 Wh
MVI30	48,7 s	102,2 Wh
MVI35	48,0 s	100,1 Wh
MVI40	*47,8 s	*99,5 Wh
MVI45	48,0 s	99,8 Wh
MVI50	48,4 s	100,4 Wh
Ein-Zonen zufallsbasiert (RND1)	63,8 s	143,8 Wh
Ein-Zonen <i>closest open location</i> (COL1)	57,0 s	126,9 Wh
Zwei-Zonen <i>closest open location</i> (COL2)	49,7 s	109,1 Wh
Energetische ABC-Zonierung (ENM3)	50,9 s	109,3 Wh
Dynamische Zonierung (DYN)	48,7 s	106,5 Wh

Tabelle 5.9: Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie MVIr im Basisszenario

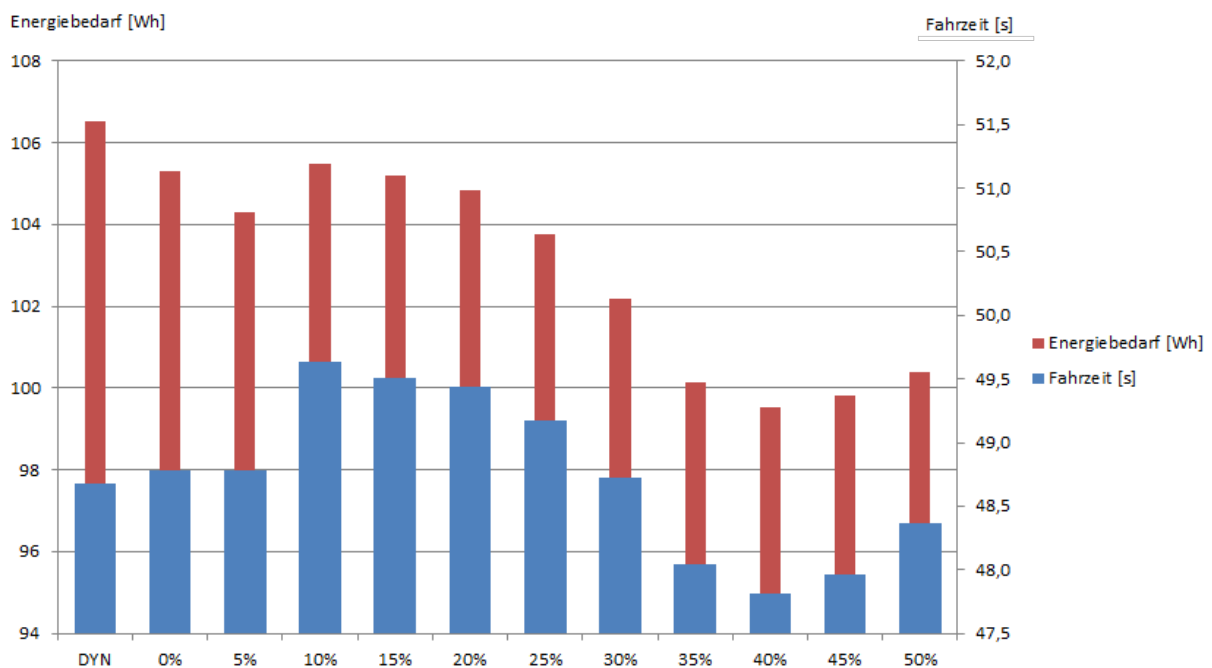


Abbildung 5.27: Auswirkung unterschiedlicher Werte des Toleranzfaktors r bei der Strategie MVIr auf Fahrzeit und Energiebedarf (eigene Darstellung)

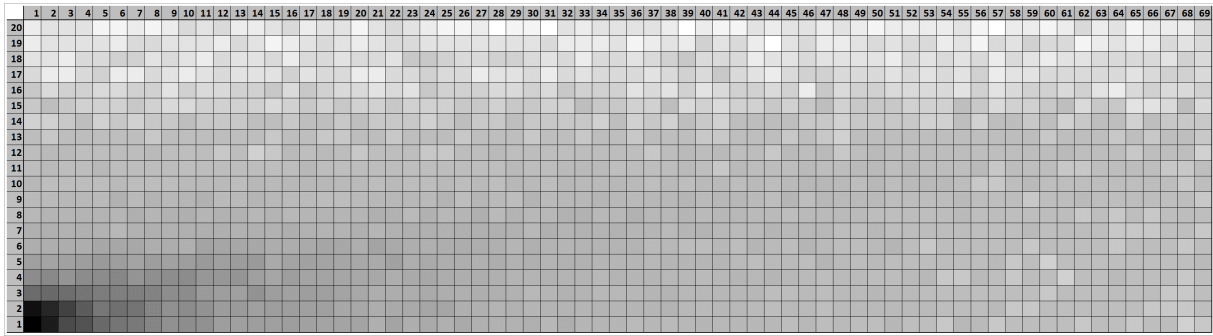


Abbildung 5.28: Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie MVI40 (eigene Darstellung)

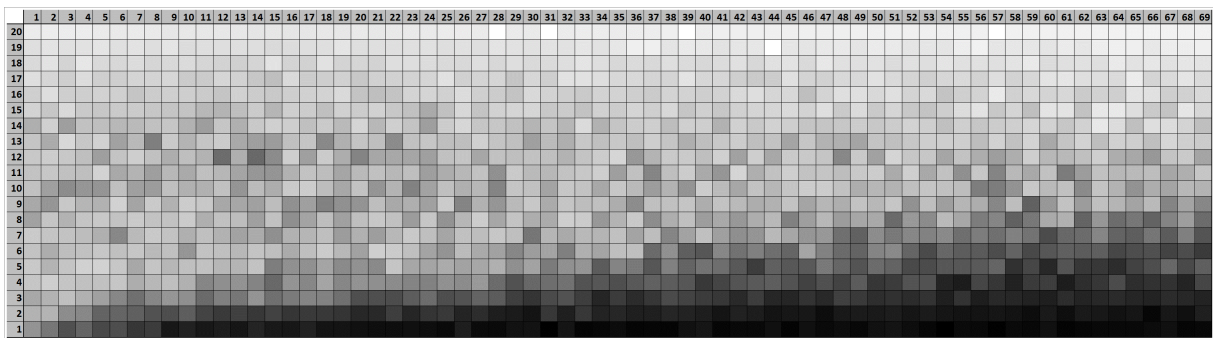


Abbildung 5.29: Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVI40 (eigene Darstellung)

sätzlich illustriert Abbildung 5.27 die Ergebnisse. Darin zeigen die dünnen Balken (Skala auf der linken Seite) die entstehenden Energiebedarfe und die dicken Balken (Skala auf der rechten Seite) die entstehenden Fahrzeiten, jeweils in Abhängigkeit vom gewählten Wert des Toleranzfaktors r . Bei Anwendung eines Toleranzfaktors von $r = 40\%$ (MVI40) wird der mit 99,5 Wh geringste Energiebedarf erzielt. Dieser Wert unterschreitet den Referenzwert der Strategie DYN um 7,0 Wh oder 6,5%. Dabei wird eine Fahrzeit von 47,8 s erzielt, was 0,9 s oder 1,8% unter der Fahrzeit der Strategie DYN liegt. Die Strategie MVI40 ist somit im Basisszenario deutlich energieeffizienter als alle bisher untersuchten bekannten oder neu entwickelten Strategien. Gleichzeitig konnte eine leichte Reduktion der Fahrzeit erzielt werden: Die Strategie MVI40 unterbietet die Fahrzeit der Strategie RND1 um 15,9 s bzw. 25,0% sowie deren Energiebedarf um 44,1 Wh bzw. 30,7%.

Abbildung 5.28 stellt die Zugriffshäufigkeiten, Abbildung 5.29 die Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVI40 dar. Dabei zeigt sich, dass alle Bereiche der Regalwand angefahren werden und dass im Vergleich zur Strategie MVI und MVI+ vor allem LP in den untersten Zeilen die höchsten mittleren LE-Massen aufweisen. Aufgrund der höheren Spalten- (69) als Zeilenzahl (20) der Regalwand werden durch Anwendung des Toleranzfaktors r verweildauerbasiert optimale Isochronen v. a. um senkrechte Nachbar-Isochronen erweitert. Somit ist es besser möglich, schwere LE in untere Zeilen einzulagern. Es bleibt

festzuhalten, dass die Strategie MVI40 zu dem bisher niedrigsten Energiebedarf führt. Als positiver Nebeneffekt wird zudem eine leicht sinkende Fahrzeit erzielt.

Die Fahrzeit und der Energiebedarf der Strategie MVIr zeigen keine signifikanten Änderungen in Abhängigkeit vom LFG: So führt die Strategie MVI40 bei einem hohen LFG (Szenario #9) zu einem Energiebedarf von 99,7 Wh und einer Fahrzeit von 47,8 s. Bei einem niedrigen LFG (Szenario #7) liegen der Energiebedarf bei 99,6 Wh und die Fahrzeit bei 47,9 s. Hinsichtlich der Massespannweite zeigen sich jedoch Änderungen beim Energiebedarf: Während bei einer mittleren Massespannweite (Szenario #5) die Fahrzeit bei 47,8 s verharnt, steigt der Energiebedarf auf 100,9 Wh an. Bei einer niedrigen Massespannweite (Szenario #2) ergeben sich als Fahrzeit ebenfalls 47,8 s und als Energiebedarf 102,4 Wh. Jedoch unterbieten selbst diese Werte die Fahrzeit und den Energiebedarf der Referenzstrategie DYN um 1,8 % bzw. 3,8 %. Es zeigt sich, dass selbst bei einer geringen Massespannweite signifikante Einsparungen beim Einsatz der Strategie MVIr erzielt werden. Dies bedeutet, dass, selbst in Szenarien, in denen die Massespannweite nur geringe Möglichkeiten bietet, die Strategie MVIr gegenüber der Strategie DYN Energieeinsparungen von 3,8 % erzielen kann.

5.3.7 MVI+ mit Toleranzfaktor r (MVI+r)

Für die Strategie MVI+ wird ebenfalls ein Toleranzfaktor r eingeführt, wodurch sich die Strategie MVI+r ergibt. Auch hier werden Werte für den Toleranzfaktor von $r = 5...50\%$ (MVI+5 bis MVI+50) hinterlegt und die Auswirkungen hinsichtlich Fahrzeit und Energiebedarf für das Basisszenario ermittelt. Die Strategie MVI+r ist in Algorithmus 12 in ihrem Ablauf beschrieben.

Tabelle 5.10 stellt die erzielten Simulationsergebnisse im Basisszenario dar.⁶⁰⁵ Zusätzlich illustriert Abbildung 5.30 die Ergebnisse. Darin zeigen die dünnen Balken (Skala auf der linken Seite) die entstehenden Energiebedarfe und die dicken Balken (Skala auf der rechten Seite) die entstehenden Fahrzeiten, jeweils in Abhängigkeit vom gewählten Wert des Toleranzfaktors r . Bei Anwendung eines Toleranzfaktors von $r = 35\%$ wird dabei der mit 95,9 Wh geringste Energiebedarf erzielt. Dieser Wert unterschreitet den Wert der Referenzstrategie DYN um 10,6 Wh oder 10,0 %. Dabei wird eine Fahrzeit von 45,9 s erzielt, was 2,7 s oder 5,6 % unter der Fahrzeit der Strategie DYN liegt. Die Strategie MVI+35 ist somit deutlich energieeffizienter als alle bisher untersuchten bekannten oder neu entwickelten Strategien. Gleichzeitig konnte eine signifikante Reduktion der Fahrzeit erzielt werden: Die Strategie MVI+35 unterbietet die Fahrzeit der Strategie RND1 um 17,8 s bzw. 28,0 % sowie den Energiebedarf um 47,8 Wh bzw. 33,3 %. Anders als bei der Strategie MVIr, bei der ein Toleranzfaktor von $r = 40\%$ zu der niedrigsten Fahrzeit und zum niedrigsten Energiebedarf führt, liegt der optimale Wert bei der Strategie MVI+r

⁶⁰⁵Die jeweils niedrigsten Werte für Fahrzeit und Energiebedarf sind mit einem „*“ gekennzeichnet.

Algorithmus 12 Strategie Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem Lagerfüllgrad und Toleranzfaktor r (MVI+r)

1. Bestimmung des Verweildauerquantils α der eingehenden LE nach Algorithmus 1
 2. Bestimmung des Massequantils β der eingehenden LE nach Algorithmus 2
 3. Bestimmung des aus Verweildauersicht optimalen Soll-LP $LP_{Soll,optimal,VW}$
 - (a) Sortiere alle LP der Regalwand $n_{LP,RW}$ nach aufsteigender Fahrzeit
 - (b) Ermittle Index $LP_{Soll,optimal,VW} = n_{LP,RW} \cdot \alpha$ (gerundet)
 4. Ermittlung der zeitlich kompatiblen LP
 - (a) Bestimme $t_{UP,LP_{Soll,VW,real}}$
 - (b) Bestimme die Menge $n_{LP,Iso,r}$ der LP mit $t_{UP,LP_{Soll,VW,real}} \cdot (1 - r) \leq t_{UP,LP_i} \leq t_{UP,LP_{Soll,VW,real}} \cdot (1 + r)$
 5. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Soll-LP
 - (a) Sortiere die Menge $n_{LP,Iso,r}$ nach absteigender Energiespannweite
 - (b) Index $LP_{Soll,optimal,Masse} = (1 - LFG + \beta \cdot LFG) \cdot n_{LP,Iso,r}$ (gerundet)
 6. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Ist-LP
 - (a) Ermittle $Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}$
 - (b) Auswahl des $LP_{Ist,optimal,Masse}$ aus der Menge $n_{LP,Iso}$, der die Funktion $|Energiespannweite_{LP} - Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}|$ minimiert
-

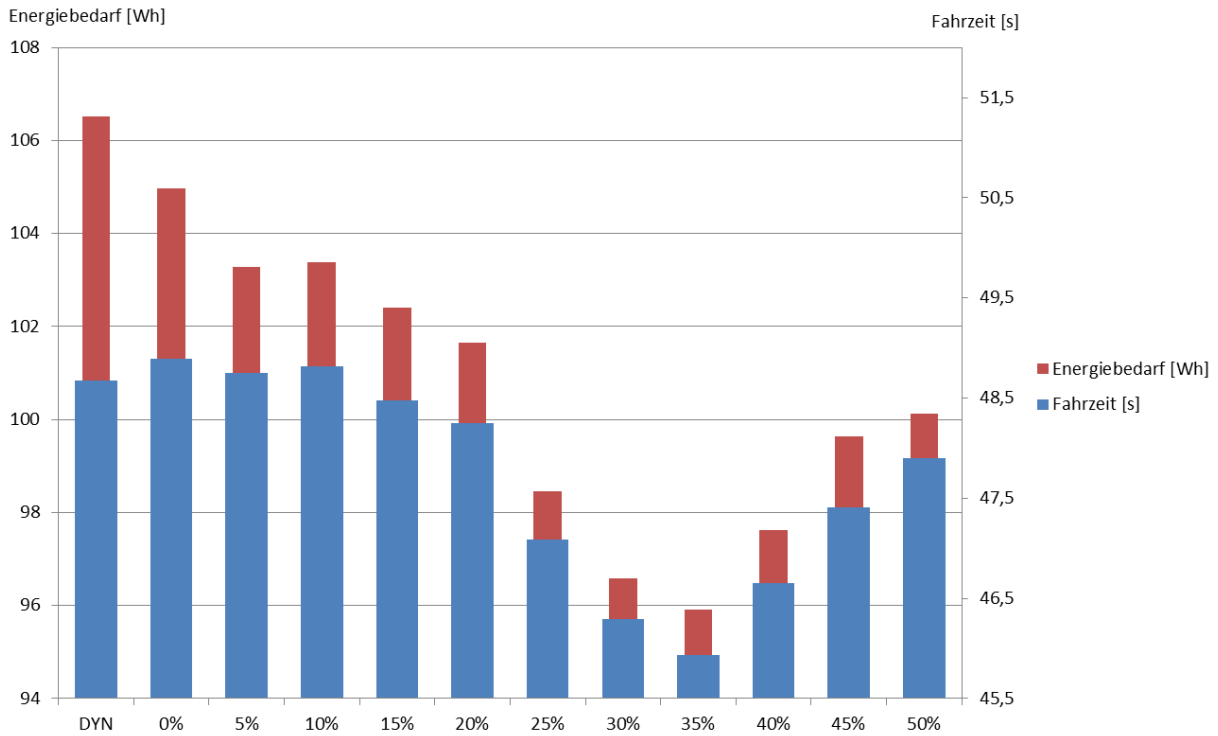


Abbildung 5.30: Auswirkung unterschiedlicher Werte des Toleranzfaktors r bei der Strategie MVI+r auf Fahrzeit und Energiebedarf (eigene Darstellung)

bei $r = 35\%$.

