

# Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Eneff Lager - Energieeffiziente Lagerstrategien und Lastverteilung***

der Forschungsstelle(n)

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik

Das IGF-Vorhaben **17389BR** der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e. V. -  
BVL wurde über die



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



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'H. Zadek'.

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Zadek

Magdeburg, 15.06.2014

---

Ort, Datum

---

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)  
an der/den Forschungsstelle(n)

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	2
Abkürzungsverzeichnis .....	4
Auflistung der Formelzeichen.....	5
1. Zusammenfassung .....	6
2. Ausgangssituation .....	7
2.1 Stand des Wissens .....	7
2.2 Zielstellung des Forschungsvorhabens.....	8
3. Projektdurchführung .....	9
<i>Arbeitspaket 1</i> .....	9
<i>Arbeitspaket 2</i> .....	10
<i>Arbeitspaket 3</i> .....	15
<i>Arbeitspaket 4</i> .....	20
<i>Arbeitspaket 5</i> .....	24
<i>Arbeitspaket 6</i> .....	36
4. Nutzen für KMU .....	37
5. Transfer der Forschungsergebnisse .....	38
6. Durchführende Forschungsstelle .....	41
7. Literaturverzeichnis.....	41

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vergleich der Energiewerte des Hubwerkes zwischen 0 kg und 30 kg Nutzmasse.....	10
Abbildung 2:	Der Einfluss unterschiedlicher Geschwindigkeiten auf die Energieaufnahme und Energierekuperation sowie Bewegungszeiten des Fahrwerks in Abhängigkeit vom Fahrweg.....	11
Abbildung 3:	Leistungs- und Geschwindigkeitsverläufe des Fahrwerks bei unterschiedlichen Beschleunigungen.....	12
Abbildung 4:	Isoenergetische Fächer.....	13
Abbildung 5:	Idealisierter Verlauf einer Bewegung über die Zeit.....	14
Abbildung 6:	Das entwickelte Simulationsmodell.....	16
Abbildung 7:	Vergleich der Leistungs- und Geschwindigkeitsverläufe bei Anpassung der Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung des Fahrwerks an die Bewegungszeit des Hubwerkes.....	17
Abbildung 8:	Mittlerer Energiebedarf pro Stunde und mittlerer Durchsatz für verschiedene Positionen des Ein- und Auslagerungspunktes.....	19
Abbildung 9:	Leistungsverlauf einer Bewegung mit und ohne Berücksichtigung der Grundlast.....	21
Abbildung 10:	Das Automatische Kleinteilelager am Institut für Logistik und Materialflusstechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.....	22
Abbildung 11:	Mittlerer Energiebedarf pro Stunde und mittlerer erzielbarer Durchsatz pro Stunde bei chaotischer Lagerung.....	23
Abbildung 12:	ABC-Zonierung auf Basis der Zeit.....	25
Abbildung 13:	A-Zonen bei zeitlicher bzw. energetischer Zonierung und 1,5 m/s Hubgeschwindigkeit.....	26
Abbildung 14:	Vergleich der mittleren Durchsätze und Energiebedarfe pro Stunde zwischen zeitlicher und energetischer ABC-Zonierung bei Einzelspielen und 1,5 m/s Hubgeschwindigkeit.....	27
Abbildung 15:	Vergleich der mittleren Durchsätze und Energiebedarfe pro Stunde zwischen zeitlicher und energetischer ABC-Zonierung und Kombination mit Kürzester-Fahrzeit-Regel bzw. Niedrigsten-Energiebedarfs-Regel bei Doppelspielen und 1,5 m/s Hubgeschwindigkeit.....	28
Abbildung 16:	Durchsätze und Energiebedarfe je Stunde ohne und mit Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den geforderten Durchsatz bei chaotischer Lagerung und ausschließlicher Ausführung von Doppelspielen.....	30

Abbildung 17: Mittlere Durchsätze und Energiebedarfe pro Stunde mit und ohne Anpassung der Fahr-werksgeschwindigkeit an den je Stunde geforderten Durchsatz bei chaotischer Lagerung.....	31
Abbildung 18: Beziehung zwischen dispositiver zeitlicher Verschiebung der Abarbeitung von Aufträgen (oben) und der Glättung des Spitzen-Tageslastprofils (unten) .....	33

## Abkürzungsverzeichnis

ILM	Institut für Logistik und Materialflusstechnik
RBG	Regalbediengerät
EU	Europäische Union
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
E-/A-Punkt	Ein- und Auslagerpunkt
ZVEI	Zentralverbands Elektrotechnik - und Elektronikindustrie e.V.
AKL	Automatisches Kleinteilelager
ILM-AKL	Automatisches Kleinteilelager des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik
FIFO	First In First Out
LIFO	Last In First Out

## Auflistung der Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung	Einheit
$a_{FW\ err}$	Erreichte Beschleunigung des Fahrwerks	$m/s^2$
$\overline{DS}_p$	Mittlere Anzahl der Doppelspiele pro Stunde bei einem Doppelspielanteil p	-
$\overline{E}_{DS}$	Mittlerer Doppelspiel-Energiebedarf	kWs
$\overline{E}_{ES}$	Mittlerer Einzelspiel-Energiebedarf	kWs
$\overline{E}_h$	Mittlerer Energiebedarf pro Stunde	kWh/h
$\overline{E}_{h\ DS}$	Mittlerer Energiebedarf pro Stunde bei ausschließlicher Ausführung von Doppelspielen	kWh/h
$\overline{E}_{h\ ES}$	Mittlerer Energiebedarf pro Stunde bei ausschließlicher Ausführung von Einzelspielen	kWh/h
$\overline{E}_{LE}$	Mittlerer Energiebedarf pro Ladeinheit	kWs/LE
$\overline{E}_{LE\ DS}$	Mittlerer Energiebedarf pro Ladeinheit bei Doppelspielen	kWs/LE
$\overline{E}_{LE\ ES}$	Mittlerer Energiebedarf pro Ladeinheit bei Einzelspielen	kWs/LE
$\overline{ES}_p$	Mittlere Anzahl der Einzelspiele pro Stunde bei einem Doppelspielanteil	-
$P_{GL}$	Grundlast	W; kW
$\overline{Q}_{DS}$	Mittlerer Durchsatz bei Doppelspielen	LE/h
$\overline{Q}_{ES}$	Mittlerer Durchsatz bei Einzelspielen	LE/h
$\overline{Q}_p$	Mittlerer Durchsatz bei einem Doppelspielanteil	LE/h
$r_{FW}$	Ruck des Fahrwerks	$m/s^3$
$S_{FW\ ges}$	Insgesamt vom Fahrwerk zurückzulegender bzw. zurückgelegter Weg	m
$\overline{t}_{DS}$	Mittlere Doppelspielzeit	s
$\overline{t}_{ES}$	Mittlere Einzelspielzeit	s
$t_{FW\ Ruck}$	Zeit, die zum Auf- bzw. Abbau des Rucks vom Fahrwerk benötigt wird	s
$t_{HW\ Bew\ real}$	Reale Bewegungszeit des Hubwerks	s
$\overline{t}_{Still}$	Mittlere Stillstandzeit pro Stunde	s
$V_{FW\ anp}$	Während einer Bewegung an die Bewegungsdauer des Hubwerks angepasste Geschwindigkeit des Fahrwerks	m/s

# 1. Zusammenfassung

Gegenstand des Forschungsvorhabens „Energieeffiziente Lagerstrategien und Lastverteilung“ (Eneff Lager) war die Ableitung von Lagerbetriebsstrategien zur Verringerung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten. Dabei sollte der mittlere Durchsatz möglichst nicht negativ beeinflusst werden.