Abbildung 5.31 stellt die Zugriffshäufigkeiten, Abbildung 5.32 die Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVI+35 dar. Dabei zeigt sich, dass, ähnlich wie bei der Strategie MVI40 (siehe Abbildung 5.29), v. a. LP in den unteren Zeilen die höchsten mittleren LE-Massen aufweisen. Im Vergleich zur Strategie MVI40 werden zudem LP in der obersten Zeile der Regalwand, die eine hohe Energiespannweite aufweisen, nur eingeschränkt zur Einlagerung von LE herangezogen. Abbildung 5.31, in der die Zugriffshäufigkeiten auf die LP der Regalwand bei Anwendung der Strategie MVI+35 dargestellt sind, bestätigt diese Beobachtung und zeigt, dass v. a. auf fahrzeitgünstige LP nahe dem ÜP zugegrif-

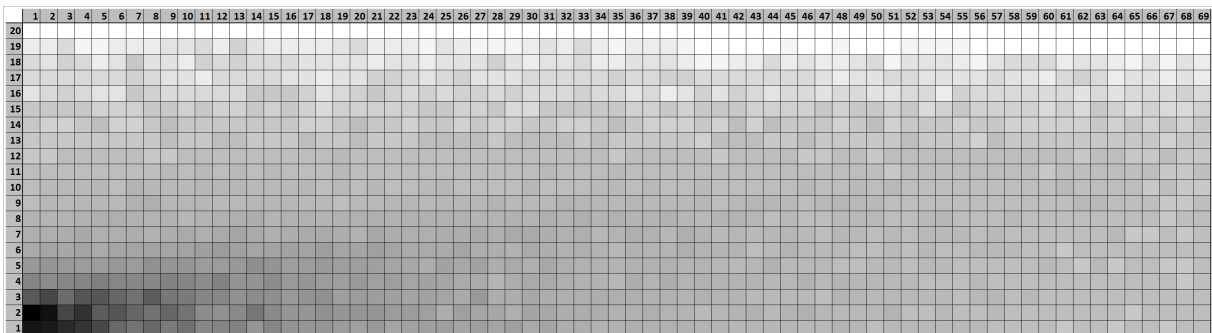


Abbildung 5.31: Zugriffshäufigkeit bei Anwendung der Strategie MVI+35 (eigene Darstellung)

Strategie	Fahrzeit	Energiebedarf
MVI+	48,9 s	105,0 Wh
MVI+5	48,8 s	103,3 Wh
MVI+10	48,8 s	103,4 Wh
MVI+15	48,5 s	102,4 Wh
MVI+20	48,2 s	101,6 Wh
MVI+25	47,1 s	98,5 Wh
MVI+30	46,3 s	96,6 Wh
MVI+35	*45,9 s	*95,9 Wh
MVI+40	46,7 s	97,6 Wh
MVI+45	47,4 s	99,6 Wh
MVI+50	47,9 s	100,1 Wh
Ein-Zonen zufallsbasiert (RND1)	63,8 s	143,8 Wh
Ein-Zonen <i>closest open location</i> (COL1)	57,0 s	126,9 Wh
Zwei-Zonen <i>closest open location</i> (COL2)	49,7 s	109,1 Wh
Energetische ABC-Zonierung (ENM3)	50,9 s	109,3 Wh
Dynamische Zonierung (DYN)	48,7 s	106,5 Wh

Tabelle 5.10: Fahrzeit und Energiebedarf bei Anwendung der Strategie MVI+r im Basiszenario

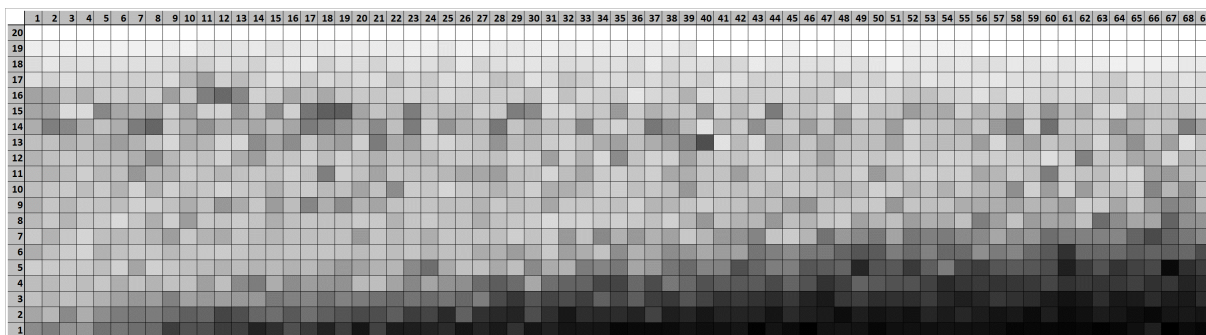


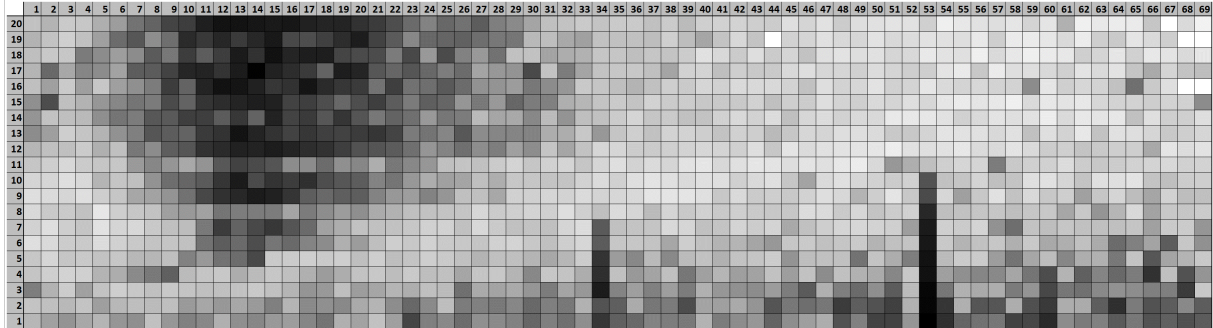
Abbildung 5.32: Masseverteilung bei Anwendung der Strategie MVI+35 (eigene Darstellung)

fen wird. In Abbildung 5.33 sind die Masseverteilungen bei Anwendung der Strategie MVI+r abgebildet, wobei von oben nach unten Werte von 0 %, 5 %, 10 % und 45 % für den Toleranzfaktor verwendet werden. Dabei zeigt sich, dass sich der bereits in Abschnitt 5.3.5 beschriebene erste Bereich mit hohen durchschnittlichen LE-Massen bei steigenden Werten für den Toleranzfaktor auflöst, während der beschriebene zweite Bereich in den unteren Zeilen der Regalwand stärker ausgeprägt ist. Beim Wert von 45 % ist die Separierung schwerer LE in den unteren Zeilen nicht mehr so deutlich ausgeprägt und die Masseverteilung wird diffuser. Darüber hinaus werden LP in den obersten Zeilen der Regalwand kaum noch für Einlagerungen genutzt. Diese Beobachtung geht einher mit den ab einem Wert von 35 % wieder steigenden Fahrzeiten und Energiebedarfen. Ein zu hoher Wert für den Toleranzfaktor r führt zu einer zu starken Verdichtung der Einlagerungen in den unteren Zeilen der Regalwand, wodurch in diesem Bereich nur wenige alternative freie LP für eine eingehende LE zur Auswahl stehen. Dadurch wird wiederum die Zuordnung zu einem aus Massesicht optimalen LP der Ziel-Isochrone erschwert, was zur Diffusität der Masseverteilung führt. Ein zu hoher Wert für den Toleranzfaktor r sollte daher, ebenso wie ein zu niedriger Wert, nach Möglichkeit vermieden werden.

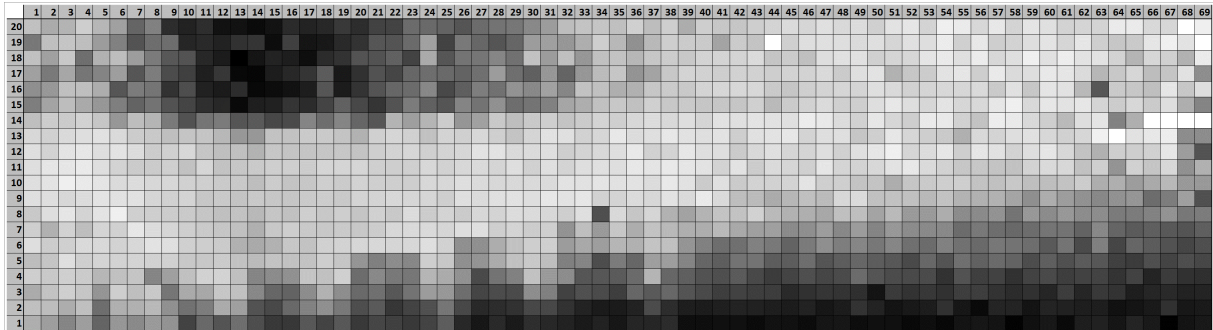
Die Fahrzeit und der Energiebedarf der Strategie MVI+r zeigen Änderungen in Abhängigkeit vom LFG: So führt die Strategie MVI+35 bei einem hohen LFG (Szenario #9) zu einem Energiebedarf von 100,9 Wh und einer Fahrzeit von 48,0 s. Bei einem niedrigen LFG (Szenario #7) liegen der Energiebedarf bei 91,6 Wh (-13,9 % gegenüber DYN; -12,5 % gegenüber COL2⁶⁰⁶) und die Fahrzeit bei 44,5 s (-8,5 % gegenüber DYN; -7,5 % gegenüber COL2). Diese Abhängigkeit vom LFG liegt in der Berücksichtigung des aktuellen LFG bei der LP-Zuordnung in der Strategie MVI+r begründet: Je niedriger der LFG ist, desto mehr LP mit hoher Energiespannweite werden bei der LP-Zuordnung ignoriert. Somit kann bei einem niedrigen LFG die LP-Zuordnung auf LP mit möglichst geringer Energiespannweite beschränkt werden. Bei einem hohen LFG kann dieser Effekt nur in geringerem Maße genutzt werden, wodurch mehr LP mit hoher Energiespannweite für Einlagerungen genutzt werden müssen. Da die Anpassung der LP-Zuordnung an den aktuellen LFG in der Strategie MVI+r automatisch geschieht, können bei einem Produktiveinsatz der Strategie Phasen mit mittlerem oder geringem LFG in besonderem Maße genutzt werden, um signifikante Energieeinsparungen zu realisieren. Während bei einem niedrigen und einem mittleren LFG weiterhin ein Toleranzfaktor von $r = 35 %$ die geringsten Fahrzeiten und Energiebedarfe mit sich bringt, führt eine Anpassung des Toleranzfaktors auf $r = 30 %$ bei einem hohen LFG (Szenario #9) zu einem Energiebedarf von 99,6 Wh, was unterhalb des Wertes für einen Toleranzfaktor von $r = 35 %$ (100,9 Wh) liegt. Eine geringfügige Reduzierung der Fahrzeit von 48,0 s auf 47,7 s konnte ebenfalls erzielt werden. Hier zeigt

⁶⁰⁶Bei einem niedrigen LFG führt die Strategie COL2 zu einer geringfügig niedrigeren Fahrzeit und einem geringfügig niedrigeren Energiebedarf als die Strategie DYN. Vgl. Abschnitt 4.4.

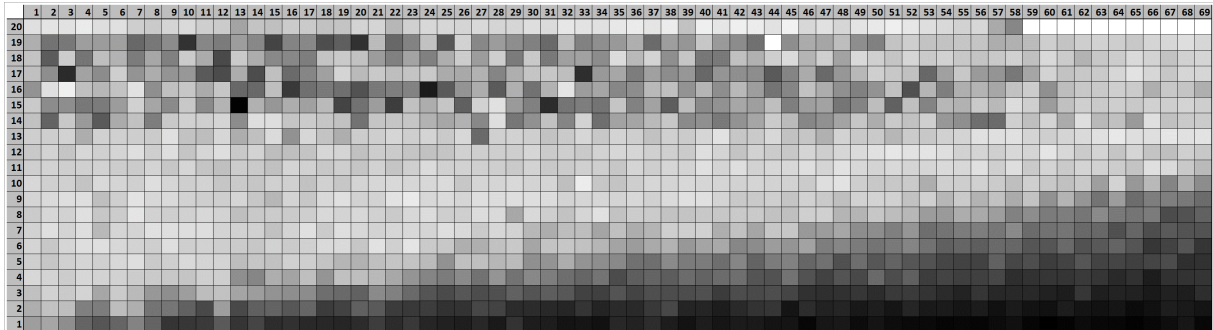
$r = 0\%$:



$r = 5\%$:



$r = 10\%$:



$r = 45\%$:

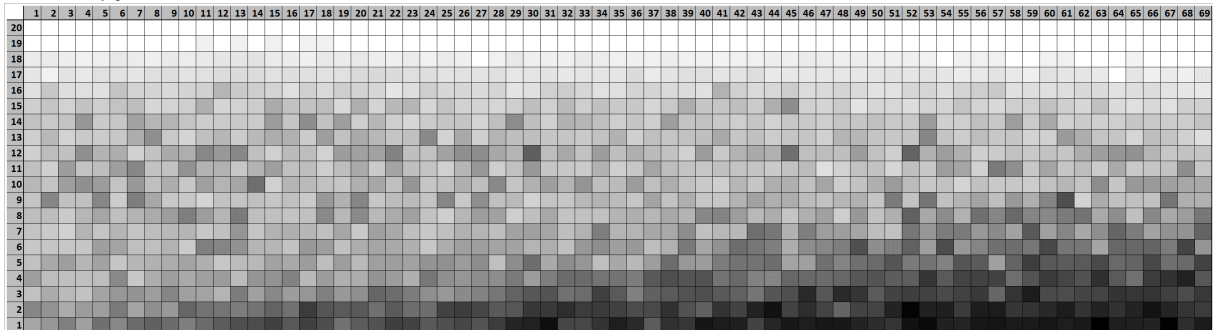


Abbildung 5.33: Masseverteilungen bei Anwendung der Strategie MVI+r und unterschiedlichen Werten für den Toleranzfaktor r (eigene Darstellung)

Masse- spannweite	Lagerfüllgrad		
	niedrig (78 %)	mittel (84 %)	hoch (90 %)
niedrig (300 kg)	Szenario #1: ΔFZ : - 7,7 % ΔEB : - 10,6 % $r_{opt} = 35$ %	Szenario #2: ΔFZ : - 5,5 % ΔEB : - 9,0 % $r_{opt} = 35$ %	Szenario #3: ΔFZ : - 2,3 % ΔEB : - 5,1 % $r_{opt} = 30$ %
mittel (700 kg)	Szenario #4: ΔFZ : - 7,5 % ΔEB : - 12,0 % $r_{opt} = 35$ %	Szenario #5: ΔFZ : - 5,5 % ΔEB : - 9,8 % $r_{opt} = 35$ %	Szenario #6: ΔFZ : - 2,2 % ΔEB : - 5,7 % $r_{opt} = 30$ %
hoch (1.100 kg)	Szenario #7: ΔFZ : - 7,5 % ΔEB : - 12,5 % $r_{opt} = 35$ %	Szenario #8 (Basisszenario): ΔFZ : - 5,6 % ΔEB : - 10,0 % $r_{opt} = 35$ %	Szenario #9: ΔFZ : - 2,1 % ΔEB : - 6,6 % $r_{opt} = 30$ %

Tabelle 5.11: Einsparungen hinsichtlich Fahrzeit (ΔFZ) und Energiebedarf (ΔEB) sowie r_{opt} in allen Szenarien bei Anwendung der Strategie MVI+r gegenüber den Referenzstrategien

sich erneut der Zusammenhang, der schon bei der Strategie EMIR beobachtet wurde: Bei einem hohen LFG (Szenario #9) führt eine geringfügige Verringerung des Toleranzfaktors zu sinkenden Energiebedarfen sowie zu geringfügig sinkenden Fahrzeiten, während der optimale Wert für den Toleranzfaktor bei mittlerem LFG (Szenario #8) auch bei einem niedrigen LFG (Szenario #7) seine Gültigkeit behält.

Hinsichtlich der Massespannweite zeigen sich ebenfalls Änderungen beim Energiebedarf: Während bei einer mittleren Massespannweite (Szenario #5) die Fahrzeit 46,0 s beträgt, steigt der Energiebedarf auf 96,1 Wh an. Bei einer niedrigen Massespannweite (Szenario #2) ergeben sich als Fahrzeit ebenfalls 46,0 s und als Energiebedarf 96,9 Wh. Jedoch unterschreiten selbst diese Werte die Fahrzeit und den Energiebedarf der Referenzstrategie DYN um 5,5 % bzw. 9,0 %. Dies bedeutet: Selbst wenn die Massespannweite nur geringe Möglichkeiten bietet, kann die Strategie MVI+r Energieeinsparungen von 9,0 % erzielen. Dadurch dass bei der Strategie MVI+r zum ersten Mal sowohl Abhängigkeiten zwischen den Messwerten und dem LFG als auch zwischen den Messwerten und der Massespannweite ermittelt wurden, werden im Folgenden auch die Szenarien #1 und #4, d. h. ein niedriger LFG bei einer niedrigen bzw. mittleren Massespannweite untersucht. In diesen beiden Szenarien ist wiederum die Strategie COL2 die Referenz für die Fahrzeit und den Energiebedarf. Darüber hinaus werden die beiden Szenarien #3 und #6, d. h. ein hoher LFG bei einer niedrigen bzw. mittleren Massespannweite untersucht. In diesen beiden Szenarien ist, wie auch im Basisszenario, die Strategie DYN die Referenz.

Tabelle 5.11 stellt die Einsparungen hinsichtlich Fahrzeit und Energiebedarf der Stra-

ategie MVI+r gegenüber der jeweiligen Referenzstrategie⁶⁰⁷ in allen neun Szenarien⁶⁰⁸ zusammen und führt als dritten Wert den jeweils optimalen Wert für den Toleranzfaktor r auf (Einsparung Fahrzeit; Einsparung Energiebedarf; optimaler Wert für den Toleranzfaktor r_{opt}). So führt die Strategie MVI+r beispielsweise bei einem niedrigen LFG und einer mittleren Massespannweite (Szenario #4) gegenüber der hier gültigen Referenzstrategie COL2 zu einer um 7,5 % niedrigeren Fahrzeit und zu einem um 12,0 % niedrigeren Energiebedarf, wenn ein Wert für den Toleranzfaktor von $r = 35 \% = r_{opt}$ verwendet wird. Bei einem hohen LFG und einer hohen Massespannweite (Szenario #9) führt die Strategie MVI+r gegenüber der hier gültigen Referenzstrategie DYN zu einer um 2,1 % niedrigeren Fahrzeit und zu einem um 6,6 % niedrigeren Energiebedarf, wenn ein Wert für den Toleranzfaktor von $r = 30 \% = r_{opt}$ verwendet wird.

Es bleibt festzuhalten, dass die Strategie MVI+35 im Basisszenario zu dem bisher mit Abstand niedrigsten Energiebedarf aller bisherigen und neu entwickelten Strategien führt. Als positiver Nebeneffekt konnte zudem eine signifikant sinkende Fahrzeit erzielt werden. Bemerkenswert ist, dass sich bei der Strategie MVIr im Basisszenario ein Wert von 40 % für den Toleranzfaktor r als optimal erwiesen hat, während die besten Ergebnisse der Strategie MVI+ im Basisszenario bei einem Wert von 35 % erzielt wurden. Einzig bei einem hohen LFG ist der optimale Wert für den Toleranzfaktor r jeweils geringfügig niedriger. Darüber hinaus zeigt sich, dass Optimalwerte für den Toleranzfaktor r in allen untersuchten Szenarien einzuhalten sind, um geringstmögliche Fahrzeiten und Energiebedarfe zu erzielen, während deutliche Abweichungen von den Optimalwerten zu steigenden Fahrzeiten und Energiebedarfen führen.

Es zeigt sich, dass ein steigender LFG zu geringeren Einsparungen der Strategie MVI+r gegenüber den Referenzstrategien führt. Dies lässt sich auf zwei Faktoren zurückführen: Zum einen wird bei der Strategie MVI+r der aktuelle LFG in die Ermittlung des aus Massesicht optimalen LP einbezogen, um LP mit einer hohen Energiespannweite nur im Bedarfsfall in der LP-Zuordnung zu berücksichtigen. Dieser Stellhebel kann bei einem hohen LFG nur noch in geringem Maße genutzt werden. Zum anderen nimmt bei einem steigenden LFG die mittlere Verfügbarkeit der LP ab, so dass der aus Massesicht optimale LP nur noch selten für die eingehende LE wirklich zur Verfügung steht. Daher wird im Folgenden versucht, durch eine Erweiterung der Strategie MVI+r die mittlere Verfügbarkeit der LP zu erhöhen und somit die erzielbaren Einsparungen zu steigern.

5.3.8 MVI+r unter Beachtung mehrerer Regalwände w (MVI+r/w)

Wie die Ausführungen in Abschnitt 5.3.7 zeigen, führt die Strategie MVI+r in allen untersuchten Szenarien sowohl zu geringen Fahrzeiten als auch zu signifikanten Energieeinspa-

⁶⁰⁷COL2 bei einem niedrigen LFG; DYN bei mittlerem und hohem LFG. Vgl. Abschnitt 4.4.

⁶⁰⁸Vgl. Abschnitt 4.3.

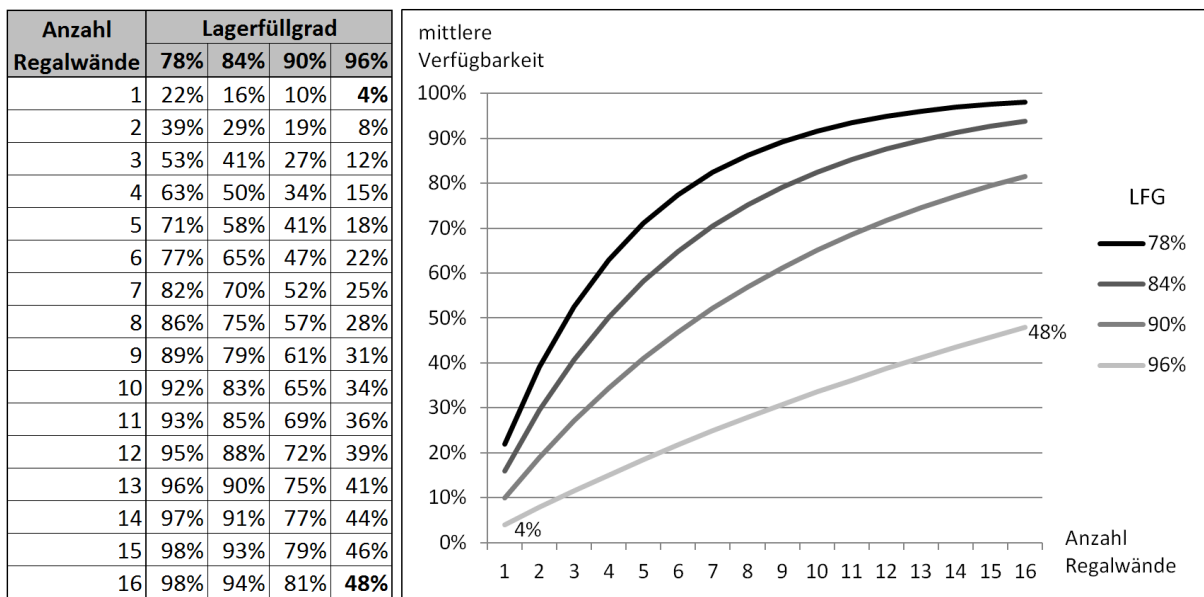


Abbildung 5.34: Mittlere Verfügbarkeit eines definierten LP in mehreren Regalwänden (eigene Darstellung)

rungen gegenüber den bisherigen Referenzstrategien. Hierzu tragen die Masseverteilung in der Isochrone, die Nichtnutzung von LP mit hoher Energiespannweite sowie die passende Wahl des Toleranzfaktors r bei. Um die Verfügbarkeit⁶⁰⁹ eines aus Verweildauer- und Massesicht optimalen LP für eine eingehende LE zu steigern, wird im Folgenden die Strategie MVI+r/w vorgestellt, die gleichartige LP mehrerer Regalwände in die Suche nach einem optimalen LP miteinbezieht. Während bei einem LFG von 84 % ein definierter LP im Mittel nur zu 16 % verfügbar ist, steigt die Verfügbarkeit bereits auf 29 %, wenn beide Regalwände derselben Gasse in die Suche einbezogen werden.⁶¹⁰

Abbildung 5.34 zeigt für verschiedene LFG den Verlauf der Verfügbarkeit eines LP bei Einbeziehung einer unterschiedlichen Anzahl heterogener Regalwände in die Suche. In der linken Hälfte der Abbildung ist die mittlere Verfügbarkeit eines nach x- und y-Koordinate definierten LP bei LFG von 78-96 % angegeben. Wie in der rechten Hälfte der Abbildung illustriert ist, steigt die Verfügbarkeit eines definierten LP bei allen LFG an, wenn eine steigende Anzahl an Regalwänden in die Suche nach dem definierten LP einbezogen wird.

⁶⁰⁹Nach VDI 4004-4 (1986, S. 2) besagt der Begriff Verfügbarkeit, dass ein System oder eine Systemkomponente für eine vorgesehene Aufgabe bei Bedarf tatsächlich eingesetzt werden kann. Ähnlich VDI 3649 (1992, S. 2).

⁶¹⁰Die Nutzung mehrerer Regalwände führt zu einem redundanten System, da bei Belegung eines nach Spalte und Zeile definierten LP einer Regalwand ein freier, nach Spalte und Zeile gleicher LP einer anderen Regalwand genutzt werden kann. Gesamtverfügbarkeit μ_{ges} bei Redundanz, d. h. in einer Parallelschaltung von n Elementen, ergibt sich nach VDI 3649 (1992, S. 6) folgendermaßen: $\mu_{ges} = 1 - [(1 - \mu_1) \times (1 - \mu_2) \times \dots \times (1 - \mu_n)]$. Bei einem LFG von 84 % beträgt die mittlere Verfügbarkeit eines LP 16 %, d. h. $\mu_1 = 0,16$. Wird bei der LP-Zuordnung nur eine Regalwand beachtet, d. h. $n = 1$, so beträgt die mittlere Gesamtverfügbarkeit eines LP $\mu_{ges} = 1 - (1 - 0,16) = 1 - 0,84 = 0,16$. Die mittlere Gesamtverfügbarkeit bei zwei betrachteten Regalwänden, d. h. $n = 2$, beträgt $\mu_{ges} = 1 - [(1 - 0,16) \times (1 - 0,16)] = 1 - 0,84^2 = 0,29$.

Bei einem LFG von 84 % kann bei einem aHRL mit acht Gassen eine mittlere Verfügbarkeit von 94 % erreicht werden, wenn alle 16 Regalwände des aHRL berücksichtigt werden. Bei einem LFG von 96 % beträgt die Verfügbarkeit bei einer einzelnen Regalwand nur 4 %, kann aber bei Einbeziehung aller 16 Regalwände auf 48 % gesteigert werden (siehe fett markierte Werte in der Tabelle und eingetragene Werte im Diagramm in Abbildung 5.34).

Die neu entwickelte Strategie MVI+r/w vereint die LP-Zuordnung, die Regalwandzuordnung sowie die Gassenzuordnung⁶¹¹ für eine eingehende LE. Dabei reflektiert der Parameter r , wie bisher auch, den Toleranzfaktor, der die maximale Fahrzeitabweichung des aus Massesicht optimalen LP vom aus Verweildauersicht optimalen LP angibt. Der Parameter w steht für die Anzahl an Regalwänden, die bei der Identifikation eines optimalen LP einbezogen werden. Die Strategie fasst somit die normalerweise sequentielle⁶¹² Gassen- und LP-Zuordnung zu einer Entscheidung zusammen.

Der detaillierte Ablauf der Strategie MVI+r/w ist in Algorithmus 13 dargestellt. Zunächst werden das Verweildauerquantil α und das Massequantil β der eingehenden LE ermittelt.⁶¹³ Anschließend wird aus allen freien LP der ersten Regalwand der aus Verweildauersicht optimale LP ($LP_{Soll,optimal,VW}$) ausgewählt.⁶¹⁴ Danach werden - wie bei den Strategien MVIr und MVI+r - alle LP der Isochrone von $LP_{Soll,optimal,VW}$ sowie umliegender Isochronen in die Suche nach einem aus Massesicht optimalen LP einbezogen, ohne jedoch die Verfügbarkeit der LP zu beachten.⁶¹⁵ Gemäß Formel 5.14 auf Seite 137 wird in Schritt 5.(b) ein aus Massesicht optimaler LP der Regalwand 1 bestimmt. Nun werden alle LP der Menge $n_{LP,Iso,r,RW_{1...n}}$, d. h. alle zeitlich kompatiblen LP der betrachteten Regalwände, in Betracht gezogen, um die Verfügbarkeit des aus Massesicht optimalen LP zu erhöhen (Schritt 6.).

Tabelle 5.12 zeigt die Simulationsergebnisse der Anwendung der Strategie MVI+r/w im Basisszenario.⁶¹⁶ Dabei werden die Fahrzeiten (FZ) und Energiebedarfe (EB) zur Ein- und Auslagerung für eine variable Anzahl einbezogener Regalwände (hier: $w = 1...8$) und verschiedene Werte für den Toleranzfaktor r dargestellt. Durch Anwendung der Strategie MVI+r/w kann der Energiebedarf gegenüber der Strategie MVI+r für jeden gewählten Toleranzfaktor r noch weiter gesenkt werden. Bei einem Toleranzfaktor von $r = 35\%$ ergeben sich in allen Fällen die niedrigsten Fahrzeiten und Energiebedarfe. Werden acht Regalwände anstelle einer einzelnen Regalwand in die LP-Zuordnung einbezogen, so reduziert

⁶¹¹Da jede Regalwand einer Gasse zugeordnet ist, wird durch die Strategie mittelbar auch die Gasse für eine eingehende LE festgelegt.

⁶¹²Vgl. BRANDES (1997, S. 168).

⁶¹³Vgl. Abschnitt 4.2.3.2.

⁶¹⁴Unter der Prämisse gleicher Regalwände und RBG spielt es keine Rolle, ob nur eine einzelne oder mehrere Regalwände hier einbezogen werden.

⁶¹⁵Der Bereich der einzubeziehenden LP umliegender Isochronen wird erneut durch den Toleranzfaktor r festgelegt.

⁶¹⁶Die jeweils niedrigsten Werte für Fahrzeit und Energiebedarf sind mit einem „*“ gekennzeichnet. Die Bezeichnung MVI+r (siehe Abschnitt 5.3.7) ist dabei gleichbedeutend mit der Bezeichnung MVI+r/1.

Algorithmus 13 Strategie Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem Lagerfüllgrad und Toleranzfaktor r unter Beachtung mehrerer Regalwände w (MVI+r/w)

1. Bestimmung des Verweildauerquantils α der eingehenden LE nach Algorithmus 1
 2. Bestimmung des Massequantils β der eingehenden LE nach Algorithmus 2
 3. Bestimmung des aus Verweildauersicht optimalen Soll-LP $LP_{Soll,optimal,VW}$
 - (a) Sortiere alle LP der ersten Regalwand n_{LP,RW_1} nach aufsteigender Fahrzeit
 - (b) Ermittle Index $LP_{Soll,optimal,VW} = n_{LP,RW_1} \cdot \alpha$ (gerundet)
 4. Ermittlung der zeitlich kompatiblen LP
 - (a) Bestimme $t_{UP,LP_{Soll,VW,real}}$
 - (b) Bestimme die Menge $n_{LP,Iso,r,RW_{1...n}}$ der LP mit $t_{UP,LP_{Soll,VW,real}} \cdot (1 - r) \leq t_{UP,LP_i} \leq t_{UP,LP_{Soll,VW,real}} \cdot (1 + r)$ aller zu betrachtenden Regalwände
 - (c) Bestimme die Menge n_{LP,Iso,r,RW_1} der LP mit $t_{UP,LP_{Soll,VW,real}} \cdot (1 - r) \leq t_{UP,LP_i} \leq t_{UP,LP_{Soll,VW,real}} \cdot (1 + r)$ in Regalwand 1
 5. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Soll-LP
 - (a) Sortiere die Menge n_{LP,Iso,r,RW_1} nach absteigender Energiespannweite
 - (b) Index $LP_{Soll,optimal,Masse} = (1 - LFG) \cdot n_{LP,Iso,r,RW_1} + \beta \cdot LFG \times n_{LP,Iso,r,RW_1} = (1 - LFG + \beta \cdot LFG) \cdot n_{LP,Iso,r,RW_1}$ (gerundet)
 6. Bestimmung des aus Massesicht optimalen Ist-LP
 - (a) Ermittle $Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}$
 - (b) Auswahl des $LP_{Ist,optimal,Masse}$ aus der Menge $n_{LP,Iso,r,RW_{1...n}}$, der die Funktion $|Energiespannweite_{LP} - Energiespannweite_{LP_{Soll,optimal,Masse}}|$ minimiert
-

Strategie	Anzahl der berücksichtigten Regalwände w											
	$w = 1$		$w = 2$		$w = 4$		$w = 8$					
	FZ	EB	FZ	EB	FZ	EB	FZ	EB	FZ	EB	FZ	EB
MVI+	48,9 s	105,0 Wh	48,8 s	104,3 Wh	48,6 s	103,6 Wh	48,0 s	101,6 Wh				
MVI+5	48,8 s	103,3 Wh	48,7 s	102,7 Wh	48,4 s	101,6 Wh	47,9 s	99,9 Wh				
MVI+10	48,8 s	103,4 Wh	48,5 s	102,3 Wh	48,1 s	101,2 Wh	47,5 s	99,3 Wh				
MVI+15	48,5 s	102,4 Wh	48,0 s	101,1 Wh	47,5 s	99,7 Wh	46,9 s	98,1 Wh				
MVI+20	48,2 s	101,6 Wh	47,5 s	99,6 Wh	46,9 s	98,0 Wh	46,4 s	96,6 Wh				
MVI+25	47,1 s	98,5 Wh	46,7 s	97,5 Wh	46,5 s	96,8 Wh	45,9 s	95,4 Wh				
MVI+30	46,3 s	96,6 Wh	46,0 s	95,7 Wh	45,4 s	94,2 Wh	45,2 s	93,6 Wh				
MVI+35	*45,9 s	*95,9 Wh	*45,7 s	*94,7 Wh	*45,2 s	*93,7 Wh	*44,8 s	*92,6 Wh				
MVI+40	46,7 s	97,6 Wh	46,3 s	96,5 Wh	46,0 s	95,6 Wh	46,0 s	95,3 Wh				
MVI+45	47,4 s	99,6 Wh	46,8 s	97,8 Wh	46,5 s	96,8 Wh	46,4 s	96,4 Wh				
Ein-Zonen zufallsbasiert (RND1)	63,8 s	143,8 Wh										
Ein-Zonen <i>closest open location</i> (COL1)	57,0 s	126,9 Wh										
Zwei-Zonen <i>closest open location</i> (COL2)	49,7 s	109,1 Wh										
Energetische ABC-Zonierung (ENM3)	50,9 s	109,3 Wh										
Dynamische Zonierung (DYN)	48,7 s	106,5 Wh										

Tabelle 5.12: Fahrzeit (FZ) und Energiebedarf (EB) bei Anwendung der Strategie MVI+r/w im Basiszenario

Masse- spannweite	LFG		
	niedrig (78 %)	mittel (84 %)	hoch (90 %)
niedrig (300 kg)	Szenario #1: ΔFZ : -9,4 % ΔEB : -12,5 % $r_{opt} = 35\%$	Szenario #2: ΔFZ : -7,8 % ΔEB : -10,5 % $r_{opt} = 35\%$	Szenario #3: ΔFZ : -5,0 % ΔEB : -7,1 % $r_{opt} = 30\%$
mittel (700 kg)	Szenario #4: ΔFZ : -9,2 % ΔEB : -13,3 % $r_{opt} = 35\%$	Szenario #5: ΔFZ : -7,9 % ΔEB : -11,3 % $r_{opt} = 35\%$	Szenario #6: ΔFZ : -4,9 % ΔEB : -7,7 % $r_{opt} = 30\%$
hoch (1.100 kg)	Szenario #7: ΔFZ : -9,5 % ΔEB : -15,0 % $r_{opt} = 35\%$	Szenario #8 (Basisszenario): ΔFZ : -8,0 % ΔEB : -13,1 % $r_{opt} = 35\%$	Szenario #9: ΔFZ : -4,9 % ΔEB : -9,5 % $r_{opt} = 30\%$

Tabelle 5.13: Einsparungen hinsichtlich Fahrzeit (ΔFZ) und Energiebedarf (ΔEB) sowie r_{opt} in allen Szenarien bei Anwendung der Strategie MVI+r/w gegenüber den Referenzstrategien

sich die Fahrzeit gegenüber nur einer einzigen berücksichtigten Regalwand von 45,9 s auf 44,8 s, was einer Senkung um 1,2 s bzw. 2,5 % entspricht. Die Bezeichnung dieser Strategie lautet demnach MVI+35/8 (Toleranzfaktor $r = 35\%$, $w = 8$ Regalwände). Die erzielte Fahrzeit liegt um 3,9 s bzw. 8,0 % unter der bei Anwendung der bisherigen Referenzstrategie DYN. Der Energiebedarf sinkt bei acht berücksichtigten Regalwänden gegenüber einer einzelnen Regalwand (MVI+35/1) um 3,1 Wh von 95,7 Wh auf 92,6 Wh, was einer Einsparung von 3,2 % entspricht. Gegenüber der Strategie DYN beträgt die Energieeinsparung 13,9 Wh, was eine Reduktion um 13,1 % bedeutet. Die Werte der Fahrzeiten und Energiebedarfe für zwei bzw. vier berücksichtigte Regalwände ordnen sich zwischen den Werten für eine und acht Regalwände ein, wobei eine steigende Anzahl an Regalwänden stets zu sinkenden Fahrzeiten und Energiebedarfen führt.