Im Wesentlichen wurden zunächst die Auswirkungen der Änderung kinematischer Parameter (Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) auf die elektrischen Leistungsverläufe und somit Energiebedarfe eines Kleinteile-Regalbediengerätes, das dem Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM) zur Verfügung steht, untersucht. Aus den Ergebnissen konnten zunächst die sogenannten isoenergetischen Fächer, d. h. die Fächer, die mit dem gleichen Energiebedarf angefahren werden können, definiert werden. Weiterhin konnten aus dem energetischen Verhalten des Regalbediengerätes (RBG) verschiedene Lagerbetriebsstrategien abgeleitet werden, die den Energiebedarf von RBGs reduzieren könnten. Im Folgenden wurden die abgeleiteten Strategien in einem Simulationsmodell mit bestehenden Lagerbetriebsstrategien hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den (mittleren) Durchsatz und den (mittleren) Energiebedarf (pro Ladeinheit und pro Stunde) verglichen. Um die Simulation möglichst realitätsnah zu gestalten, wurden schwankende Durchsatzzahlen angenommen und unterschiedliche Durchsatzszenarien simuliert, mit denen unterschiedlich stark ausgelastete automatische Regalläger mit Regalbediengeräten abgebildet werden sollen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Energiebedarf von Regalbediengeräten mit den abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien je nach Ausgangssituation erheblich (zum Teil mehr als 50%) im Vergleich zu klassischen Lagerbetriebsstrategien reduziert werden kann, ohne den mittleren Durchsatz negativ zu beeinflussen.

**Somit wurde das Ziel des Forschungsvorhabens erreicht.**

## 2. Ausgangssituation

Der Klimaschutz rückt aufgrund der weltweiten Klimaveränderungen immer mehr in den Vordergrund. Dies hat die Politik veranlasst, verbindliche Ziele zur Senkung der Treibhausgase, die für die Klimaerwärmung verantwortlich sind. Damit ergeben sich konkrete Anforderungen an die Industrie. Diese Entwicklung hat 1997 mit dem Kyoto-Protokoll begonnen. Zwar sind die Verhandlungen für ein Nachfolgeprotokoll gescheitert, welches auch die Vereinigten Staaten von Amerika und aufstrebende Schwellenländer wie China, Indien und Brasilien einschließt, aber die Europäische Union (EU) geht mit ihrer Klimapolitik schon seit mehreren Jahren voran und hat somit eine Vorreiterrolle inne. Besonders hohe Ziele verfolgt die Bundesregierung mit dem Ziel einer Senkung der Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)-Emissionen von 40% bezogen auf 1990, da CO<sub>2</sub> als größter Treiber der Klimaerwärmung gilt [UBA07]. Um das Ziel von 400 Teilen pro Million (ppm) Treibhausgasen in der Atmosphäre zu erreichen und die globale Erwärmung auf 2°C bis Ende des Jahrhunderts zu beschränken, muss die globale Staatengemeinschaft allerdings zusammenarbeiten [IPCC07].

Der Anteil der Logistik am Energie- und Ressourcenverbrauch liegt in Deutschland bei 25%. Davon entfallen 76% auf außerbetriebliche Transporte und 24% auf die Intralogistik [Kra08]. In einem hochautomatisierten Logistikzentrum können bis zu ca. 48% der Energiekosten auf die Förder-, Lager- und Kommissioniertechnik, zu der u. a. Regalbediengeräte zählen, entfallen [Kra08]. Der absolute Energiebedarf eines Lagers bzw. eines Logistikzentrums richtet sich vor allem nach der Hallengröße, dem Durchsatz und dem Automatisierungsgrad. Je höher diese Parameter sind, desto größer ist der absolute Gesamtenergiebedarf. Der Energiebedarf von Regalbediengeräten kann im Wesentlichen in drei Bereichen beeinflusst werden: dem konstruktiven (z. B. Leichtbau), dem technologischen (z. B. Rückspeiseeinheiten) und dem steuerungstechnischen Bereich (z. B. Lastmanagement). Experten schätzen weiterhin, dass steuerungstechnische Maßnahmen, zu welchen auch Lagerbetriebsstrategien zählen, höhere Auswirkungen auf die Energieeffizienz haben als Maßnahmen aus den Bereichen Konstruktion und Technik [Bar12, S. 49].

### 2.1 Stand des Wissens

Energieeffizienz in der Logistik wird derzeit vor allem in Supply Chains und außerbetrieblichen Transporten [Clau06, Qua06, Öko07] diskutiert. Defizite in der Forschung bestehen daher noch in der Intralogistik. Dagegen wurden die Untersuchungen von Arbeitsspielstrategien von Regalbediengeräten weiterhin hinsichtlich Leistungsdurchsatz und Produktivität bzw. der Zonung von Lagern untersucht [Gla05, Gün08]. Lagerbetriebsstrategien werden allgemein in Lagerplatzvergabe-, Ein- und Auslagerungs- sowie Bewegungsstrategien eingeteilt. Gegenüber der chaotischen Lagerhaltung sind bestehende Belegungs- und Einlagerstrategien zur Produktivitätssteigerung von automatischen Lageranlagen unter anderem die Einlagerung möglichst nah am Ein- und Auslagerpunkt (E-/A-Punkt), auch als kürzeste Fahrzeitregel bezeichnet, die sich vor allem für hohe bzw. lange Gassen eignet [NeSc07], und die Zonierung nach ABC-Artikeln, also nach der Zugriffshäufigkeit. Häufig entnommene Artikel (A-Artikel) werden nahe dem E-/A-Punkt gelagert, wohingegen nur sporadisch ent-



nommene Artikel (C-Artikel) in der vom E-/A-Punkt am weitesten entfernten Zone gelagert werden. Durch diese Strategie verringert sich die mittlere Fahrzeit.