Da sich bei Einbeziehung von acht Regalwänden die geringsten Werte für die Fahrzeit und den Energiebedarf ergeben, werden die restlichen Szenarien ebenfalls mit acht betrachteten Regalwänden untersucht. Tabelle 5.13 stellt die Einsparungen hinsichtlich Fahrzeit und Energiebedarf der Strategie MVI+r/w gegenüber der jeweiligen Referenzstrategie in allen neun Szenarien zusammen und führt als dritten Wert den jeweils optimalen Wert für den Toleranzfaktor r auf (Einsparung Fahrzeit; Einsparung Energiebedarf; optimaler Wert für den Toleranzfaktor r).

Die Fahrzeit und der Energiebedarf der Strategie MVI+r/w zeigen Änderungen in Abhängigkeit vom LFG: So führt die Strategie MVI+35/8 bei einem hohen LFG (Szenario #9) zu einem Energiebedarf von 99,5 Wh (-6,7 % gegenüber DYN) und einer Fahrzeit von 47,6 s (-2,3 % gegenüber DYN). Auch hier lassen sich die Energieeinsparungen bei

einem hohen LFG verbessern, wenn der Wert des Toleranzfaktors auf $r = 30\%$ verringert wird: So liegt der Energiebedarf bei der Strategie MVI+30/8 bei 96,6 Wh, was unterhalb des Wertes für einen Toleranzfaktor von 35% (99,5 Wh) liegt und den Referenzwert der Strategie DYN um 9,5% unterbietet. Eine Reduzierung der Fahrzeit von 46,4s (-4,9% gegenüber DYN) kann ebenfalls erzielt werden. Bei einem niedrigen LFG (Szenario #7) liegen der Energiebedarf bei 89,4 Wh (-16,0% gegenüber DYN; -15,0% gegenüber COL2) und die Fahrzeit bei 43,5s (-10,4% gegenüber DYN; -9,5% gegenüber COL2). Wie bei der Strategie MVI+r werden auch bei der Strategie MVI+r/w bei einem niedrigen LFG mehr LP mit hoher Energiespannweite bei der LP-Zuordnung ignoriert. Während bei einem niedrigen LFG die LP-Zuordnung auf LP mit möglichst geringer Energiespannweite beschränkt werden kann, ist dieser Effekt bei einem hohen LFG nur in geringerem Maße nutzbar. Es zeigt sich erneut der Zusammenhang, der schon bei den Strategien EMIR und MVI+r beobachtet wurde: Bei einem hohen LFG führt eine geringfügige Verringerung des Toleranzfaktors zu sinkenden Energiebedarfen sowie zu geringfügig sinkenden Fahrzeiten, während der optimale Wert für den Toleranzfaktor bei mittlerem LFG auch bei einem niedrigen LFG seine Gültigkeit behält.

Hinsichtlich der Massespannweite zeigen sich ebenfalls Änderungen beim Energiebedarf: Während bei einer mittleren Massespannweite (Szenario #5) die Fahrzeit 44,9s beträgt, steigt der Energiebedarf auf 94,5 Wh an. Bei einer niedrigen Massespannweite (Szenario #2) ergeben sich als Fahrzeit ebenfalls 44,9s und als Energiebedarf 95,3 Wh. Jedoch unterbieten selbst diese Werte die Fahrzeit und den Energiebedarf der Referenzstrategie DYN um 7,8% bzw. 10,5%. Dies bedeutet: Selbst wenn die Massespannweite nur geringe Möglichkeiten bietet, kann die Strategie MVI+r/w im Basisszenario Energieeinsparungen von 10,5% erzielen. Dadurch dass bei der Strategie MVI+r/w sowohl Abhängigkeiten zwischen den Messwerten und dem LFG als auch zwischen den Messwerten und der Massespannweite gemessen wurden, werden im Folgenden auch die Szenarien #1 und #4, d. h. ein niedriger LFG bei einer niedrigen bzw. mittleren Massespannweite untersucht. In diesen beiden Szenarien ist wiederum die Strategie COL2 die Referenz für die Fahrzeit und den Energiebedarf. Darüber hinaus werden die beiden Szenarien #3 und #6, d. h. ein hoher LFG bei einer niedrigen bzw. mittleren Massespannweite untersucht. In diesen beiden Szenarien ist, wie auch im Basisszenario, die Strategie DYN die Referenz.

Dabei werden im Szenario #7, d. h. bei niedrigem LFG und hoher Massespannweite, die höchsten Einsparungen hinsichtlich Fahrzeit (-9,5%) und Energiebedarf gegenüber der bisherigen Referenzstrategie COL2 erzielt. Dies bedeutet, dass MVI+35/8 sowohl deutlich schneller als die bisher schnellste und energiesparendste Strategie (COL2) ist. Im ungünstigsten Szenario, d. h. im Szenario #3 bei hohem LFG und niedriger Massespannweite, liegen die Fahrzeit um 5,0% und der Energiebedarf um 7,1% unter den entsprechenden Werten der bisherigen Referenzstrategie DYN. Dies bedeutet, dass selbst

unter den schlechtesten Voraussetzungen, d. h. wenn die geringe Massespannweite und der hohe LFG nur geringe Potentiale zur Energieeinsparung bieten, die Strategie MVI+r/w dennoch signifikante Reduktionen hinsichtlich Fahrzeit und Energiebedarf gegenüber den bisher bekannten Strategien erzielt.⁶¹⁷

Es ist zu beachten, dass durch die Einbeziehung mehrerer Regalwände in die LP-Zuordnung die Rechenlast zur Auswahl eines LP aufgrund der notwendigen Sortierung der Tabelle LP-Verwaltung⁶¹⁸ ansteigt. Dabei bleibt die Rechenzeit jedoch weiterhin im Bereich von Sekundenbruchteilen, so dass keine Nachteile im produktiven Einsatz dieser Strategie zu befürchten sind. Die Strategie berücksichtigt neben der Fahrzeit und dem Energiebedarf keine weiterführenden Zielstellungen, z. B. eine Querverteilung⁶¹⁹, bei der Auswahl einer Regalwand. Sollte es im Produktivbetrieb gewünscht sein, beispielsweise den Bestand eines Artikels über alle Gassen gleichzeitig zu verteilen, so ist denkbar, die Anzahl der zu berücksichtigenden Regalwände in Abhängigkeit vom einzulagernden Artikel dynamisch zu variieren. Somit können die Vorteile der Energieeinsparungen und der gassenübergreifenden Verfügbarkeit des Artikels kombiniert werden.

5.4 Diskussion der Ergebnisse und wirtschaftliche Bewertung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Ansatzpunkte zur Reduktion des Energiebedarfs von Ein- und Auslagerungen in aHRL identifiziert:⁶²⁰

1. Die Nutzung des mittleren Energiebedarfs anstelle der Fahrzeit der LP,
2. die Nichtnutzung von LP mit hohem mittleren Energiebedarf⁶²¹ bei einem $LFG < 1$,
3. die Masseverteilung in der Regalwand entsprechend der Energiespannweite der LP,
4. die Einbeziehung umliegender Isochronen in die LP-Zuordnung durch Einbau eines Toleranzfaktors r sowie
5. die Einbeziehung mehrerer Regalwände bei der LP-Zuordnung.

Diese Punkte wurden in neu entwickelte Lagerstrategien integriert. Diese Lagerstrategien wurden bekannten Strategien hinsichtlich Fahrzeit und Energiebedarf in einem Simulationsmodell gegenübergestellt. In den einzelnen Strategien wurden inhärente Parameter variiert, z. B. die Werte für den Toleranzfaktor r , und die jeweils besten Ausprägungen der Parameter dokumentiert.

⁶¹⁷Bei einem hohen LFG gelten die Werte wiederum für eine Toleranzfaktor von 30 %.

⁶¹⁸Vgl. Abschnitt 4.2.4.2.1.

⁶¹⁹Vgl. Abschnitt 3.3.5.2.2.

⁶²⁰Vgl. Abschnitt 5.1.

⁶²¹Bzw. Nichtnutzung von LP mit einer hohen Energiespannweite. Vgl. Fußnote 589.

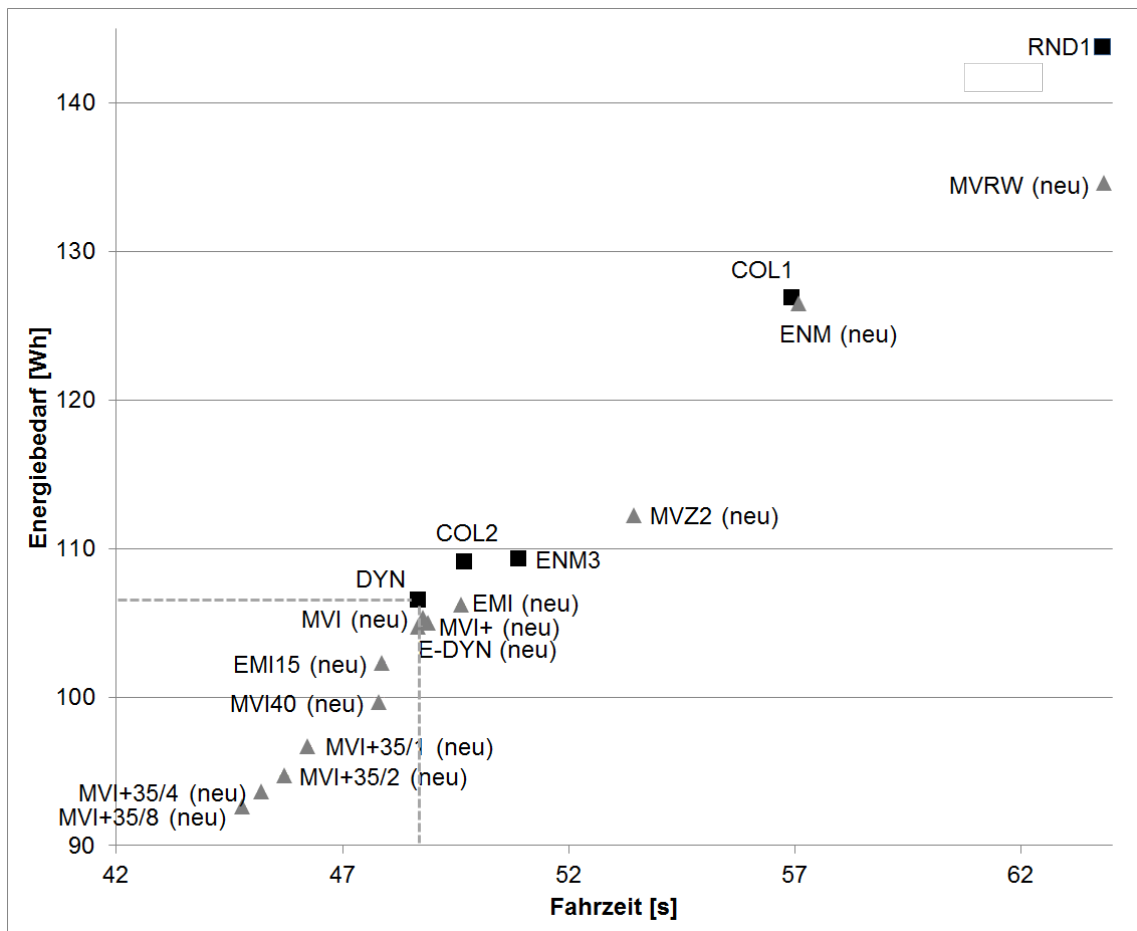


Abbildung 5.35: Gesamtdarstellung der untersuchten Lagerstrategien (eigene Darstellung)

Abbildung 5.35 fasst die erzielten Simulationsergebnisse für das Basisszenario zusammen. Dabei sind die Fahrzeiten (x-Achse) und Energiebedarfe (y-Achse) der bestehenden Strategien RND1, COL1, COL2, ENM3 und DYN⁶²² durch schwarze Quadrate markiert.

Die in dieser Arbeit neu entwickelten Strategien

- Ein-Zonen energieminimal (ENM1) (Abschnitt 5.2.2),
- Energetische dynamische Zonierung (E-DYN) (Abschnitt 5.2.3),
- Energieminimal in der Isochrone (EMI) (Abschnitt 5.2.4),
- Energieminimal in der Isochrone mit Toleranzfaktor r (EMIr)⁶²³ (Abschnitt 5.2.5),
- Masseverteilung in der Regalwand (MVRW) (Abschnitt 5.3.2),
- Masseverteilung in zwei Zonen (MVZ2) (Abschnitt 5.3.3),
- Masseverteilung in der Isochrone (MVI) (Abschnitt 5.3.4),
- Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem LFG (MVI+) (Abschnitt 5.3.5),
- Masseverteilung in der Isochrone mit Toleranzfaktor r (MVIr)⁶²⁴ (Abschnitt 5.3.6),
- Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem LFG und Toleranzfaktor r (MVI+r)⁶²⁵ (Abschnitt 5.3.7) und
- Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem LFG und Toleranzfaktor r unter Beachtung mehrerer Regalwände (MVI+r/w)⁶²⁶ (Abschnitt 5.3.8)

sind in der Abbildung 5.35 durch graue Dreiecke markiert und mit dem Zusatz „(neu)“ gekennzeichnet. Je weiter „unten“ eine Markierung im Diagramm liegt, desto geringer ist der Energiebedarf pro Ein- und Auslagerungsfahrt und desto energieeffizienter arbeitet die Strategie. Je weiter „links“ eine Markierung im Diagramm liegt, desto geringer ist die Fahrzeit pro Ein- und Auslagerungsfahrt und desto höher ist der durch die Strategie erzielbare Umschlag. Markierungen, die sich innerhalb des durch die horizontale und die vertikale gestrichelte Linie begrenzten Bereichs befinden, übertreffen die Referenzstrategie des Basisszenarios, DYN, hinsichtlich Umschlag und Energieeffizienz. Dabei lassen sich die folgenden Aussagen treffen:

⁶²²Ein-Zonen-Strategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zone (RND1), Ein-Zonen-Strategie mit Auswahl der *closest open location* innerhalb der Zone (COL1), Zwei-Zonen-Strategie mit Auswahl der *closest open location* innerhalb der Zonen (COL2), energetische ABC-Zonierung (ENM3) und Dynamische Zonierung (DYN). Vgl. Abschnitt 4.2.4.2.4.

⁶²³In Abbildung 5.35 ist die Variable r durch den Optimalwert ersetzt.

⁶²⁴In der Abbildung ist die Variable r durch den Optimalwert ersetzt.

⁶²⁵In der Abbildung ist die Variable r durch den Optimalwert ersetzt.

⁶²⁶In der Abbildung sind die Variablen r und w durch die Optimalwerte ersetzt.

- Bei Lagerstrategien, die weder die Verweildauer noch die Fahrzeiten der LE in der LP-Zuordnung betrachten, führt die neu entwickelte Strategie MVRW im Basisszenario bei gleicher Fahrzeit zu einem um 6,3 % niedrigeren Energiebedarf als die bestehende Strategie RND1. Die Einsparungen der Strategie MVRW gegenüber der Strategie RND1 sind in ihrem Betrag unabhängig vom LFG und umso höher, je größer die jeweilige Massespannweite ist.
- Bei den Strategien, die die Verweildauer der LE ignorieren, jedoch die Fahrzeiten bzw. die mittleren Energiebedarfe der LP bei der LP-Zuordnung beachten, gibt es nur geringfügige Unterschiede zwischen der bestehenden Strategie COL1 und der neu entwickelten Strategie ENM. Während erstere den freien LP mit der geringsten Fahrzeit bevorzugt, favorisiert die zweite den freien LP mit dem geringsten Energiebedarf der Ein- und Auslagerungsfahrt. Dabei erzielt die Strategie COL1 geringfügig bessere Fahrzeiten, während die Strategie ENM1 zu minimalen Einsparungen (-0,3 %) hinsichtlich des Energiebedarfs führt. Die Höhe der Energieeinsparungen gegenüber der Strategie COL1 ist relativ unabhängig vom LFG.
- Bei Strategien mit statischer Zonierung wurde als Alternative zu den bekannten Strategien COL2 und ENM3 die Strategie MVZ2 entwickelt, die eine optimale Masseverteilung der LE innerhalb der beiden Zonen (Schnell- und Langsamläufer) anstrebt. Da die Strategie MVZ2 nicht von der Auslassung ineffizienter LP in Zeiten mit einem $LFG < 1$ profitiert, liegen sowohl die Fahrzeit (+7,6 % gegenüber COL2) als auch der Energiebedarf (+ 2,3 % gegenüber COL2) über den Werten der Strategien COL2 und ENM3.
- Die Strategie DYN wurde in Kapitel 4 als die im Basisszenario hinsichtlich Fahrzeit und Energiebedarf beste bekannte Strategie identifiziert und diente als Referenz zur Bewertung neu entwickelter Strategien. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher verschiedene Strategien mit dynamischer Zonierung entwickelt, die zusätzlich eine energetische Optimierung bezwecken. Alle diese Strategien erzielten im Vergleich zur Strategie DYN Energieeinsparungen. Hierzu zählen beispielsweise die Strategien E-DYN und EM1r, die beide auf Basis der mittleren Energiebedarfe der LP eine LP-Zuordnung realisieren. Insgesamt weisen alle Strategien, die auf eine Nutzung des mittleren Energiebedarfs je LP setzen, im Basisszenario nur geringe Energieeinsparungen auf (E-DYN: - 1,7 %, EM15: - 4,0 %, jeweils gegenüber DYN im Basisszenario). Die höchsten Einsparungen (- 10,0 % gegenüber DYN im Basisszenario) konnten im Falle einer Masseverteilung in der Isochrone erzielt werden, wenn neben dem aktuellen LFG auch ein Toleranzfaktor r bei der Bestimmung eines optimalen LP beachtet wird (MVI+r). Dabei konnte eine Abhängigkeit des optimalen Toleranzfaktors r vom aktuellen LFG identifiziert werden. Als positiver Nebeneffekt konnten

zudem sinkende Fahrzeiten (- 5,6 % gegenüber DYN im Basisszenario) erzielt werden, was auf die Nichtnutzung von LP mit hoher Energiespannweite in Zeiten eines $LFG < 1$, die gleichzeitig häufig hohe Fahrzeiten aufweisen⁶²⁷, zurückzuführen ist.

- Die Einbeziehung mehrerer Regalwände in die Bestimmung eines optimalen LP führte in der Strategie MVI+r/w sowohl zu einem sinkenden Energiebedarf als auch zu sinkenden Fahrzeiten gegenüber nur einer einzelnen berücksichtigten Regalwand. Die durch die Strategie MVI+r/w erzielten Fahrzeiten und Energiebedarfe sind dabei in allen untersuchten Szenarien, d. h. bei allen untersuchten LFG, aber auch bei allen untersuchten Massespannweiten, den Werten der bisherigen Referenzstrategien (Einsparungen je Szenario: 7,1-15 % des Energiebedarfs sowie 4,9-9,5 % der Fahrzeit, jeweils gegenüber der Referenzstrategie) deutlich überlegen.