Für die mittlere Spielzeit spielt auch die Lage des E-/A-Punktes eine Rolle. Liegt dieser nicht auf der Höhe „0“ am Rand der Regalgasse, sondern erhöht, verkürzt sich die Spielzeit für ein Referenzspiel. Der Grund ist, dass die Fahrzeit zum ersten Referenzpunkt von der Hubzeit dominiert wird und die Fahrzeit gleich bleibt [Mar08]. Wie sich die Veränderung der Lage des E-/A-Punktes auf den Energieverbrauch eines solchen Referenzspiels auswirkt, besonders unter Berücksichtigung der Rückspeisung, wurde bisher noch nicht untersucht. Weitere Strategien sind die Kombination von Ein- und Auslagerung, d. h. dass eine Einlagerung möglichst nahe des Fachs erfolgt, das bei der nächsten Auslagerung angefahren wird oder die „Nächster-Nachbar-Strategie“, bei der das Fach für die erste Einlagerung noch zufällig gewählt wird, folgende Einlagerungen allerdings nahe dieses Fachs erfolgen [Gün08].

Die Hersteller automatischer Intralogistikanlagen konzentrieren sich derzeit auf die Gewichts- und Leistungsoptimierung ihrer Geräte bzw. der mechanischen Systemoptimierung zur Senkung des Energieverbrauchs [Tha09]. Laut einer Studie des Zentralverbands Elektrotechnik - und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) könnten im Bereich der elektrischen Antriebe jährlich mehr als 15% des Elektroenergieverbrauchs, rund 27,5 Mrd. kWh, durch energieeffiziente Antriebstechnik eingespart werden [ZVEI06]. Davon machen die Nutzung von Energiesparmotoren etwa 5,5 Mrd. kWh aus und die elektronische Drehzahlregelung etwa 22 Mrd. kWh [Kno09]. Energiesparmotoren führen bei Regalbediengeräten baulich bedingt allerdings nicht zu einer Reduzierung des Elektroenergieverbrauchs, da hierfür konstante Geschwindigkeiten über längere Zeit zurückgelegt werden müssen. Regalbediengeräte arbeiten im Reversierbetrieb und beschleunigen und bremsen dadurch häufig. Weiterhin werden Gegengewichte genutzt um den Elektroenergieverbrauch von Regalbediengeräten zu senken [ITP09].

Neuere Anlagen nutzen die Möglichkeit der Netzzurückspeisung. Dabei entstehen jedoch Verluste. Es ist daher besser, die frei werdende Energie dem Lagersystem sofort wieder zur Verfügung zu stellen. Dafür wird vor allem die so genannte Gleichstromzwischenkreiskopplung eingesetzt [FM09, S. 19]. Durch diese Technik wird zwischen Fahr- und Hubwerkwerk eine Energieausgleichsverbinding hergestellt, wodurch sich Fahr- und Hubwerk die beim Bremsen und Senken frei werdende Energie teilen können. Zum großen Teil werden also vor allem technologische Maßnahmen ergriffen, um den Energiebedarf der Intralogistikanlagen zu senken. Lagerplatzvergabe- und Bewegungsstrategien zur Reduzierung des Elektroenergiebedarfs von Intralogistikanlagen existieren dagegen bisher nicht. Die Energieeffizienz im Lager erfordert daher gegebenenfalls neue Strategien, die mit der Produktivität und zeitlichen Effizienz abgestimmt sind.

## **2.2 Zielstellung des Forschungsvorhabens**

Das Ziel des Forschungsvorhabens „Energieeffiziente Lagerstrategien und Lastverteilung“ war es, neue Lagerbetriebsstrategien zur Verringerung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten abzuleiten, die übergreifend sowohl Einzelbewegungen eines RBG unter Einbeziehung kinematischer Parameter als auch die energetischen Auswirkungen von Lagerplatz-

vergabestrategien und übergeordneten Bewegungsstrategien berücksichtigen. Nach Möglichkeit sollte sich der mittlere Durchsatz bei Implementierung dieser Strategien nicht verringern. Da das RBG am ILM über eine Rückspeiseeinheit verfügt, sollte auch die beim Verzögern des Fahrwerkes und Senken des Hubwerkes zurückgewonnene Energie berücksichtigt werden. Die Strategien sollen jedoch für alle technischen Konfigurationen von RBGs geeignet sein.

### 3. Projektdurchführung

Die Finanzierung des Forschungsvorhabens „Energieeffiziente Lagerstrategien und Lastverteilung“ wurde für den Zeitraum 01.01.2012 - 30.11.2013 bewilligt. Da zu Beginn des Vorhabens zunächst ein weiterer Mitarbeiter eingestellt werden musste, sich die Einstellung allerdings nicht sofort bewerkstelligen ließ, mussten einige abschließende Arbeiten in das Haushaltsjahr 2014 verschoben werden. Dementsprechend wurde eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 28.02.2014 beantragt und bewilligt.

Für die Projektbearbeitung wurde ein Forschungsmitarbeiter für 26 Monate in Vollzeit beschäftigt. Da die definierten Aufgaben zu umfangreich für einen Mitarbeiter waren, wurde wie bereits erwähnt ein weiterer Mitarbeiter insgesamt 17,5 Monate beschäftigt. Die Forschungsmitarbeiter führten das Projekt über die gesamte Laufzeit selbstständig, mit fachlicher Begleitung durch die Professoren, eigenverantwortlich durch. Des Weiteren wurden studentische Hilfskräfte für insgesamt 2.392 h beschäftigt. Die studentischen Hilfskräfte hatten insbesondere die Aufgabe, die Forschungsmitarbeiter bei der Erstellung des Simulationsmodells zu unterstützen und Simulationsläufe durchzuführen. Die insgesamt geleisteten Arbeiten waren für die Durchführung des Vorhabens notwendig sowie angemessen und entsprechen in ihrer Gesamtheit dem geplanten und bewilligten Umfang.

Im Folgenden werden die Forschungsergebnisse in den einzelnen Arbeitspaketen dokumentiert.

<b>Arbeitspaket 1</b>	<b>Personaleinsatz [PM]</b>
<b>Auswahl der Lagerhaltungssoftware und des Bedienterminals</b>	<b>2</b>

#### Durchgeführte Arbeiten:

Nach ausführlicher Sichtung der existierenden Softwareprogramme wurde sich für ein System entschieden, das von einem Mitglied des Projektbegleitenden Ausschusses zur Verfügung gestellt wird/wurde. SSI Schäfer modifizierte die bestehende Lagerverwaltungssoftware dahingehend, dass Aufträge manuell eingegeben werden können und Messergebnisse einfach abgerufen werden können.

#### Erzielte Ergebnisse:

Die der Anforderungen der Versuchsdurchführungen wurden in eine geeignete Software mit einfacher Bedienung und entsprechender Benutzeroberfläche umgesetzt. Aufgrund festgestellter Mängel wurde die Software soweit angepasst, dass sie den Anforderungen entsprach.

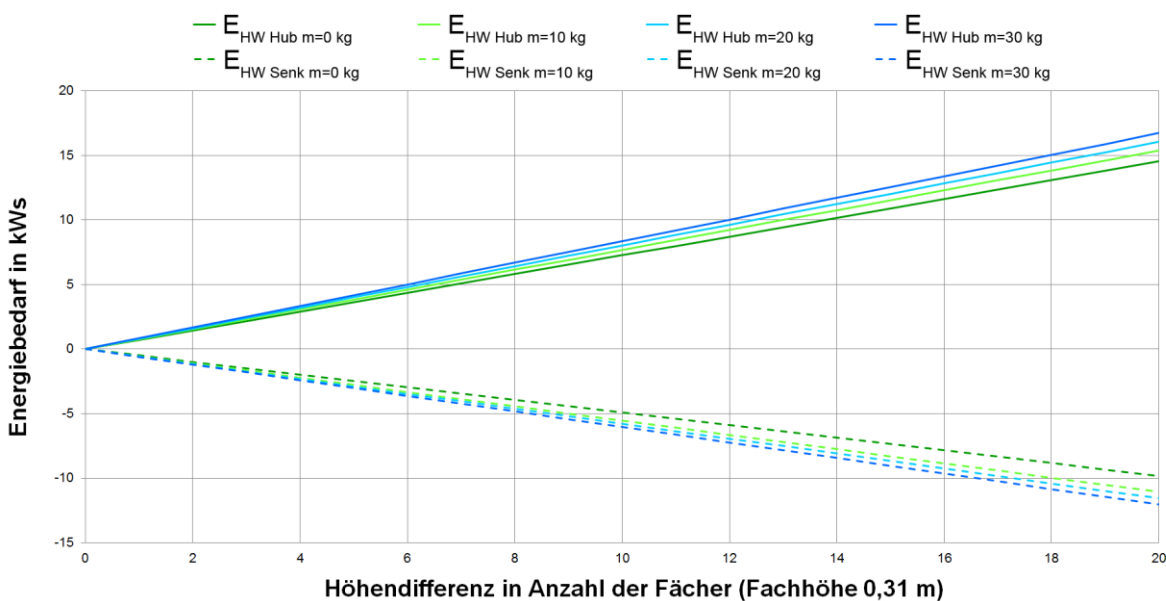
<b>Arbeitspaket 2</b>	<b>Personaleinsatz [PM]</b>
<b>Energetische Ist-Analyse der Bewegungen in Automatischen Kleinteilelagern und Modellbildung</b>	<b>6</b>

Durchgeführte Arbeiten:

Um eine entsprechende Datenbasis zu schaffen, wurden zunächst zahlreiche Experimente durchgeführt und ausgewertet, wobei die Wege, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen sowie Nutzmassen der Fahr- bzw. Hubbewegungen variiert wurden. Auf der Grundlage der Experimentergebnisse wurde ein Modell zur Bestimmung des Energiebedarfs der Fahr- und Hubbewegungen sowie vollständiger Einzelspiele entwickelt. Weiterhin konnte ein Rechenmodell zur Bestimmung der Bewegungszeiten, der Arbeitsspielzeiten und somit des Durchsatzes erstellt werden. Die erzielten Forschungsergebnisse wurden von Mitarbeitern zweier Firmen des Projektbegleitenden Ausschusses validiert.

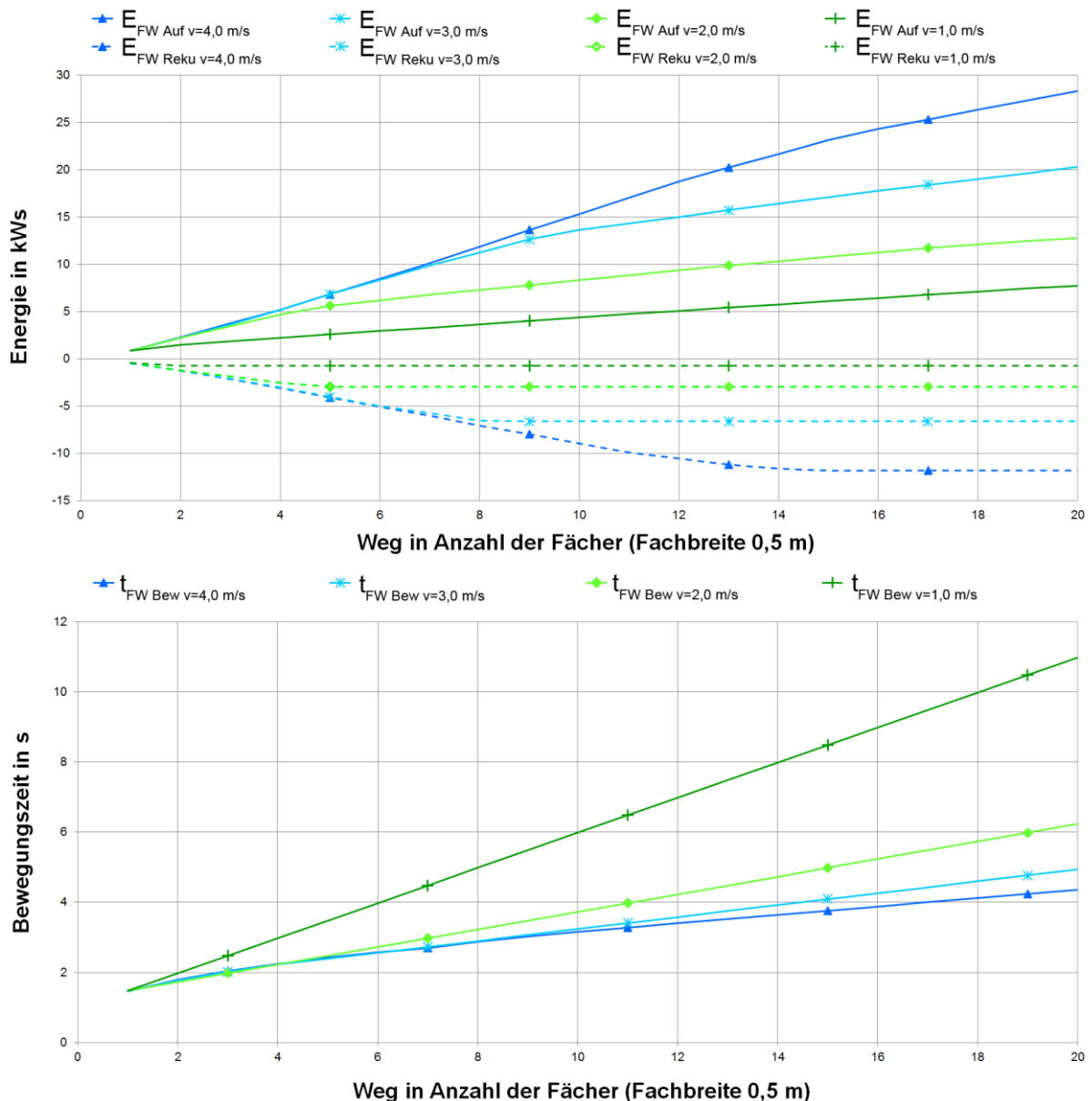
Erzielte Ergebnisse:

Aus den Experimentdaten ist ersichtlich, dass der Energiebedarf für Hubbewegungen bzw. die während Senkbewegungen reperierte Energiemenge gemäß der Formel für die potentielle Energie ( $E_{\text{Auf}}=m \cdot g \cdot h / \eta_{\text{Auf}}$  bzw.  $E_{\text{Reku}}=m \cdot g \cdot h \cdot \eta_{\text{Reku}}$ ) lediglich abhängig ist von der zu bewegendenden Masse und der zu überwindenden Höhendifferenz (siehe Abbildung 1). Keinen Einfluss auf den Energiebedarf von Hubbewegungen bzw. die reperierte Energiemenge bei Senkvorgängen haben die eingestellte Geschwindigkeit und die Beschleunigungen.