Abschließend stellt sich die Frage nach den monetären Auswirkungen energieeffizienter Lagerstrategien. Hierüber soll das nachfolgende Rechenbeispiel Aufschluss geben. Basis sind die Daten des in Abschnitt 4.1 beschriebenen aHRL. Darüber hinaus wird ein Zweischichtbetrieb an sechs Tagen pro Woche mit 16 Arbeitsstunden je Tag und 302 Arbeitstagen (AT) pro Jahr zu Grunde gelegt. Als Arbeitspreis werden 0,1502 EUR pro kWh verwendet. Dies entspricht dem mittleren Arbeitspreis in Deutschland Ende 2013.⁶²⁸ Pro Stunde werden je 25 Ein- und Auslagerungen je Gasse angenommen.

Im Basisszenario wird der Energiebedarf einer Ein- und Auslagerungsfahrt bei Anwendung der Strategie RND1⁶²⁹ und bei Anwendung der Strategie MVI+35/8 verglichen. Die Strategie MVI+35/8 ordnet eingehenden LE eine aus Verweildauersicht optimale Isochrone zu und sucht anschließend in acht Regalwänden einen aus Massesicht optimalen LP im Bereich von +/- 35 % der Fahrzeit der zunächst gewählten Isochrone.⁶³⁰ Diese Strategie weist mit einer mittleren Einsparung von 51,2 Wh des Energiebedarfs der Ein- und Auslagerungsfahrten (EAF) gegenüber der Strategie RND1 den geringsten Energiebedarf aller im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten Strategien auf. Auf Basis der o. g. Eingangsgrößen lässt sich die jährliche Einsparung je RBG gemäß Formel 5.15 bestimmen:

$$Einsparung_{RBG,Jahr} = 302 \frac{AT}{Jahr} \cdot 16 \frac{h}{AT} \cdot 25 \frac{EAF}{Stunde} \cdot 51,2 \frac{Wh}{EAF} \cdot 0,1502 \frac{EUR}{kWh} = 928,98 \frac{EUR}{Jahr} \quad (5.15)$$

Bei einem aHRL mit acht RBG summiert sich die jährliche Einsparung auf 7.432 EUR.

⁶²⁷ Vgl. Abbildungen 5.1 und 5.12.

⁶²⁸ Vgl. BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V. (Hrsg.) (2013, S. 16).

⁶²⁹ Nach SCHUMACHER (2012, S. 226) wird „in den meisten Fällen eine so genannte chaotische Lagerverwaltung [= RND1] eingesetzt.“ Vgl. auch Fußnote 443.

⁶³⁰ Vgl. Abschnitt 5.3.8.

Hierbei muss beachtet werden, dass mit dem mechanischen Energiebedarf gerechnet wird und demnach ein elektrischer Wirkungsgrad von $\eta_{elektrisch} = 1$ bei der Bestimmung der Energiekosten unterstellt wird. In realen Systemen mit $\eta_{elektrisch} < 1$ sind die erzielten 51,20 Wh mechanische Einsparungen daher durch den dabei erzielten mittleren elektrischen Wirkungsgrad zu dividieren, um die elektrischen Einsparungen zu beziffern. Dies führt dazu, dass die elektrischen Einsparungen höher als die mechanischen Einsparungen sind.

Die jährlichen Einsparungen von hier 7.432 EUR treten jedoch in der gesamten Anlagennutzungsdauer auf. Hierfür wird im Folgenden eine Nutzungsdauer von 20 Jahren zu Grunde gelegt, womit sich in Summe Einsparungen in Höhe von 148.637 EUR ergeben. Unterstellt man einen weiteren jährlichen Anstieg des Arbeitspreises pro kWh um den mittleren Anstieg zwischen den Jahren 2000 und 2013, d. h. um 7,25 % pro Jahr⁶³¹, so ergeben sich in 20 Jahren Einsparungen in Höhe von 312.957 EUR.

Im Fall eines aHRL, das zur LP-Zuordnung die bisherige Referenzstrategie DYN verwendet, lassen sich je Ein- und Auslagerungsfahrt immer noch 13,9 Wh einsparen. Unter ansonsten gleichen Annahmen ergeben sich somit je RBG 253 EUR Einsparung pro Jahr, was bei einem aHRL mit acht RBG in Summe 2.023 EUR bedeutet. Über die Nutzungsdauer von 20 Jahren ergeben sich 40.469 EUR Einsparung, falls kein Anstieg des Arbeitspreises pro kWh unterstellt wird. Geht man jedoch ebenfalls von einem kontinuierlichen Anstieg des Arbeitspreises um 7,25 % pro Jahr aus, so ergeben sich Einsparungen in Höhe von 85.207 EUR im Rahmen der Nutzungsdauer der Anlage.

Die hier getroffenen Annahmen gehen von einem Auslastungsgrad des RBG von 89 %⁶³², der Durchführung von Doppelspielen und einem balancierten aHRL⁶³³, d. h. einem konstanten LFG, aus. Auch wenn Realsysteme abweichende Parameter aufweisen sollten, so zeigen die Kalkulationen dennoch das langfristig hohe Potential energieeffizienter Lagerstrategien in aHRL auf. Darüber hinaus weisen moderne Anlagen häufig höhere kinematische Parameter und demnach höhere erzielbare Umschläge als die fast 20 Jahre alten RBG des modellierten Realsystems auf, wodurch sich wesentlich höhere als die o. g. Einsparungen ergeben. Von besonderer Bedeutung ist hierbei der überschaubare Aufwand zur Implementierung energieeffizienter Lagerstrategien: So erfordert die Umsetzung lediglich eine Programmierung im LVS sowie eine einmalige energetische Bewertung der RBG⁶³⁴ und der Regalwand⁶³⁵, wobei die in den entsprechenden Untersuchungen gewon-

⁶³¹Nach BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V. (Hrsg.) (2013, S. 14) betrug der Arbeitspreis pro kWh im Jahr 2000 0,0605 EUR und Ende 2013 0,1502 EUR, was einer Steigerung um 148,26 % entspricht. Das geometrische Mittel der Steigerung beträgt 7,25 % pro Jahr.

⁶³²Dieser Wert orientiert sich an den Ausführungen von SCHWARZ/ GRAVES/ HAUMAN (1978, S. 264), die in ihren Untersuchungen von einem Auslastungsgrad von 90 % ausgehen („*This level of utilization should reflect a realistic tradeoff between the cost of idle resources and the cost of poor system response*“).

⁶³³Vgl. Abschnitt 2.4.1.2.

⁶³⁴Zur Ermittlung der energiebedarfsbestimmenden Parameter je RBG, z. B. der Reibungskoeffizienten.

⁶³⁵Zur Ermittlung der Energiespannweite je LP.

nenen Ergebnisse aus Anbietersicht für zukünftige Kundenprojekte genutzt werden können. Zusätzlich zum quantifizierbaren Effekt sinkender Energiebedarfe sind weitere, nur teilweise quantifizierbare positive Nebeneffekte zu verzeichnen: So kann im Basisszenario bei Anwendung der Strategie MVI+35/8 die Fahrzeit der Ein- und Auslagerungsfahrten im Vergleich zur Referenzstrategie DYN um 8,0 % gesenkt werden, was insbesondere in Spitzenlastzeiten helfen kann, um wartende Einlagerungen schneller durchzuführen und eilige Kundenaufträge schneller bearbeiten zu können. Darüber hinaus werden durch eine optimale Masseverteilung Hubbewegungen mit schweren Lasten reduziert, was zu einem reduzierten Verschleiß des Hubwerks beitragen kann. Durch die Steuerung der Masseverteilung mittels Lagerstrategien kann die Auslegung der Traversen nach der maximalen Feldlast dahingehend optimiert werden, dass bei Regalfächern mit geringen LE-Massen kostengünstigere Traversen für geringe Feldlasten verbaut werden. Nicht zuletzt lässt sich der Einsatz ausgefeilter, energieeffizienter Lagerstrategien sowohl auf der Seite der Anbieter als auch auf der Seite der Betreiber von aHRL nutzen, um ökologisches Handeln zu betonen, entsprechende Marketingaktivitäten zu unterstützen und im Rahmen von Öko-Audits zu einer positiven Bewertung beizutragen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse

Lagerstrategien stellen ein Kernelement zum effizienten Betrieb von aHRL dar. In bisherigen Untersuchungen wurden häufig nur bereits bekannte Strategien zur LP-Zuordnung⁶³⁶ in verschiedenen Szenarien untersucht.⁶³⁷ Darüber hinaus liegen seit den Arbeiten von HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES verschiedene Untersuchungen zur Optimierung von bekannten Strategien vor.⁶³⁸ Bereits veröffentlichte Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz in AKL führen im untersuchten Fall eines aHRL zu einer höheren Fahrzeit und einem höheren Energiebedarf als umschlagsoptimierende Strategien.⁶³⁹

In dieser Arbeit wurden neuartige, energieeffiziente Lagerstrategien für aHRL entwickelt und bewertet, die gegenüber den bisher bekannten Strategien signifikante Einsparungen hinsichtlich des Energiebedarfs von Ein- und Auslagerungsfahrten erzielen. Darüber hinaus werden als positiver Nebeneffekt sinkende Fahrzeiten erreicht. In der Arbeit wurde wie folgt vorgegangen:

Im Kapitel 2 wurden die Grundlagen von aHRL erläutert. Dabei lag ein Hauptaugenmerk auf der Beschreibung der Elemente und der Prozesse in aHRL. Im anschließenden Kapitel 3 wurden Ansatzpunkte zur Verbesserung der Energieeffizienz von aHRL strukturiert. Dabei lag der Fokus der Analysen auf Lagerstrategien, die, im Gegensatz zu konstruktiven oder elektrotechnischen Maßnahmen zur Optimierung der Energieeffizienz von aHRL, nur geringen Programmieraufwand erfordern und automatisiert im LVS angewendet werden.

Zur Bewertung der Fahrzeiten und Energiebedarfe bekannter und neu entwickelter Lagerstrategien wurde ein Simulationsmodell erstellt, das u. a. die LP-Verwaltung, die RBG-Steuerung sowie die RBG-Bewegung abbildet und diese Ebenen mittels eines Systems zur Datenkommunikation verknüpft. Als Teilmodell zur validen Abbildung der Leistungsaufnahmen der RBG wurde ein Berechnungsansatz aus dem Projekt GREENRBG genutzt, das vom INSTITUT FÜR STEUERUNGSTECHNIK DER WERKZEUGMASCHINEN UND FERTIGUNGSEINRICHTUNGEN (ISW) der UNIVERSITÄT STUTTGART erstellt wurde. Die Analyse bekannter Strategien zur LP-Zuordnung ergab einen Zusammenhang zwischen den erzielbaren Fahrzeiten und dem entstehenden Energiebedarf. Hierbei kommt zum Tragen, dass zeiteffiziente Lagerstrategien zum häufigen Anfahren von LP nahe dem ÜP führen, was sich infolge kurzer Wegstrecken, geringer Hubhöhen und geringer erzielter

⁶³⁶Vgl. Abschnitt 3.3.5.2.3.

⁶³⁷Vgl. beispielsweise die Dissertationen von BRANDES (1997), SCHUMANN (2008) und SEEMÜLLER (2005) sowie der Artikel von GAGLIARDI/ RENAUD/ RUIZ (2012).

⁶³⁸Vgl. beispielsweise GLASS (2008) bezüglich der Dynamisierung der Zonierung sowie GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990) zur Beachtung der LE-individuellen Verweildauer an Stelle der mittleren Verweildauer aller LE eines Artikels bei der LP-Zuordnung.

⁶³⁹Vgl. Abschnitt 4.4.

Geschwindigkeiten in geringen Reib-, Hub- und Beschleunigungsarbeiten niederschlägt. Insbesondere die dynamische Zonierung (DYN) nach GLASS führte dabei neben der bekannt niedrigen Fahrzeit auch zu einem geringen Energiebedarf im Basisszenario.

Die Erkenntnisse aus der Analyse bekannter Lagerstrategien bildeten anschließend die Grundlage zur Entwicklung eigener, neuartiger Lagerstrategien, die eine Verbesserung der Energieeffizienz von Ein- und Auslagerungen unter Beibehaltung des Umschlags anstreben. Auf Basis definierter Eigenschaften eingehender LE, namentlich der Verweildauer und der Masse, kann dabei ein aus Verweildauersicht passender LP ausgewählt werden. Besondere Bedeutung kommt anschließend den Isochronen, d. h. LP einer Regalwand mit gleichen Fahrzeiten zum ÜP, zu. So führt insbesondere die Anordnung einer eingehenden LE auf der Ziel-Isochronen entsprechend der LE-Masse zu signifikanten Einsparungen im mittleren Energiebedarf, ohne jedoch negative Auswirkungen auf die mittleren Fahrzeiten mit sich zu bringen. Stattdessen führt die Nutzung einer effektiven Lagerfläche innerhalb der Isochronen zu einer Verdichtung der LP-Belegung und somit zum positiven Nebeneffekt geringfügig sinkender mittlerer Fahrzeiten. Unter Beachtung mehrerer Regalwände bei der LP-Zuordnung (Strategie $MVI+r/w$ ⁶⁴⁰) können so im Basisszenario Einsparungen von über 13 % des Energiebedarfs sowie 8 % der Fahrzeit von Ein- und Auslagerungsfahrten gegenüber der bisherigen Referenzstrategie DYN erzielt werden. Selbst im ungünstigsten Szenario werden Einsparungen in Höhe von 5 % der Fahrzeit und über 7 % des Energiebedarfs erzielt. Hierbei ist zu beachten, dass die erst 2005 entwickelte Strategie DYN gegenüber Strategien, die in der Praxis häufig Verwendung finden, wie beispielsweise die Strategie RND1⁶⁴¹, bereits deutliche Einsparungen hinsichtlich Fahrzeit und Energiebedarf aufweist. Gegenüber RND1 führen die in dieser Arbeit entwickelten Strategien im Basisszenario zu Einsparungen von fast 36 % des Energiebedarfs sowie von fast 30 % der Fahrzeit. In Abschnitt 5.4 wurde dazu ein Rechenbeispiel abgebildet, in dem sich gegenüber der Strategie RND1 Einsparungen von über 300.000 EUR im Nutzungszeitraum des achtgassigen aHRL ergeben.

Die Nutzung einer Masseverteilung in der Isochrone mit aktuellem LFG und Toleranzfaktor r unter Beachtung mehrerer Regalwände w ($MVI+r/w$) zur LP-Zuordnung stellt somit insbesondere bei Beständen mit hoher Massespannweite einen vielversprechenden Ansatz zur Reduktion der Energiebedarfe bei Verbesserung der Fahrzeiten dar und erhöht somit sowohl die Energieeffizienz als auch den Umschlag des aHRL.⁶⁴²

Eine Studie der Unternehmensberatung ACCENTURE führt an, dass 70 % der befragten Verbraucher die bei der Herstellung, Logistik und Verpackung entstandenen CO₂-Emissionen als wichtiges Kaufkriterium beim Lebensmittelkauf erachten und 75 % der

⁶⁴⁰Vgl. Abschnitt 5.3.8.

⁶⁴¹Ein-Zonen-Strategie mit zufallsbasierter LP-Zuordnung innerhalb der Zone. Vgl. Abschnitte 3.3.5.2.3, 4.2.4.2.4 und 4.4.

⁶⁴²Vgl. Abschnitt 5.3.8.

Untersuchungsteilnehmer Händler bevorzugen, denen sie umweltbewusstes Verhalten attestieren.⁶⁴³ Unter Beachtung dieser Kundenanforderungen verwundert es nicht, dass in einer Studie der BUNDESVEREINIGUNG LOGISTIK 62 % der befragten Logistikmanager angeben, durch eine umwelt- und ressourceneffiziente Logistik Wettbewerbsvorteile im internationalen Wettbewerb erzielen zu wollen. Durch steigende Umwelt- und Ressourcenschutzanforderungen befürchten jedoch, je nach Branche, 62-83 % der befragten Unternehmen finanzielle Einbußen.⁶⁴⁴ Zur Kompensation von CO₂-Emissionen werden beispielsweise finanzielle Mittel in Wiederaufforstungsprojekte investiert.⁶⁴⁵ Dies führt dazu, dass aus Unternehmenssicht sowohl der Energiebedarf als auch die CO₂-Kompensation finanziert werden müssen. Die in dieser Arbeit vorgestellten Lagerstrategien ermöglichen eine Reduzierung des Energiebedarfs bei sinkenden Fahrzeiten und sind mit keinen Kosten im Betrieb des aHRL verbunden; das aHRL ist lediglich energetisch zu bewerten, die Strategien sind zu programmieren und die mittleren Energiebedarfe bzw. die Energiespannweiten der LP sind im LVS zu hinterlegen. Darüber hinaus können sinkende Fahrzeiten in Zeiten hoher Auslastung Wartezeiten für Ein- und Auslagerungen reduzieren, wodurch Staueffekte in der Lagervorzone vermieden und die zeitnahe Erfüllung eiliger Kundenaufträge unterstützt werden können.

Hinzu kommt der Effekt, dass sich nach SCHEID die Anbieter von aHRL kaum durch niedrige Verkaufspreise auf dem Markt positionieren können, da die RBG-Herstellung nur geringe Potentiale für wirtschaftliche Skaleneffekte bietet.⁶⁴⁶ Systemanbieter können jedoch ausgereifte Lagerstrategien als Marketing-Instrumente nutzen und energieeffiziente Produkte und Dienstleistungen in ihre Angebotspalette integrieren. Der Budgeteffekt der reduzierten Energiekosten auf Anwenderseite wird somit ergänzt um einen Innovationseffekt auf Anbieterseite, der zu einem Wettbewerbsvorsprung und steigenden Umsatzerlösen führen kann.⁶⁴⁷ Die wirtschaftliche Relevanz der Steigerung der Energieeffizienz für die Intralogistik belegen auch Aussagen aus der Industrie: „Green Logistics hat sich als Management-Strategie etabliert. Themen wie CO₂-Footprint und Energieeinsparung sind für viele Unternehmen kritische Faktoren, entsprechend groß ist die Bedeutung von Effizienzmaßnahmen für den ökonomischen Erfolg. Energiekosten sind dabei sicher ein wesentlicher Treiber, aber nicht der einzige“⁶⁴⁸.