**Abbildung 1: Vergleich der Energiewerte des Hubwerkes zwischen 0 kg und 30 kg Nutzmasse [SMZ12b, S. 74]**

Weiterhin hat sich gezeigt, dass die eingestellte Geschwindigkeit den Energiebedarf von Fahrbewegungen beeinflusst (siehe Abbildung 2). Wird der gleiche Fahrweg mit zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten zurückgelegt, weist die Bewegung mit der höheren Geschwindigkeit den größeren Energiebedarf auf. Voraussetzung dabei ist jedoch, dass der Weg lang genug ist, um diese Geschwindigkeit oder zumindest eine höhere als die kleinere der beiden zu erreichen.



**Abbildung 2: Der Einfluss unterschiedlicher Geschwindigkeiten auf die Energieaufnahme und Energieerholung sowie Bewegungszeiten des Fahrwerks in Abhängigkeit vom Fahrweg (in Anlehnung an [SMZ12b, S. 72])**

So steigt die in der Beschleunigungsphase benötigte Energiemenge gemäß der aus der Mechanik bekannten Formel quadratisch mit der erreichten Geschwindigkeit ( $E_{\text{Beschl}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 / \eta_{\text{Beschl}}$ ). Allerdings stellt auch die während der Bremsphase rekuperierte Energie eine quadratische Funktion der Geschwindigkeit dar ( $E_{\text{Brems}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot \eta_{\text{Brems}}$ ), d. h. je größer die erreichte Geschwindigkeit ist, desto mehr Energie wird einerseits während der Beschleunigungsphase benötigt und andererseits in der Bremsphase rekuperiert. Der „Mehrbedarf“ für das Beschleunigen auf die höhere Geschwindigkeit wird jedoch nicht dadurch ausgeglichen, dass beim Verzögern mehr Energie rekuperiert wird. Zudem fällt der Energiebedarf in der Phase der konstanten Geschwindigkeit pro zurückgelegter Wegeinheit umso geringer aus, je kleiner die Geschwindigkeit gewählt wird. Schließlich korrespondiert zu einer kleineren Geschwindigkeit immer ein geringerer Energiebedarf, sofern der zurückgelegte Weg länger ist, als der Weg, der zum Erreichen der kleineren Geschwindigkeit nötig ist. Der Einsparungseff-

fekt fällt zudem mit zunehmendem Fahrweg größer aus, da der Anteil der mit konstanter Geschwindigkeit zurückgelegten Strecke an der Gesamtstrecke steigt.

Demgegenüber bedingen reduzierte Beschleunigungen (d. h. Anfahr- u. Verzögerungsbeschleunigung) nicht zwangsläufig einen geringeren Energiebedarf. Infolge verringerter Beschleunigungen steigt bzw. fällt die Kurve der Geschwindigkeit langsamer, sodass sich für die gleiche Geschwindigkeit die Beschleunigungs- und Bremsphase verlängern und somit die Widerstände über eine längere Zeit überwunden werden müssen (siehe Abbildung 3). Folglich wird zum Erreichen einer bestimmten Geschwindigkeit mehr Energie benötigt und gleichzeitig in der Bremsphase weniger Energie rekuperiert. Ist der Weg so kurz, dass weder bei kleinen noch bei großen Beschleunigungen die eingestellte Geschwindigkeit erreicht wird, verursacht die Bewegung mit kleinen Beschleunigungen zunächst den geringeren Energiebedarf, da zwar die Beschleunigungs- und Bremsphase länger sind, aber eine geringere Geschwindigkeit erreicht wird und somit die Spitze der Leistungsaufnahme geringer ausfällt. Je länger die zurückzulegende Strecke gewählt wird, desto mehr nähert sich in Abhängigkeit von den zugrundeliegenden Beschleunigungen die erreichte Geschwindigkeit an den eingestellten Wert an, bis dieser schließlich erreicht wird. Das führt dazu, dass ab einer bestimmten Weglänge der Energiebedarf für die Beschleunigungsphase bei kleineren Beschleunigungen den bei größeren übersteigt. Dazu fällt die während des Verzögerns rekupe-rierte Energiemenge im Vergleich zu der Bewegung mit hohen Beschleunigungen auf Grund der zu überwindenden Widerstände immer geringer aus. Der mit konstanter Geschwindigkeit anfallende Energiebedarf pro zurückgelegter Wegeinheit ist für die Bewegung mit hohen und geringen Beschleunigungen identisch. Da bei hohen Beschleunigungen die eingestellte Geschwindigkeit schneller erreicht wird, sind der mit konstanter Geschwindigkeit zurückgelegte Weg und die dafür benötigte Energiemenge immer um einen bestimmten Betrag größer als bei Bewegungen mit reduzierten Beschleunigungen.

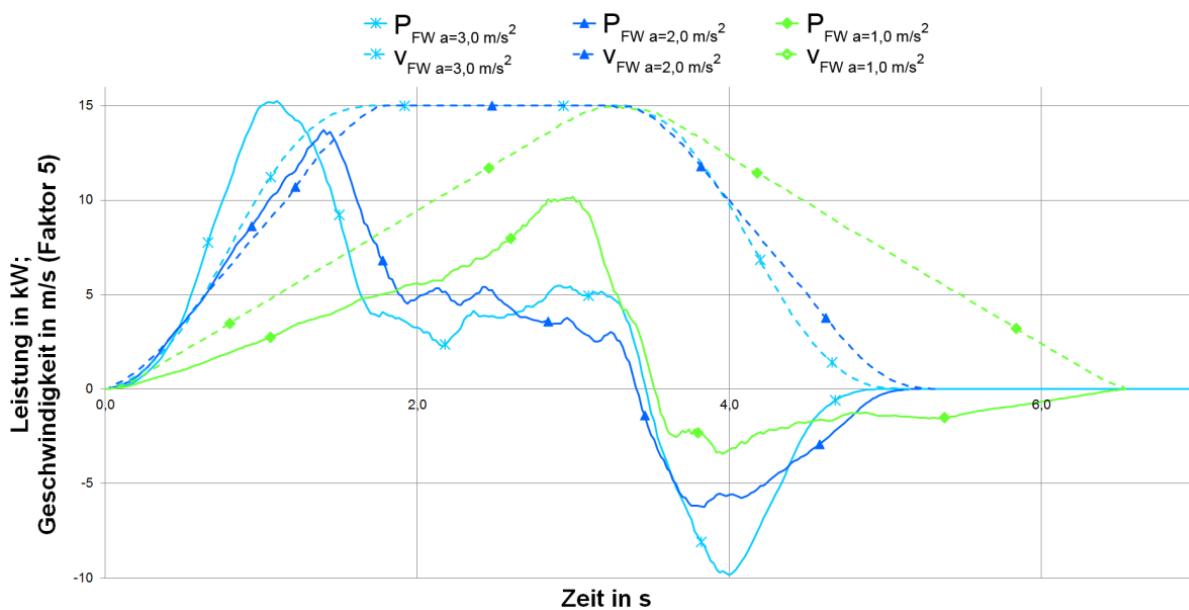
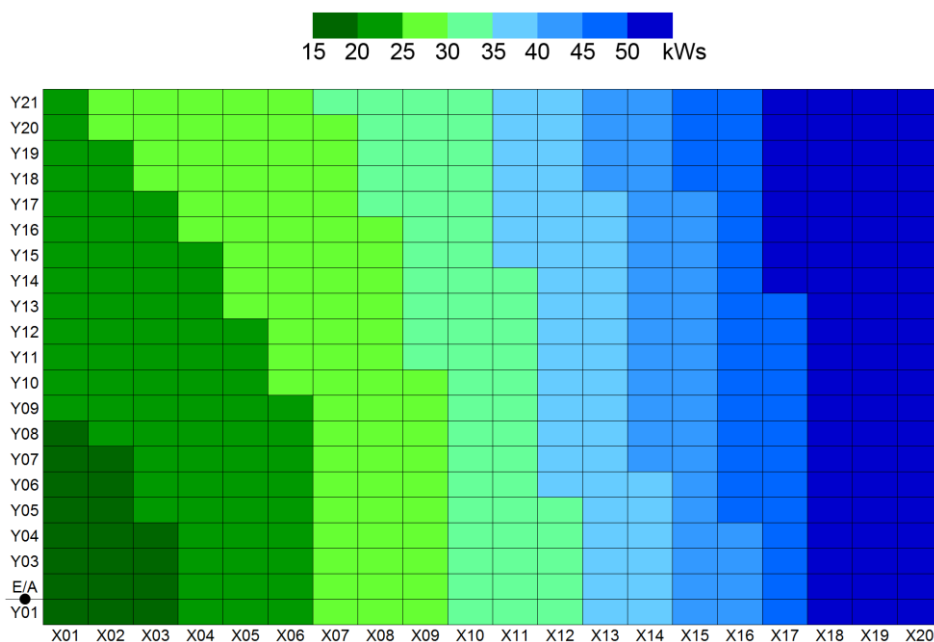


Abbildung 3: Leistungs- und Geschwindigkeitsverläufe des Fahrwerks bei unterschiedlichen Beschleunigungen [SMZ12b, S. 73]

Mit zunehmender Weglänge steigt jedoch der Anteil der mit konstanter Geschwindigkeit zurückgelegten Strecke. Folglich nähern sich die bei reduzierten Beschleunigungen mit konstanter Geschwindigkeit gefahrene Weglänge sowie die dafür benötigte Energiemenge an die bei hohen Beschleunigungen an. Ab einer bestimmten Weglänge übersteigt der Energiebedarf für die Bewegung mit geringen Beschleunigungen den der Fahrt mit hohen Beschleunigungen. Schließlich korrespondiert für den Fall, dass der Weg so kurz ist, dass die eingestellte Geschwindigkeit auch bei hohen Beschleunigungen nicht erreicht wird, zu Bewegungen mit verringerten Beschleunigungen der geringere Energiebedarf. Diese Einspareffekte fallen jedoch deutlich geringer aus als bei Bewegungen mit reduzierten Geschwindigkeiten und werden zudem mit zunehmender Weglänge nivelliert.

In Anlehnung an die isochronen wurden die isoenergetischen Fächer entwickelt. Dabei werden als „isochron“ Fächer bezeichnet, zu deren Anfahrt ausgehend vom Übergabepplatz die gleiche Zeit benötigt wird (vgl. [AF09, S. 199]). Die Lage der isoenergetischen Fächer, also der Fächer, die mit gleichem Energiebedarf angefahren werden können (vgl. [SMZ12a, S. 30]), unterscheidet sich von der Lage der isochronen Fächer und ist zudem von vielen Faktoren abhängig. So ändert sich z. B. die für eine Hubbewegung benötigte bzw. während eines Senkvorgangs reperierte Energiemenge und damit der für die Gesamtheit aus Hub- bzw. Senk- und Fahrbewegung anfallende Energiebedarf in Abhängigkeit von der zu transportierenden Masse. Weitere Einflussgrößen für die Lage der isoenergetischen Fächer sind die Geschwindigkeit sowie in gewissem Umfang die Beschleunigungen, mit denen die Fahrbewegungen ausgeführt werden. Die Energiebedarfe jedes einzelnen Lagerfachs berücksichtigen nicht nur die Fahrt zum Fach, sondern die vollständige Ein- und Auslagerung einer Ladeinheit als Einzelspiele, d. h. es werden neben den Energiebedarfen des Fahr- und Hubwerkes auch der Energiebedarf der Lastübergabe/ -übernahme und die Grundlast berücksichtigt. Beispielhaft sind die isoenergetischen Fächer für eine vorgegebene Fahr- geschwindigkeit von 4,0 m/s in Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4: Isoenergetische Fächer (in Anlehnung an [SMZ12a, S. 32])**

Ein weiteres Ergebnis des Arbeitspakets 2 ist das sogenannte „Bewegungszeitmodell“, mithilfe dessen die Zeiten, die für eine Fahrt vom Übergabepplatz zu einem beliebigen Lagerfach benötigt werden, zunächst separat für Fahr- und Hubbewegungen automatisch ermittelt werden. Die Besonderheit der zugrundeliegenden Berechnungsvorschriften besteht darin, dass die Bewegungszeiten nicht, wie in der Materialflusslehre üblich, unter der Annahme einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung berechnet werden, sondern unter Einbeziehung des Rucks, definiert als Ableitung der Beschleunigung nach der Zeit. Unter der Voraussetzung, dass die eingestellten Werte der Geschwindigkeit und Beschleunigungen erreicht werden, setzt sich eine Bewegung aus sieben Phasen zusammen (siehe Abbildung 5). Der Beschleunigungsvorgang gliedert sich in eine Phase linear steigender, konstanter sowie linear fallender Beschleunigung. Daran schließt eine Phase konstanter Geschwindigkeit an. Der Verzögerungsvorgang besteht analog zu dem Beschleunigungsvorgang aus drei Phasen. In dem Modell sind Geschwindigkeit und Beschleunigungen der Fahr- und Hubbewegungen sowie die Lage des Übergabepplatzes frei wählbar.