⁶⁴³Vgl. ACCENTURE (Hrsg.) (2007).

⁶⁴⁴Vgl. BUNDESVEREINIGUNG LOGISTIK (BVL) E. V. (Hrsg.) (2008, S. 9f).

⁶⁴⁵Vgl. KOCH (2012, S. 323).

⁶⁴⁶Vgl. SCHEID (2004, S. 56).

⁶⁴⁷Vgl. BLES/ KESSLER (2013, S. 332-334) zu energie- und volkswirtschaftlichen Effekten einer gesteigerten Energieeffizienz.

⁶⁴⁸HEITZER (2013, S. 13).

6.2 Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten

Lagerstrategien für aHRL, die auf eine Reduktion der mittleren Fahrzeiten abzielen, sind seit den 1970er Jahren Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten und finden selbst zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch reges Interesse in wissenschaftlichen Untersuchungen. Im Gegensatz dazu sind Lagerstrategien, die auf eine Verringerung des Energiebedarfs von AKL oder aHRL abzielen, als Folge der in der Einleitung genannten veränderten Rahmenbedingungen, erst seit wenigen Jahren im Fokus von Wissenschaft und Praxis. Die vorliegende Arbeit bietet einen Beitrag zur Verbesserung beider Ziele, d. h. sowohl zur Reduktion der Fahrzeiten als auch der Energiebedarfe zur Durchführung von Ein- und Auslagerungen. Dabei bildete ein spezifisches, real existierendes aHRL die Basis zur Entwicklung des verwendeten Modells. Aufgrund der spezifischen Parameter des aHRL, zu denen kinematische Parameter, Reibungskoeffizienten, Massen oder Abmessungen zählen, können die gewonnenen Ergebnisse nur einen Anhaltspunkt für andere aHRL bieten. Während die Fahrzeiten relativ einfach durch die Werte für Beschleunigungen und Maximalgeschwindigkeiten approximiert werden können, bedarf die Erstellung und Verwendung von Energiemodellen oftmals detaillierter Untersuchungen realer Anlagen.

Ungeachtet des damit verbundenen Aufwands bleibt jedoch die Erkenntnis, dass die Energieeffizienz von Intralogistiksystemen im Allgemeinen und von aHRL im Speziellen infolge steigender Energiepreise und immer anspruchsvoller werdender Rahmenbedingungen in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen wird: So stieg beispielsweise der Preis für Industriestrom in Deutschland zwischen den Jahren 2000 und 2013 um 148 %.⁶⁴⁹ Gleichwohl möchte die EU-Kommission bis zum Jahr 2030 die Energieeinsparungen in der EU forcieren⁶⁵⁰, was eine Verschärfung der Rahmenbedingungen für intralogistische Systeme und Anlagen bedeutet.

Zukünftige Forschung im Bereich energieeffizienter Lagerstrategien für aHRL sollte sich vier Fragestellungen annehmen:

- In der vorliegenden Arbeit wurden die Strategien am Beispiel des Modells eines real existierenden aHRL erprobt. Weitere Untersuchungen des Autors⁶⁵¹ ergaben, dass die Strategien $MVI+r$ ⁶⁵² und $MVI+r/w$ ⁶⁵³ bei gleichem LFG zu höheren pro-

⁶⁴⁹Nach BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT e.V. (Hrsg.) (2013, S. 16) betrug der durchschnittliche Strompreis für die Industrie inklusive Stromsteuer im Jahr 2000 0,0605 EUR und im Jahr 2013 0,1502 EUR. Dabei erhöhte sich der Preis für die Erzeugung, den Transport und den Vertrieb um 42 % auf 0,0776 EUR, während die EEG-Umlage um 2.539 % auf 0,05277 EUR stieg.

⁶⁵⁰Vgl. FRIEDRICH (2014, S. 7).

⁶⁵¹Vgl. beispielsweise HOPPE/ SOMMER (2013) sowie SOMMER/ WEHKING (2013).

⁶⁵²Vgl. Abschnitt 5.3.7.

⁶⁵³Vgl. Abschnitt 5.3.8.

zentualen Einsparungen führen, wenn *square in time*-Regalwände⁶⁵⁴ vorliegen.⁶⁵⁵ Daher sollten die Auswirkungen der Strategien, aber auch der Strategieparameter, wie des Toleranzfaktors r , in verschiedenen Umgebungen untersucht werden. In der vorliegenden Arbeit wurden die entwickelten Lagerstrategien mit einem mechanischen Energiemodell eines mit einer Zwischenkreiskopplung ausgerüsteten RBG erprobt. Künftige Untersuchungen sollten daher auch alternative elektrotechnische Konfigurationen von RBG, v. a. unter Nutzung von Energierückspeiseeinrichtungen, berücksichtigen. Darüber hinaus sollten Untersuchungen der entwickelten Strategien in anderen mechanischen Szenarien durchgeführt werden, z. B. bei RBG mit Leichtbau-Masten oder in reibungsoptimierten Systemen. Zu untersuchen ist hier, ob die bei Anwendung der vorgestellten Strategien erzielbaren Energieeinsparungen steigen, wenn der energetische Aufwand für nicht-veränderliche Systemgrößen, wie die horizontale Beschleunigung der RBG-Mastens, sinkt.

- Die in dieser Arbeit vorgestellten Strategien beziehen sich auf RBG mit Einfach-LAM. Es fehlt noch an geeigneten Untersuchungen zu RBG mit Mehrfach-LAM sowie an der Erstellung dafür spezifisch geeigneter, energieeffizienter Lagerstrategien. Zudem könnten die Effekte einer mehrfachtiefen Lagerung auf den Energiebedarf von aHRL untersucht werden.
- Obwohl aHRL mit RBG bislang eine weite Verbreitung in der industriellen Praxis finden, rücken aHRL mit Shuttlefahrzeugen vermehrt in den Fokus von Anlagenherstellern und Lagerbetreibern. Auch für diese Systeme, zu deren Vorteilen die Skalierbarkeit und die Redundanz gehören⁶⁵⁶, sind entsprechende energieeffiziente Lagerstrategien zu formulieren und zu erproben. Die im Rahmen dieser Arbeit formulierten Strategien zur LP-Zuordnung auf Basis des mittleren Energiebedarfs je LP⁶⁵⁷ sowie die Strategien zur Masseverteilung auf Basis der Energiespannweite der LP⁶⁵⁸ können hierfür als Basis dienen.
- Nicht zuletzt ist die Energieeffizienz nur ein Teilziel eines kostenoptimalen Betriebs von Intralogistiksystemen. Es besteht großer Forschungsbedarf in der Integration

⁶⁵⁴Bei *square in time*-Regalwänden sind die Regalwandabmessungen und die Bewegungsparameter der RBG derart abgestimmt, dass die LE für die Bewegung vom ÜP zur obersten Zeile der Regalwand die gleiche Zeit wie für die Bewegung vom ÜP zur hintersten Spalte der Regalwand benötigt. Der Regalwandparameter liegt in diesem Fall (unter Berücksichtigung der Beschleunigung des RBG in Fahr- und Hubrichtung) bei $b = \frac{t_y}{t_x} = 1$. Vgl. Abschnitt 3.3.5.2.3 und insbesondere Fußnote 270: So führt eine *square in time*-Regalwand bei gegebener Stellplatzanzahl zu den niedrigsten mittleren Fahrzeiten bei der Durchführung von Einzelspielen sowie zu einem Fast-Optimum bei der Durchführung von Doppelspielen und ist demzufolge anzustreben.

⁶⁵⁵Der Regalwandparameter des im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Systems liegt bei $b = \frac{t_y}{t_x} \approx 1,6$. Vgl. Abschnitt 4.2.3.1.

⁶⁵⁶Vgl. EKREN/ HERAGU/ KRISHNAMURTHY *et al.* (2010, S. 175f), EKREN/ HERAGU (2011, S. 1640f).

⁶⁵⁷Vgl. Abschnitt 5.2.

⁶⁵⁸Vgl. Abschnitt 5.3.

von Subzielen (wie Energieeffizienz, Instandhaltung, Umschlag oder Verfügbarkeit) in das übergeordnete Ziel eines globalen Kostenoptimums. Hierbei fehlen noch geeignete Ansätze. Jedoch kann dieser Aufgabenstellung im Vergleich zu den drei vorher genannten Bereichen die größte Komplexität bescheinigt werden, da die bisher isolierten Optimierungsprobleme, wie ein energieeffizienter Betrieb oder eine hohe Anlagenverfügbarkeit, integriert betrachtet werden müssen.

Die hier skizzierten Fragestellungen stellen neue Herausforderungen für die anwendungsnahe Forschung im Bereich der Technischen Logistik dar. Es bleibt zu wünschen, dass diese Arbeit, in der Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz von Ein- und Auslagerungen entwickelt und bewertet wurden, für Anbieter und Betreiber von aHRL eine wertvolle Hilfestellung für die Optimierung ihrer aHRL darstellt.

Literatur

- ACCENTURE (Hrsg.) (2007):** CO2-Bilanz bei Lebensmitteln? Ja bitte! Online verfügbar: <http://www.accenture.com/de-de/company/newsroom-germany/Pages/verbraucher-sustainability-studie.aspx>.
- APPLE (1977):** Material Handling Systems Design. John Wiley & Sons, New York/Chichester/ Brisbane *et al.*
- ARNOLD (2006):** Einleitung des Herausgebers. In: ARNOLD (Hrsg.) (2006): 1-4.
- ARNOLD (Hrsg.) (2006):** Intralogistik. Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Springer, Berlin/ Heidelberg.
- ARNOLD/ FURMANS (2007):** Materialfluss in Logistiksystemen. 5. Auflage. Springer, Berlin.
- ASCHEUER/ GRÖTSCHEL/ ABDEL-HAMID (1999):** Order picking in an automatic warehouse: Solving online asymmetric TSPs. In: Mathematical Methods of Operations Research 49 (3): 501-515.
- BAETGE (Hrsg.) (1975):** Grundlagen der Wirtschafts- und Sozialkybernetik. Westdeutscher Verlag, Opladen.
- BAKER/ CANESSA (2009):** Warehouse Design. A structured approach. In: European Journal of Operational Research 193 (2): 425-436.
- BANDOW/ HOLZMÜLLER (Hrsg.) (2010):** "Das ist gar kein Modell!". Gabler, Wiesbaden.
- BANKS (1998):** Principles of Simulation. In: BANKS (Hrsg.) (1998): 3-30.
- BANKS (Hrsg.) (1998):** Handbook of Simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. John Wiley & Sons, New York *et al.*
- BASILE/ CHIACCHIO/ COPPOLA (2011):** A discrete event model for the control and analysis of complex automated warehouse systems. In: Tagungsband 2011 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering: 201-207.
- BAUERNHANSL (Hrsg.) (2014):** Energieeffizienz in Deutschland - eine Metastudie. Analyse und Empfehlungen. Springer, Berlin/ Heidelberg.
- BLES/ KESSLER (2013):** Energieeffizienz in der Industrie. Springer, Berlin/ Heidelberg.

- BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V. (Hrsg.) (2013):** BDEW-Strompreisanalyse November 2013. Haushalte und Industrie. Online verfügbar: <http://www.bdew.de>.
- BOLTZ (2008):** Energieeffizienz als Voraussetzung für nachhaltige Energieversorgung. In: Elektrotechnik & Informationstechnik 125 (9): 309-311.
- BÖNING (2013):** Entwicklung einer Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung. AiF 16904/N. Abschlussbericht, IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH.
- BOULDING (1975):** Die allgemeine Systemtheorie - als Skelett der Wissenschaft. In: BAETGE (Hrsg.) (1975): 16-31.
- BOZER (2012):** Preface. In: MANZINI (Hrsg.) (2012): XI-XIII.
- BOZER/ WHITE (1984):** Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems. In: IIE Transactions 16 (4): 329-338.
- BRANDES (1997):** Betriebsstrategien für Materialflußsysteme unter besonderer Berücksichtigung automatisierter Lager. Shaker, Aachen. Zugleich Dissertation, Technische Universität Berlin.
- BRUNS/ GÜNTNER/ FURMANS (Hrsg.) et al. (2013):** Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik. AiF 16973/N. Abschlussbericht, HELMUT-SCHMIDT-Universität Hamburg/ Technische Universität München/ Karlsruher Institut für Technologie.
- BUSCHER (2003):** Kostenorientiertes Logistikmanagement in Metalogistiksystemen. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden. Zugleich Habilitation, Universität Würzburg.
- BUNDESVEREINIGUNG LOGISTIK (BVL) E. V. (Hrsg.) (2008):** Studie Trends und Strategien in der Logistik 2008. Die Kernaussagen.
- CANTNER/ KRÜGER/ HANUSCH (2007):** Produktions- und Effizienzanalyse. Springer, Berlin/ Heidelberg/ New York.
- CELLIER (1991):** Continuous System Modeling. Springer, New York *et al.*
- CHANG/ WEN (1997):** The impact on rack configuration on the speed profile of the storage and retrieval machine. In: IEEE Transactions 29 (7): 525-531.
- CHEN/ LANGEVIN/ RIOPEL (2007):** The Storage Location Assignment and Interleaving Problem in an Automated Storage/Retrieval System with Shared Storage.

Forschungspapier, GERAD and Département de mathématiques et de génie industriel, École Polytechnique de Montréal.

- COMIER (2005):** Operational Research Methods for Efficient Warehousing. In: LANGEVIN/ RIOPEL (Hrsg.) (2005): 93-122.
- CONWAY/ MAXWELL/ MILLER (1967):** Theory of Scheduling. Addison-Wesley, Reading/ Palo Alto/ London *et al.*
- CORSTEN/ CORSTEN/ SARTOR (2005):** Operations Research. Eine problemorientierte Einführung. Vahlen, München.
- DE KOSTER/ LE-DUC/ ROODBERGEN (2007):** Design and control of warehouse order picking: A literature review. In: European Journal of Operational Research 182 (2): 481-501.
- DEKKER/ FLEISCHMANN/ INDERFURTH *et al.* (Hrsg.) (2004):** Reverse Logistics. Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains. Springer, Berlin/ Heidelberg/ New York.
- DIN 15349 (2003):** Regalbediengeräte - Auslegungskriterien und Berechnungsgrundlagen für Triebwerke. Beuth, Berlin.
- DIN 15350 (1992):** Regalbediengeräte - Grundsätze für Stahltragwerke - Berechnungen. Beuth, Berlin.
- DIN 30781-1 (1989):** Transportkette. Grundbegriffe. Beuth, Berlin.
- DIN 55510-1 (2005):** Verpackung - Modulare Koordination im Verpackungswesen - Teil 1: Grundlagen. Beuth, Berlin.
- DIN 55510-2 (2005):** Verpackung - Modulare Koordination im Verpackungswesen - Teil 2: Terminologie. Beuth, Berlin.
- DIN EN 13382 (2003):** Flachpaletten für die Handhabung von Gütern - Hauptmaße. Beuth, Berlin.
- DIN EN 13698-1 (2004):** Produktspezifikationen für Paletten - Teil 1: Herstellung von 800 mm x 1200 mm Flachpaletten aus Holz. Beuth, Berlin.
- DIN EN 14943 (2005):** Transportdienstleistungen - Logistik - Glossar. Beuth, Berlin.
- DIN EN 15878 (2009):** Ortsfeste Regale aus Stahl - Verstellbare Palettenregale - Begriffe. Beuth, Berlin.

- DIN EN 62264-1 (2014):** Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen – Teil 1: Modelle und Terminologie. Beuth, Berlin
- DIN EN ISO 445 (2010):** Paletten für die Handhabung von Gütern - Begriffe. Beuth, Berlin.
- DIN EN ISO 9000 (2005):** Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2005). Beuth, Berlin.
- DIN IEC 60050-351 (2009):** Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch. Teil 351: Leittechnik. Beuth, Berlin.
- DIN ISO 668 (1999):** ISO-Container der Reihe 1. Klassifikation, Maße, Gesamtgewichte. Beuth, Berlin.
- DIN SPEC 1001 (2010):** Lager- und Transportlogistik - Standardisierte Leistungsdefinition und -bewertung in der Angebotsphase. Beuth, Berlin.
- DIN V 18599-1 (2011):** Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger. Beuth, Berlin.
- DOMSCHKE/ DREXL (2011):** Einführung in Operations Research. 8. Auflage. Springer, Heidelberg/ Dordrecht/ London *et al.*
- DRIEHAUS/ WEBER (2007):** Hubantriebe. In: KIEL (Hrsg.) (2007): 303-323.
- EBEN-CHAIME (1992):** Operations sequencing in automated warehousing systems. In: International Journal of Production Research 30 (10): 2401-2409.
- EGBELU (1991):** Framework for dynamic positioning of storage/retrieval machines in an automated storage/ retrieval system. In: International Journal of Production Research 29 (1): 17-37.
- EGBELU/ WU (1993):** A comparison of dwell point rules in an automated storage/ retrieval system. In: International Journal of Production Research 31 (11): 2515-2530.
- EIGNER/ GERHARDT/ GILZ *et al.* (2012):** Informationstechnologie für Ingenieure. Springer, Berlin/ Heidelberg.
- EKREN/ HERAGU/ KRISHNAMURTHY *et al.* (2010):** Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS. In: Computers & Industrial Engineering 58 (1): 175–185.

- EKREN/ HERAGU (2011):** Simulation based performance analysis of an autonomous vehicle storage and retrieval system. In: Simulation Modelling Practice and Theory 19 (7): 1640–1650.
- ENDERLE (2001):** XML in relationalen Datenbanken. In: Informatik Spektrum 24 (6): 357-368.
- ERTL/ GÜNTNER (2013):** Energieeffiziente Bahnplanung von Regalbediengeräten. Zwischenkreis ermöglicht einen geringen Gesamtverbrauch. In: Hebezeuge Fördermittel 53 (1): 26-29.
- ERTL/ GÜNTNER/ FISCHER *et al.* (2012):** Energieeffiziente Intralogistik auf Geräteebene - Beispiel Regalbediengerät. In: SCHENK/ ZADEK/ MÜLLER *et al.* (Hrsg.) (2012): 65-72.
- ERTL/ HABENICHT/ GÜNTNER (2014):** Energieeffiziente Betriebsstrategien für Regalbediengeräte - Teil 1/2. Einflussgrößen und Lösungsansatz. In: Hebezeuge Fördermittel 54 (1): 40-42.
- ERTL/ HABENICHT/ GÜNTNER (2014a):** Energieeffiziente Betriebsstrategien für Regalbediengeräte - Teil 2/2. Energiebedarfsorientiert - Simulationsergebnisse. In: Hebezeuge Fördermittel 54 (3): 138-140.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (Hrsg.) (2011):** Energy Efficiency Plan.
- FEM 9.001 (1997):** Terminologie - Wörterbuch Regalbediengeräte.
- FEM 9.101 (1997):** Terminologie - Regalbediengeräte - Definitionen.
- FEM 9.221 (1981):** Leistungsnachweis für Regalbediengeräte.
- FEM 9.851 (2003):** Performance Data of S/R Machines Cycle Times.
- FISCHER (2011):** Elektrische Maschinen. 15. Auflage. Carl Hanser, München.
- FISCHER/ DITTRICH (2004):** Materialfluß und Logistik. Potentiale vom Konzept bis zur Detailauslegung. 2. Auflage. Springer, Berlin.
- FORRESTER (1964):** Industrial Dynamics. 3. Auflage. The M.I.T. Press, Cambridge.
- FORRESTER (1972):** Grundzüge einer Systemtheorie. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, Wiesbaden.
- FREIS/ VOHLIDKA (2013):** Das CO₂-neutrale Logistikzentrum - Entwicklung von ganzheitlichen Handlungsempfehlungen für energieeffiziente Logistikzentren. AiF 398 ZN. Abschlussbericht, Technische Universität München.

- FRIEDRICH (2014):** EU-Kommission will die Energieeffizienz künftig um ein Drittel erhöhen. VDI-Nachrichten 2014 (31/32): 7.
- FURMANS/ LINSEL (2011):** Leichtbau bei Unstetigförderern durch Einsatz moderner Werkstoffe. In: VOJDANI (Hrsg.) (2011): 14-25.
- GAGLIARDI/ RENAUD/ RUIZ (2012):** On storage assignment policies for unit-load automated storage and retrieval systems. In: International Journal of Production Research 50 (3): 879-892.
- GEHLSSEN (2004):** Automatisierte Experimentplanung im Rahmen von Simulationsstudien Konzeption und Realisierung eines verteilten simulationsbasierten Optimierungssystems. Shaker, Aachen. Zugleich Dissertation, RWTH Aachen.
- GLASS (2005):** Schnellläuferstrategien in Lagern und dynamische Zonierung. AiF 13756/N. Abschlussbericht, Technische Universität Dresden.
- GLASS (2008):** Schnellläuferstrategien und dynamische Zonierung. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- GOETSCHALCKX (2012):** Storage Systems and Policies. In: MANZINI (Hrsg.) (2012): 31-51.
- GOETSCHALCKX/ RATLIFF (1990):** Shared Storage Policies Based on the Duration Stay of Unit Loads. In: Management Science 36 (9): 1120-1132.
- GRAF (2009):** Skaleneffekte bei intralogistischen Systemen. Anagenetische und ontogenetische Reflexionen. Masterarbeit, Universität Stuttgart.
- GRAVES/ HAUSMAN/ SCHWARZ (1977):** Storage-Retrieval Interleaving in Automatic Warehousing Systems. In: Management Science 23 (9): 935-945.
- GRÜTTER (2010):** Grüne Logistik - Wege zum energieeffizienten Materialfluss. In: MM Logistik. Online verfügbar: <http://www.mm-logistik.vogel.de>.
- GUDEHUS (1973):** Grundlagen der Kommissioniertechnik. Dynamik der Warenverteil- und Lagersysteme. W. Giradet, Essen.
- GUDEHUS (1973a):** Fahrwegoptimierung in automatisierten Hochregallagern. In: f+h Fördern und Heben 22 (3): 123-124.
- GUDEHUS (2010):** Logistik. Grundlagen, Strategien, Anwendungen. 4. Auflage. Springer, Berlin/ Heidelberg.

- GÜNTNER/ HABENICHT (2013):** Erweiterte Logistiksystemplanung unter Einbeziehung des Energieverbrauchs. AiF 17168/N. Abschlussbericht, Technische Universität München.
- GÜNTNER/ SCHIPPLICK/ ERTL *et al.* (2011):** Wettbewerbsfaktor Energieeffizienz - Teil I. Simulationsmodell für Entwicklung und Betrieb von automatischen Regalbediengeräten. In: f+h Fördern und Heben 2011 (6): 276-279.
- GÜNTNER/ SCHIPPLICK/ ERTL *et al.* (2011a):** Wettbewerbsfaktor Energieeffizienz - Teil II. Simulationsmodell für Entwicklung und Betrieb von automatischen Regalbediengeräten. In: f+h Fördern und Heben 2011 (7): 326-329.
- GÜNTNER/ TEN HOMPEL (Hrsg.) (2010):** Internet der Dinge in der Intralogistik. Springer, Heidelberg/ Dordrecht/ London *et al.*
- GUTENSCHWAGER (2002):** Online-Dispositionsprobleme in der Lagerlogistik. Modellierung - Lösungsansätze - praktische Umsetzung. Physica, Heidelberg.
- HAN/ MCGINNIS/ SHIEH *et al.* (1987):** On sequencing retrievals in an automated storage/retrieval system. In: IIE Transactions 19 (1): 56-66.
- HANKE-BOURGEOIS (2009):** Grundlagen der Numerischen Mathematik und des Wissenschaftlichen Rechnens. 3. Auflage. Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- HARMATUCK (1976):** A comparison of two approaches to stock location. In: The Logistics and Transportation Review 12 (4): 282-284.
- HASELOFF (1972):** Kommunikation, Transformation und Interaktion bei lernfähigen Systemen. In: KURZROCK (Hrsg.) (1972): 57-81.
- HASSENSTEIN (1972):** Element und System. Geschlossene und offene Systeme. In: KURZROCK (Hrsg.) (1972): 29-37.
- HAUSLADEN (2014):** IT-gestützte Logistik. Systeme - Prozesse - Anwendungen. 2. Auflage. Springer Gabler, Wiesbaden.
- HAUSMAN/ SCHWARZ/ GRAVES (1976):** Optimal Storage Assignment in Automatic Warehousing Systems. In: Management Science 22 (6): 629-638.
- HEITZER (2013):** Die energetische Modernisierung ist der Schlüssel zur Green Logistic. Rückgewinnung von Bremsenergie und mehr. In: Materialfluss 2013 (4): 13
- HEIZER/ RENDER (2011):** Operations Management. Global Edition. 10. Auflage. Pearson, Upper Saddle River.

- HELBING (Hrsg.) (2008):** Managing complexity: Insights, Concepts, Applications. Springer, Berlin.
- HERTEL (2014):** Adoption energieeffizienter Techniken in KMU. Das Management im Fokus einer empirischen Untersuchung. Springer Gabler, Wiesbaden. Zugleich Dissertation, Technische Universität München.
- HESKETT (1963):** Cube-per-order index: a key to warehouse stock location. In: Transportation and Distribution Management 3 (4): 27-31.
- HESKETT (1964):** Putting the cube-per-order index to work in warehouse development. In: Transportation and Distribution Management 4 (8): 23-30.
- HESSELBACH (2012):** Energie- und klimaeffiziente Produktion. Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- HIGGINSON/ BOOKBINDER (2005):** Distribution Centres in Supply Chain Operations. In: LANGEVIN/ RIOPEL (Hrsg.) (2005): 67-91.
- HU/ HSU/ XU (2004):** Efficient algorithms for load shuffling in split-platform AS/RS. In: Tagungsband IEEE international conference on robotics and automation ICRA '04: 2717-2722.
- HU/ HUANG/ CHEN et al. (2005):** Travel time analysis of a new automated storage and retrieval system. In: Computers & Operations Research 32 (6): 1515-1544.
- HU/ ZHU/ HSU et al. (2010):** Load shuffling algorithms for split-platform AS/RS. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 26 (6): 677-685.
- ISG GMBH (Hrsg.) (2013):** Virtuos - Virtuelle Maschinen und Anlagen. Online verfügbar: <http://ftp.isg-stuttgart.de>.
- JAIKUMAR/ SOLOMON (1990):** Dynamic operational policies in an automated warehouse. In: IEEE Transactions 22 (4): 370-376.
- JETZKE (2007):** Grundlagen der modernen Logistik. Methoden und Lösungen. Hanser, München.
- JOCKISCH/ ROSENDAHL (2010):** Klassifikation von Modellen. In: BANDOW/ HOLZMÜLLER (Hrsg.) (2010): 25-52.
- JÜNEMANN (1989):** Materialfluß und Logistik. Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Springer, Berlin/ Heidelberg/ New York *et al.*

- KALLINA/ LYNN (1976):** Application of the cube-per-order index rule for stock location in a distribution warehouse. In: Interfaces 7 (1): 37-45.
- KANET/ RAMIREZ (1986):** Optimal Stock Picking Decisions in Automatic Storage and Retrieval Systems. In: OMEGA International Journal of Management Science 14 (3): 239-244.
- KIEL (2007):** Industrielle Produktion und Automatisierung. In: KIEL (Hrsg.) (2007): 7-76.
- KIEL (Hrsg.) (2007):** Antriebslösungen. Mechatronik für Produktion und Logistik. Springer, Berlin/ Heidelberg/ New York.
- KLEPPMANN (2006):** Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren. 4. Auflage. Hanser, München/ Wien.
- KNAAK/ PAGE/ KREUTZER (2005):** Validation, Verification, and Testing of Simulation Models. In: PAGE/ KREUTZER (Hrsg.) (2005): 195-235.
- KOCH (2014):** Logistik. Eine Einführung in Ökonomie und Nachhaltigkeit. Springer Vieweg, Berlin/ Heidelberg.
- KOENIGSDORFF/ BECKER/ FLOSS *et al.* (2010):** Energieeffizienz in der Gebäudetechnik. In: PEHNT (Hrsg.) (2010): 227-258.
- KOHN/ ÖZTÜRK (2012):** Mathematik für Ökonomen. Ökonomische Anwendungen der linearen Algebra und Analysis mit Scilab. 2. Auflage. Springer, Berlin/ Heidelberg.
- KOŠTURIK/ GREGOR (1995):** Simulation von Produktionssystemen. Springer, Wien/ New York.
- KOUVELIS/ PAPANICOLAOU (1995):** Expected travel time and optimal boundary formulas for a two-class-based automated storage/retrieval system. In: International Journal of Production Research 33 (10): 2889-2905.
- KUO/ KRISHNAMURTHY/ MALMBORG (2007):** Design models for unit load storage and retrieval systems using autonomous vehicle technology and resource conserving storage and dwell point policies. In: Applied Mathematical Modelling 31 (10): 2332-2346.
- KRAMER (1994):** Kostenorientierte Reihenfolgeplanung. Josef Eul, Bergisch Gladbach/ Köln. Zugleich Dissertation, Universität Münster.
- KUHN/ REINHARDT/ WIENDAHL (Hrsg.) (1993):** Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik. Vieweg, Braunschweig *et al.*

- KULTUREL/ OZDEMIR/ SEPIL *et al.* (1999):** Experimental investigation of shared storage assignment policies in automated storage/retrieval systems. In: IIE Transactions 31 (8): 739-749.
- KUMPF (2001):** Anforderungsgerechte Modellierung von Materialflusssystemen zur planungsbegleitenden Simulation. Herbert Utz, München. Zugleich Dissertation, Technische Universität München.
- KURZROCK (Hrsg.) (1972):** Systemtheorie. Colloquium, Berlin.
- LANGEVIN/ RIOPEL (Hrsg.) (2005):** Logistics Systems: Design and Optimization. Springer, New York.
- LEE/ KIM (1995):** Scheduling of storage/retrieval orders under a just-in-time environment. In: International Journal of Production Research 33 (12): 3331-3348.
- LEE/ SCHAEFER (1997):** Sequencing methods for automated storage and retrieval systems with dedicated storage. In: Computers and Industrial Engineering 32 (2): 351-362.
- LINDEMANN/ SCHMID (2007):** Simulationswerkzeuge in Produktion und Logistik. In: PPS Management 12 (2): 48-55.
- LINN/ WYSK (1987):** An analysis of control strategies for an automated storage/retrieval system. In: INFOR 25 (1): 66-83.
- LINN/ WYSK (1990):** An expert system framework für automated storage and retrieval system control. In: Computers & Industrial Engineering 18 (1): 37-48.
- LIPPOLD (2003):** Spielzeiten in Hochregallagern mit doppeltiefer Lagerung. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).
- LORENZ (1995):** Methode. In: MITTELSTRASS (Hrsg.) (1995): 876-879.
- LUCAS (2007):** Kennlinienbasierte Optimierung von Kommissioniersystemen mit dynamischer Bereitstellung. Shaker, Aachen. Zugleich Dissertation, GOTTFRIED WILHELM LEIBNITZ Universität Hannover.
- LUNZE (2008):** Automatisierungstechnik. Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme. 2. Auflage. Oldenbourg, München/ Wien.
- MAHAJAN/ RAO/ PETERS (1998):** A retrieval sequencing heuristic for miniload end-of-aisle automated storage/retrieval systems. In: International Journal of Production Research 36 (6): 1715-1731.

- MALMBORG (1995):** Optimization of cube-per-order index warehouse layouts with zoning constraints. In: International Journal of Production Research 33 (2): 465-482.
- MALMBORG (1996):** Storage assignment policy tradeoffs. In: International Journal of Production Research 34 (2): 363-378.
- MALMBORG/ KRISHNAKUMAR (1987):** On the optimality of the cube per order index for conventional warehouses with dual command cycles. In: Material Flow 4 (3): 169-175.
- MALMBORG/ KRISHNAKUMAR (1989):** Optimal Storage Assignment Policies for Multiaddress Warehousing Systems. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 19 (1): 197-204.
- MALMBORG/ KRISHNAKUMAR (1990):** A revised proof of optimality for the cube-per-order index for stored item location. In: Applied Mathematical Modelling 14 (2): 87-95.
- MANZINI (Hrsg.) (2012):** Warehousing in the Global Supply Chain. Advanced Models, Tools and Applications for Storage Systems. Springer, London.
- MARKIS/ MAKRI/ PROVATIDIS (2006):** Energy-saving methodology for material handling applications. In: Applied Energy 83 (10): 1116-1124.
- MARTIN (2009):** Transport- und Lagerlogistik. Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. 7. Auflage. Vieweg, Wiesbaden.
- MATERIAL HANDLING INDUSTRY OF AMERICA (Hrsg.) (2009):** AS/RS Industry Group Releases Fall 2009 Quarterly Report. Online verfügbar: <http://www.mhi.org/media/news/9141>.
- MELLER/ MUNGWATTANA (2005):** Multi-shuttle automated storage/retrieval systems. In: IIE Transactions 29 (10): 925-938.
- MENEGHETTI/ MONTI (2011):** Energy Efficient dual command cycles in Automated Storage and Retrieval Systems. In: Tagungsband World Renewable Energy Congress, 8.-13. Mai 2011, Linköping, Schweden: 1668-1675.
- MENEGHETTI/ MONTI (2011a):** Sustainable storage assignment and dwell-point policies for automated storage and retrieval systems. In: Production Planning & Control, iFirst: 1-10.
- MEYERS/ STEPHENS (2000):** Manufacturing Facilities Design and Material Handling. 2. Auflage. Prentice Hall, Upper Saddle River/ Columbus.

- MITTELSTRASS (Hrsg.) (1995):** Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie - Band 2. Metzler, Weimar.
- MONTGOMERY (1996):** Design and analysis of experiments. Wiley, New York.
- MOON/ KIM (2001):** Effects of relocation to AS/RS storage location policy with production quantity variation. In: Computers and Industrial Engineering 40 (1): 1-13.
- MOSLER/ SCHMID (2004):** Wahrscheinlichkeitsrechnung und schließende Statistik. Springer, Berlin/ Heidelberg.
- MÜLLER/ ENGELMANN/ LÖFFLER *et al.* (2009):** Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Springer, Dordrecht/ Heidelberg/ London *et al.*
- MUPPANI/ ADIL (2008):** Efficient formation of storage classes for warehouse storage location assignment: A simulated annealing approach. In: Omega 36 (4): 609-618.
- MURALIDHARAN/ LINN/ PANDIT (1995):** Shuffling heuristics for the storage location assignment in an AS/RS. In: International Journal of Production Research 33 (6): 1661-1672.
- NEUHÄUSER (2013):** Ein Ansatz zur simulationsgestützten Planung und Bewertung von Lagerreorganisationsmaßnahmen am Beispiel des Lebensmitteleinzelhandels. Dissertation, Universität Stuttgart.
- NIEKE (2010):** Materialflusssteuerung heute und ihre Defizite. In: GÜNTNER/ TEN HOMPEL (Hrsg.) (2010): 15-21.
- NIEMEYER (1977):** Kybernetische System- und Kontrolltheorie, System Dynamics. Vahlen, München.
- o. V. (2010):** Tagungsband RFID Systech 2010 – European Workshop on Smart Objects: Systems, Technologies and Applications, 15.-16. Juni 2010, Ciudad Real, Spanien.
- o. V. (2013):** Tagungsband 22nd International Conference on Production Research – ICPR 22, 31. Juli - 4. August 2013, Foz de Iguacu, Brasilien
- ORESKE/ SHRADER-FRECHETTE/ BELITZ (1994):** Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. In: Science 263 (5147): 641-646.
- PAGE (1991):** Diskrete Simulation. Eine Einführung mit Modula-2. Springer, Berlin/ Heidelberg/ New York.

- PAGE/ KREUTZER (2005):** Basic Concepts in Discrete Event Simulation. In: PAGE/ KREUTZER (Hrsg.) (2005): 23-37.
- PAGE/ KREUTZER (Hrsg.) (2005):** The Java Simulation Handbook. Simulating Discrete Event Systems with UML and Java. Shaker, Aachen.
- PAULIK (1984):** Kostenorientierte Reihenfolgeplanung in der Werkstattfertigung. Dissertation, Universität Regensburg.
- PAWELLEK (2007):** Produktionslogistik. Planung – Steuerung – Controlling. Carl Hanser, München.
- PETERMANN (1995):** Die Warenwirtschaftssysteme und Materialwirtschaftssysteme: Ein Vergleich der Handels- und Industrieabwicklung im Fertigwarenlager bzw. im klassischen Handelslager. Diplomica, München.
- PETERS/ SEIDEL/ LÄMMER *et al.* (2008):** Logistics Networks: Coping with Nonlinearity and Complexity. In: HELBING (Hrsg.) (2008): 119-136.
- PETRI (2006):** Ablaufplanung bei Reihenfertigung mit mehrfacher Zielsetzung auf der Basis von Ameisenalgorithmen. Dissertation, Universität Passau.
- PFOHL (2010):** Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 8. Auflage. Springer, Berlin.
- PIEPENBURG/ BRUNS (2011):** Ermittlung von Leistungsgrenzen verschiedener Lagerstrategien unter Berücksichtigung zentraler Einflussgrößen. In: VOJDANI (Hrsg.) (2011): 138-149.
- PLASSMANN/ SCHULZ (Hrsg.) (2009):** Handbuch Elektrotechnik. Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker. 5. Auflage. GWV, Wiesbaden.
- PRITSKER (1998):** Principles of Simulation Modeling. In: BANKS (Hrsg.) (1998): 31-51.
- RABE/ SPIECKERMANN/ WENZEL (2008):** Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Springer, Berlin.
- RAUCH (1997):** Prozessorganisation auf Basis vernetzter Regelkreise am Beispiel der Produktion. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern.
- RILL/ SCHAEFFER (2010):** Grundlagen und Methodik der Mehrkörpersimulation. Vieweg+Teubner, Wiesbaden.