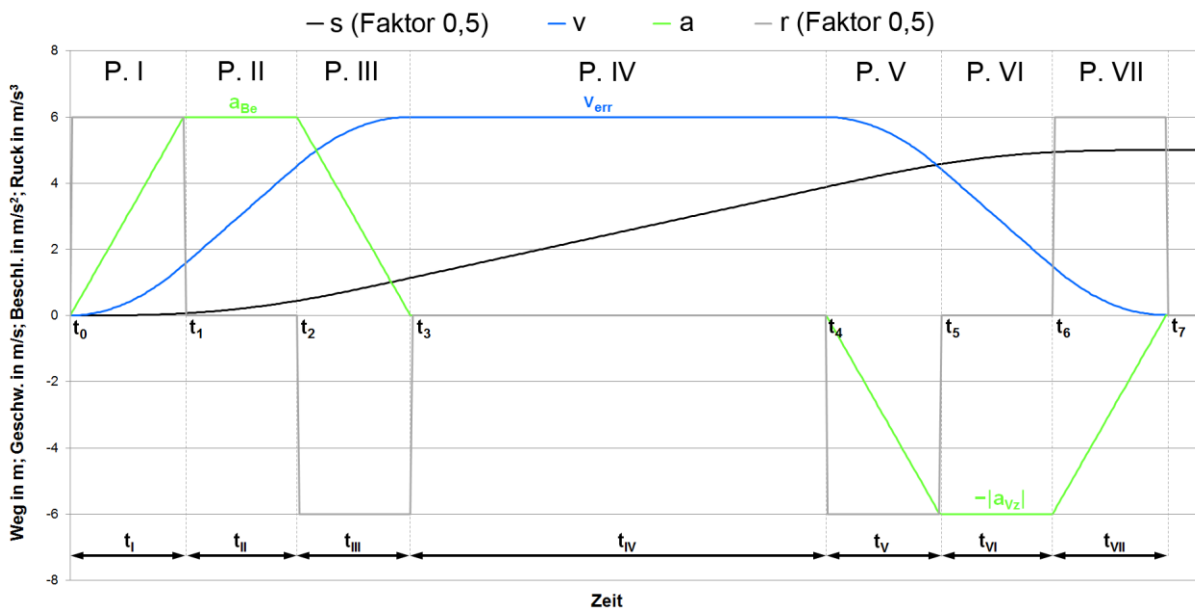


Abbildung 5: Idealisierter Verlauf einer Bewegung über die Zeit (in Anlehnung an [SMZ12b, S. 75])

Mittels vollständiger Enumeration werden für unterschiedliche Lagerstrategien die mittleren Einzelspielzeiten (d. h. die Zeiten für eine Ein- oder Auslagerung) generiert und daraus der Durchsatz (d. h. die Anzahl an Arbeitsspielen, die pro Zeiteinheit durchgeführt werden können) ermittelt. Als Lagerstrategien sind in dem Modell die chaotische sowie zwei Varianten der ABC-Zonierung hinterlegt. Während bei der chaotischen Lagerung die Zuordnung der Güter zu den Fächern beliebig ist, werden bei der ABC-Zonierung die Güter entsprechend ihres Anteils an den Warenbewegungen in die Zonen A, B oder C eingelagert, wobei die Güter mit dem größten Anteil an Warenbewegungen der Zone A zugeordnet werden. Die beiden im Modell abgebildeten Zonierungsvarianten unterscheiden sich hinsichtlich der Größe der einzelnen Zonen.

Weiterhin wurde ein Berechnungsmodell zur Ermittlung des Energiebedarfs von Einzelspielen entwickelt. In dem Modell sind die Energiebedarfe für die Fahr- und Hubbewegungen von dem Übergabeplatz zu den einzelnen Lagerfächern bzw. zurück für unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten hinterlegt. Dabei wurde eine einheitliche Nutzmasse für alle Ladeeinheiten angenommen. Die Last- und Leerfahrten der Ein- und Auslagerungsbewegungen werden für die Berechnung des Energiebedarfs jedes einzelnen Lagerfachs berücksichtigt und ein Mittelwert gebildet. Das Modell generiert durch vollständige Enumeration die Energiebedarfe der Einzelspiele zum einen für die chaotische Lagerung und zum anderen für die beiden oben erwähnten Varianten der ABC-Zonierung. Anzumerken ist, dass infolge der Einbeziehung des Rucks in die Berechnungen der Bewegungszeiten die in der FEM-Richtlinie 9.851 bzw. VDI-Richtlinie 3.561 definierten Flächen und zugehörigen Referenzfächer für die Abbildung der Arbeitsspiele nicht mehr repräsentativ. Deshalb wurden die Spielzeiten und Energiebedarfe der Einzelspiele mithilfe der vollständigen Enumeration ermittelt. Dieses Verfahren ist jedoch für Doppelspiele, bei denen eine Ein- und eine Auslagerung in einem Arbeitsspiel verbunden werden, aufgrund der großen Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten nicht anwendbar. Hierfür muss das Werkzeug der Simulation herangezogen werden (siehe Arbeitspaket 3).

<b>Arbeitspaket 3</b>	<b>Personaleinsatz [PM]</b>
<b>Entwicklung energieeffizienter Arbeitsspielstrategien und Szenarien</b>	<b>12</b>

Durchgeführte Arbeiten:

Das Modell zur Bestimmung der Bewegungszeiten und des Energiebedarfs von Einzelfahrten wurde in ein Simulationsmodell zur Abbildung verschiedener Lagerbetriebsstrategien überführt. Bereits existierende und in der Praxis verwendete Lagerbetriebsstrategien wurde implementiert. Optimale kinematische Parameter zur energetischen Optimierung von Einzelaufträgen konnten berechnet werden. Die Einflüsse der Position verschiedener Ein- und Auslagerpunkte wurde überprüft, um im weiteren Verlauf die Anzahl möglicher Simulationsexperimente zu reduzieren.

Erzielte Ergebnisse:

Das im Arbeitspaket 2 entwickelte Rechenmodell zur Bestimmung der Bewegungszeiten und des Energiebedarfs von Einzelbewegungen wurde herangezogen, um in einem Beispielregal, das 12,40 m hoch und 40,0 m lang ist (80 Fächer à 0,50 m Breite in der Länge und 40 Fächer à 0,31 m in der Höhe, sodass eine Regalfront eine Kapazität von 3.200 Fächern aufweist), für jedes Fach die spezifische Bewegungszeit und den Energiebedarf bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten (Abstufung von 0,5 m/s-Schritten zwischen 5,0 m/s und 1,0 m/s) zu berechnen. Dadurch ist es möglich, für jede beliebige Lagerbetriebsstrategie den durchschnittlichen Energiebedarf sowie die Arbeitsspielzeiten und somit die durchschnittliche Durchsatzleistung des Beispiellagers zu bestimmen.