- RÖCK (2007):** Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungssystemen. Jost Jetter, Heimsheim. Zugleich Dissertation, Universität Stuttgart.
- ROCKSTROH (1982):** Die technologische Betriebsprojektierung. Band 2: Projektierung von Fertigungswerkstätten. 2. Auflage. VEB Verlag Technik, Berlin.
- ROODBERGEN (2001):** Layout and routing methods for warehouses. Dissertation, Erasmus Universiteit Rotterdam.
- ROODBERGEN/ VIS (2009):** A survey of literature on automated storage and retrieval systems. In: European Journal of Operational Research 194 (2): 343-362.
- RÖPER (1963):** Palettenpool. 2. Auflage. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- ROSENBLATT/ EYNAN (1989):** Deriving the Optimal Boundaries for Class-Based Automatic Storage/Retrieval Systems. In: Management Science 35 (12): 1519-1524.
- ROUWENHORST/ REUTER/ STOCKRAHM *et al.* (2000):** Warehouse design and control. Framework and literature review. In: European Journal of Operational Research 122 (3): 515-533.
- SANTARIUS (2012):** Der Rebound-Effekt. Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz. Online verfügbar: <http://epub.wupperinst.org>.
- SARKER/ BABU (1995):** Travel time models in automated storage/retrieval systems: A critical review. In: International Journal of Production Economics 40 (2): 173-184.
- SARKER/ MANN/ LEAL DOS SANTOS (1994):** Evaluation of a class-based storage scheduling technique applied to dual-shuttle automated storage and retrieval systems. In: Production Planning & Control 5 (5): 442-449.
- SARKER/ SABAPATHY/ LAL *et al.* (1991):** Performance evaluation of a double shuttle automated storage and retrieval system. In: Production Planning & Control 2 (3): 207-213.
- SCHEID (2004):** Nachhaltige Trends in der automatisierten Lagertechnik. In: WOLF-KLUTHAUSEN (Hrsg.) (2004): 54-59.
- SCHEID (2008):** Automatisierte Systeme der Intralogistik - Hochregallagertrends. In: WOLF-KLUTHAUSEN (Hrsg.) (2008): 35-37.
- SCHEID (Hrsg.) (2009):** Tagungsband 5. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL), Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau.

- SCHENK/ ZADEK/ MÜLLER *et al.* (Hrsg.) (2012):** Tagungsband 17. Magdeburger Logistiktage. Sichere und nachhaltige Logistik. Ohne Verlagsangabe, Magdeburg.
- SCHENK/ ZADEK/ MÜLLER *et al.* (Hrsg.) (2013):** Tagungsband 18. Magdeburger Logistiktage. Sichere und nachhaltige Logistik. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart.
- SCHILL/ SCHOLZ-REITER/ FROMMBERGER (Hrsg.) (2010):** Tagungsband Workshop AILog – Artificial Intelligence and Logistics. 19th European Conference on Artificial Intelligence – ECAI 2010, 16.-20. August 2010, Lissabon, Portugal
- SCHILLING/ BRUNS/ AMBERGER *et al.* (2014):** Umweltaspekte der Förder- und Lagertechnik - Ergebnisse einer umfassenden Analyse. In: VDI WISSENSFORUM GMBH (Hrsg.) (2014): 215-230.
- SCHMIDT/ SCHULZE (2011):** Simulationsbasierte Entwicklung energieeffizienter Steuerungsstrategien für Materialflusssysteme. In: VOJDANI (Hrsg.) (2011): 150-159.
- SCHNEIDER (2008):** Praktische Regelungstechnik. Ein Lehr- und Übungsbuch für Nicht-Elektrotechniker. 3. Auflage. Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- SCHNELL/ WIEDEMANN (Hrsg.) (2006):** Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik. Grundlagen, Systeme und Trends in der industriellen Kommunikation. GWV, Wiesbaden.
- SCHUBERT (2007):** Datenbanken. Theorie, Entwurf und Programmierung relationaler Datenbanken. 2. Auflage. GWV, Wiesbaden.
- SCHULTE (2005):** Logistik. Wege zur Optimierung der Supply Chain. 4. Auflage. Vahlen, München.
- SCHULZ (2014):** Untersuchung und Ableitung geeigneter Lagerbetriebsstrategien zur Verringerung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten. Dissertation, OTTO-VON-GUERICKE-Universität Magdeburg.
- SCHULZ/ MAHRENHOLZ/ ZADEK (2013):** Der Einfluss der Lagerbetriebsstrategie auf die Durchsatzleistung und den Energiebedarf von Regalbediengeräten. In: SCHENK/ ZADEK/ MÜLLER *et al.* (Hrsg.) (2013): 171-180.
- SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012):** Isoenergetic Shelves of Automatic Small Parts Warehouses. In: Logistics Journal. Online verfügbar: <https://www.logistics-journal.de>.
- SCHULZ/ MONECKE/ ZADEK (2012a):** Der Einfluss kinematischer Parameter auf den Energiebedarf eines Regalbediengerätes. In: Logistics Journal. Online verfügbar: <https://www.logistics-journal.de>.

- SCHUMACHER (2012):** Sparsame Antriebstechnik für Regalbediengeräte. In: Energy 2.0-Kompodium 2012: 224-226. Online verfügbar: <http://www.energy20.net/pi/index.php?StoryID=317&articleID=205929>.
- SCHUMANN (2008):** Zur Bestimmung der Umschlagleistung von Hochregallagern unter besonderer Berücksichtigung der Lagerorganisation. Dissertation, Technische Universität Chemnitz.
- SCHWARZ/ GRAVES/ HAUSMAN (1978):** Scheduling policies for automatic warehousing systems: Simulation results. In: AIIE Transactions 10 (3): 260-270.
- SIEGEL/ SCHULZ/ TUREK *et al.* (2013):** Modellierung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten und verschiedener Lagerbetriebsstrategien zur Reduzierung des Energiebedarfs. In: TEN HOMPEL (Hrsg.) (2013): 91-108.
- SMITH (2003):** Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. In: Journal of Manufacturing Systems 22 (2): 157-171.
- SPATH/ ILG/ KRAUSE (Hrsg.) (2011):** Tagungsband 21st International Conference on Production Research – ICPR 21, 31. Juli - 4. August 2011, Stuttgart, Deutschland.
- STACHOWIAK (1973):** Allgemeine Modelltheorie. Springer, Wien/ New York.
- STEFANELLI (2000):** Kostenorientierte Reihenfolgeplanung durch Verknüpfung von Prioritätsregeln mit lokalen Suchverfahren. Shaker, Aachen. Zugleich Dissertation, Universität Passau.
- STREIM (1975):** Heuristische Lösungsverfahren. Versuch einer Begriffsklärung. In: Zeitschrift für Operations Research 19 (5): 143-162.
- SUHL/ MELLOULI (2009):** Optimierungssysteme. Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. 2. Auflage. Springer, Berlin/ Heidelberg.
- SULE (1994):** Manufacturing Facilities: Location, Planning, and Design. 2. Auflage. PWS Publishing Company, Boston.
- TEMPELMEIER (1991):** Simulation mit SIMAN. Ein praktischer Leitfaden zur Modellentwicklung und Programmierung. Physica, Heidelberg.
- TEN HOMPEL (Hrsg.) (2013):** Tagungsband 9. Fachkolloquium der WGTL. Verlag Praxiswissen, Dortmund.

- TEN HOMPEL (Hrsg.)/ HEIDENBLUT (2011):** Taschenlexikon Logistik. Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik. 3. Auflage. Springer, Berlin/ Heidelberg.
- TEN HOMPEL/ SCHMIDT (2010):** Warehouse Management. Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen. 4. Auflage. Springer, Berlin/ Heidelberg.
- TEN HOMPEL/ SCHMIDT/ NAGEL (2007):** Materialflusssysteme. Springer, Berlin.
- TORKE/ ZEBISCH (1997):** Innerbetriebliche Materialflusstechnik. Funktion und Konstruktion fördertechnischer Einrichtungen und Geräte. Vogel, Würzburg.
- ULRICH (2001):** Systemorientiertes Management. Das Werk von Hans Ulrich. Paul Haupt, Bern/ Stuttgart/ Wien.
- VAHRENKAMP/ MATTFELD (2007):** Logistiknetzwerke. Modelle für Standortwahl und Tourenplanung. Gabler, Wiesbaden.
- VAN DEN BERG (2002):** Analytic expressions for the optimal dwell point in an automated storage/retrieval system. In: International Journal of Production Economics 76 (1): 13-25.
- VAN DEN BERG/ GADEMANN (2000):** Simulation study of an automated storage/ retrieval system. In: International Journal of Production Research 38 (6): 1339-1356.
- VAN DEN BERG/ ZIJM (1999):** Models for warehouse management: Classification and examples. In: International Journal of Production Economics 59 (1): 519-528.
- VASILI/ TANG/ VASILI (2012):** Automated Storage and Retrieval Systems: A Review on Travel Time Models and Control Policies. In: MANZINI (Hrsg.) (2012): 159-209.
- VDI 2249 (2003):** Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung. CAD Benutzungsfunktionen. Beuth, Berlin.
- VDI 2415 (2009):** Handhabung von Paletten mit Flurförderzeugen. Beuth, Berlin.
- VDI 2516 (2003):** Flurförderzeuge für die Regalbedienung. Spielzeitermittlung in Schmalgängen. Beuth, Berlin.
- VDI 2681 (1993):** Übersichtsblätter Lagereinrichtungen. Steuerungen für Regalbediengeräte. Beuth, Berlin.
- VDI 2690-1 (1994):** Material- und Datenfluß im Bereich von automatisierten Hochregallagern - Grundlagen. Beuth, Berlin.

- VDI 2690-2 (1994):** Material- und Datenfluß im Bereich von automatisierten Hochregallagern - Voraussetzungen für die Automatisierbarkeit. Beuth, Berlin.
- VDI 3561 (1973):** Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen. Beuth, Berlin.
- VDI 3590-1 (1994):** Kommissioniersysteme Grundlagen. Beuth, Berlin.
- VDI 3629 (2005):** Organisatorische Grundfunktionen im Lager. Beuth, Berlin.
- VDI 3630 (2006):** Automatische Kleinteilelager (AKL). Beuth, Berlin.
- VDI 3633 (1996):** Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Begriffsdefinitionen. Beuth, Berlin.
- VDI 3633-1 (2000):** Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Grundlagen. Beuth, Berlin.
- VDI 3633-2 (1997):** Lasten/Pflichtenheft und Leistungsbeschreibung für die Simulationsstudie. Beuth, Berlin.
- VDI 3633-3 (1997):** Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Experimentplanung und -auswertung. Beuth, Berlin.
- VDI 3633-8 (2007):** Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Maschinennahe Simulation. Beuth, Berlin.
- VDI 3633-11 (2003):** Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Simulation und Visualisierung. Beuth, Berlin.
- VDI 3646 (1994):** Spielzeitermittlung von Fördermitteln der Stetigförderertechnik in automatisierten Lagersystemen. Beuth, Berlin.
- VDI 3649 (1992):** Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lagersysteme. Beuth, Berlin.
- VDI 4004-1 (1986):** Zuverlässigkeitskenngrößen. Verfügbarkeitskenngrößen. Beuth, Berlin.
- VDI 4661 (2003):** Energiekenngrößen. Definitionen - Begriffe - Methodik. Beuth, Berlin.
- VDI 4707 (2009):** Aufzüge Energieeffizienz. Beuth, Berlin.
- VDI WISSENSFORUM GMBH (Hrsg.) (2014):** Tagungsband 23. Deutscher Materialflusskongress mit Fachkonferenz Automobillogistik. VDI Verlag, Düsseldorf.

- VIS (2002):** Planning and control concepts for material handling systems. Dissertation, Erasmus Universiteit Rotterdam.
- VOJDANI (Hrsg.) (2011):** Tagungsband 7. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik. Praxiswissen Service, Dortmund.
- VON BERTALANFFY (1972):** Vorläufer und Begründer der Systemtheorie. In: KURZROCK (Hrsg.) (1972): 17-28.
- VON RIMSCHA (2008):** Algorithmen kompakt und verständlich. Vieweg+Teubner, Wiesbaden.
- WANG/ YIH (1997):** Using neural networks to select a control strategy for automated storage and retrieval systems (AS/RS). In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing 10 (6): 487-495.
- WANNENWETSCH (2010):** Integrierte Materialwirtschaft und Logistik. Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion. 4. Auflage. Springer, Berlin.
- WEHKING/ ERNST (2010):** Einsatz von hochfesten Faserseilen für Hubbewegungen in der Lagertechnik. AiF 15370/N. Abschlussbericht, Universität Stuttgart.
- WEHKING/ MARRENBACH/ SOMMER (2010):** RefPlan Logistik: Entwicklung einer referenzbasierten, prozessorientierten Planungsmethodik für Logistiksysteme am Beispiel der Paket- und Palettenlogistik. AiF 15665/N. Abschlussbericht, Universität Stuttgart.
- WENZEL (2000):** Einleitender Überblick. In: WENZEL (Hrsg.) (2000): 1-3.
- WENZEL (Hrsg.) (2000):** Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. SCS-Europe, Ghent.
- WENZEL/ AHRENS/ SCHÜRHOLOZ *et al.* (1993):** Einleitung. In: KUHN/ REINHARDT/ WIENDAHL (Hrsg.) (1993): 1-5.
- WIENDAHL (2010):** Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Auflage. Hanser, München.
- WOLF-KLUTHAUSEN (Hrsg.) (2004):** Jahrbuch Logistik 2004. free Beratung, Korschbroich.
- WOLF-KLUTHAUSEN (Hrsg.) (2008):** Jahrbuch Logistik 2008. free Beratung, Korschbroich.
- WOLF-KLUTHAUSEN (Hrsg.) (2010):** Jahrbuch Logistik 2010. free Beratung, Korschbroich.

- YU/ DE KOSTER (2009):** Open Location Management in Automated Warehousing Systems. Online verfügbar: <http://hdl.handle.net>.
- ZÖBEL (2008):** Echtzeitsysteme. Grundlagen der Planung. Springer, Berlin.
- ZOLLINGER (2001):** AS/RS application, benefits and justification in comparison to other storage methods: A white paper. Replenishment system for distribution center. Online Verfügbar: <http://www.mhi.org/downloads/industrygroups/as-rs/technicalpapers/asrswhitepaper.pdf>.

Veröffentlichungen des Autors

- HOPPE/ DREIER/ SOMMER *et al.* (2011):** Energieeffizienz in Intralogistiksystemen - Bewertung von Komponenten, Anlagen und Systemen. In: Hebezeuge Fördermittel 51 (11): 608-610.
- HOPPE/ SOMMER (2011):** Measuring and enhancing the energy efficiency of material handling systems. In: SPATH/ ILG/ KRAUSE (Hrsg.) (2011). (*double blind peer reviewed*)
- HOPPE/ SOMMER (2013):** An experimental investigation of measures to enhance the energy efficiency of chain conveyors and automated storage and retrieval systems. In: o. V. (2013). (*double blind peer reviewed*)
- JOBI/ NEUHÄUSER/ SOMMER (2009):** Planung intralogistischer Systeme – Unterstützung durch EDV-basierte Assistenzsysteme. In: SCHEID (Hrsg.) (2009): 171-181.
- NEUHÄUSER/ SOMMER/ WEHKING (2010):** The RFID equipment selection and evaluation problem – results from the research project „IdentProLog“. In: o. V. (2010). (*double blind peer reviewed*)
- SOMMER/ MARRENBACH/ WEHKING (2009):** Planung intralogistischer Systeme – Vorgehensmodelle und Formalisierung des Planungswissens. In: Industrie Management 25 (5): 57-60.
- SOMMER/ NEUHÄUSER/ MARRENBACH *et al.* (2010):** Towards intelligent material handling planning systems – Status quo and steps to be taken. In: SCHILL/ SCHOLZ-REITER/ FROMMBERGER (Hrsg.) (2010): 55-59. (*double blind peer reviewed*)
- SOMMER/ WEHKING (2013):** Energieeffiziente Lagerplatzzuordnung in Hochregallagern. In: TEN HOMPEL (Hrsg.) (2013): 67-76.
- SOMMER (2014):** Erfolgreiches Forschungsprojekt der Abteilung Logistik. Die energieeffiziente Lagerplatzzuordnung in aHRL. In: Hebezeuge Fördermittel 54 (10): 586-588.
- STINSON/ SOMMER/ WEHKING (2013):** Bewertung und Optimierung der Effizienz manueller Tätigkeiten in der Kommissionierung (EffKom). AiF 17236/N1. Abschlussbericht, Universität Stuttgart.
- WEHKING/ MARRENBACH/ SOMMER (2010):** Entwicklung einer referenzbasierten, prozessorientierten Planungsmethodik für Logistiksysteme am Beispiel der Paket- und Palettenlogistik (RefPlan Logistik). AiF 15665/N. Abschlussbericht, Universität Stuttgart.

- WEHKING/ SOMMER (2010):** Planung intralogistischer Systeme – Wissensbasierte Auswahl technischer Ressourcen. In: WOLF-KLUTHAUSEN (Hrsg.) (2010): 24-27.
- WEHKING/ SOMMER (2011):** Ressourcenauswahl in der Intralogistikplanung. Entwicklung einer Methodik zur Ressourcenauswahl in der Paket- und Palettendistribution. In: wt Werkstattstechnik online 110 (4): 267-271. (*double blind peer reviewed*)
- WUNDERLE/ SOMMER (2014):** Planung von Intralogistiksystemen - Erfahrung und Augenmaß zählen. In: Hebezeuge Fördermittel 54 (7/8): 428-430.