Auf dieser Grundlage wurde ein Simulationsmodell mit der Software Plant Simulation erstellt (siehe Abbildung 6). Im Simulationsmodell wurden gängige Lagerbetriebsstrategien abgebil-



det. Lagerbetriebsstrategien werden unterschieden in Lagerbewirtschaftungs- und Bewegungsstrategien. Lagerbewirtschaftungsstrategien wiederum werden in Lagerplatzvergabe- und Ein- und Auslagerstrategien unterteilt. Zu den Lagerplatzvergabe-strategien gehören die Festplatzlagerung, chaotische Lagerung, die Querverteilung und die Zonierung. Bei der Festplatzlagerung werden jedem Artikel bestimmte Lagerplätze zugeordnet. Das Gegenstück zur Festplatzlagerung ist die freie Lagerplatzvergabe, die auch als chaotische Lagerung bekannt ist. Dabei kann jede LE, unabhängig von dem darin enthaltenen Artikel, in einem beliebigen freien Lagerplatz gelagert werden. Erfolgt eine Zonierung der Regalfläche, wird das Lager bzw. Regal in Bereiche eingeteilt. Artikel mit bestimmten Eigenschaften werden jeweils einer Zone zugeordnet. Kommt die Querverteilung zum Einsatz werden die Artikel in mehreren Lagergassen, Lagerbereichen oder Lagerkanälen gelagert. Zuletzt kann die Sekundärstrategie des kürzesten Fahrwegs mit allen anderen genannten Strategien kombiniert werden, wobei der Lagerplatz mit der geringsten Bewegungszeit angefahren wird. Von den genannten Lagerplatzvergabe-strategien werden lediglich die chaotische Lagerung, die Zonierung und zusätzlich die Kürzeste-Fahrzeit-Regel im Simulationsmodell betrachtet, weil die Festplatzlagerung nicht flexibel genug ist und die Querverteilung eine gassenübergreifende Strategie ist. Die zu definierende energieeffizientere Lagerbetriebsstrategie soll jedoch gassengebunden sein. (vgl. [Gud10, S. 598 f.; tHSN07, S. 106; tHS10, S. 32, S. 340 ff.] )

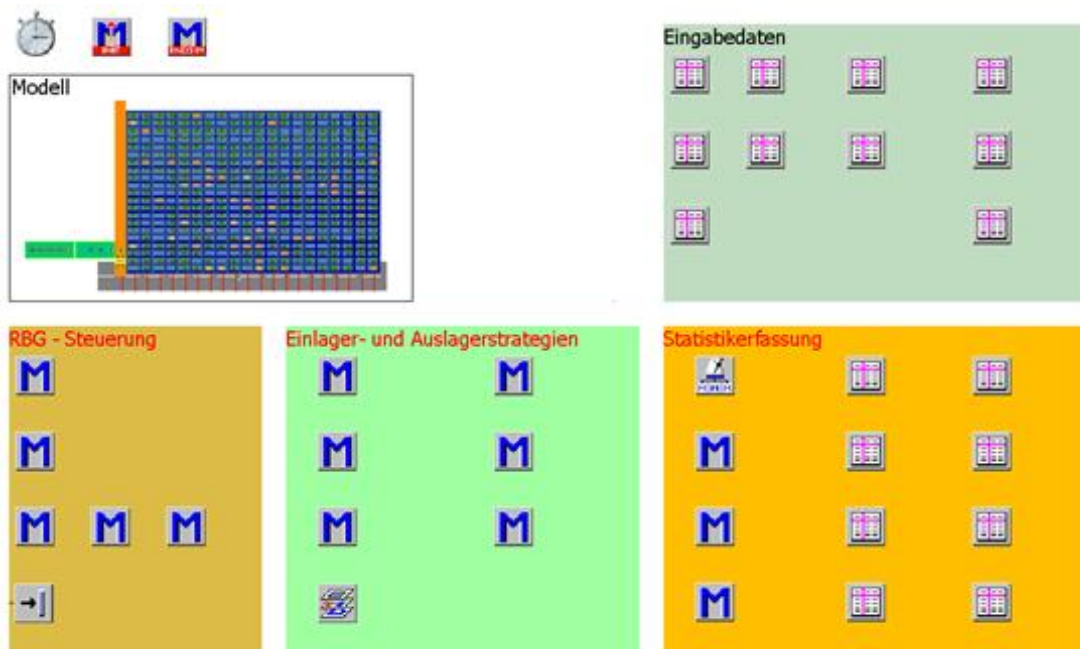


Abbildung 6: Das entwickelte Simulationsmodell

Zu den Ein- und Auslagerstrategien zählen First In First Out (FIFO), Last In First Out (LIFO), die Mengenanpassung, die wegoptimierte Ein- und Auslagerung, die Restmengenbevorzugung und die Einlagerung nahe Auslagerung. Für die Untersuchungen wurde sich in Abstimmung mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses für die Auslagerstrategie FIFO entschieden, weil dies die in der Praxis am häufigsten eingesetzte Strategie darstellt. Für die Mehrzahl der anderen genannten Strategien ist die Implementierung in einem Simulationsmodell zu aufwändig. (vgl. [Gud10, S. 600; tHSN07, S. 107])

Zu den Bewegungsstrategien gehören im Allgemeinen die Einzel- und Doppelspielstrategie, die Fahrwegoptimierung und Umlagerstrategien. Umlagerungen werden im Modell zunächst nicht betrachtet, weil ein einfachtiefes Regal betrachtet wird. Umlagerungen innerhalb eines Regals finden v. a. in mehrfachtiefen Regalen statt. Umlagerungen in einfachtiefen könnten innerhalb auftragsschwacher Zeiten durchgeführt werden, verursachen aber zusätzliche Bewegungen und benötigen daher zusätzlich Energie. Daher werden sie nicht weiter betrachtet. Die Fahrwegoptimierung, bei der Ein- und Auslagerungen nur im gleichen Fahrbereich ausgeführt werden sollen, ist eine ergänzende Strategie, die die möglichen Bewegungen des Regalbediengerätes weiter einschränken würde. Obwohl diese Strategie aus energetischer Sicht interessant sein könnte, wird sie von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, weil die Wahrscheinlichkeit, dass Ein- und Auslagerungen im gleichen Fahrbereich liegen relativ gering ist und der Steuerungsaufwand dieser Strategie generell hoch ist. (vgl. [Gud10, S. 600; GAU11, S. 20 f.] )

Neben der Optimierung der Lagerplatzvergabestrategie können auch die Einzelbewegungen bei vorgegebenen Aufträgen optimiert werden. Ist die Hubzeit höher als die Fahrzeit kann die Geschwindigkeit des Fahrwerkes so weit verringert werden, das beide Zeiten übereinstimmen. Diese Geschwindigkeit ist über die Bewegungsgleichungen von Fahrwerk und Hubschlitten berechenbar (siehe Formel (1)). So kann der Energiebedarf dieses Bewegungsvorgangs reduziert werden (siehe Abbildung 7).

$$v_{FW \text{ anp } 1,2} = -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{a_{FW \text{ err}}^2}{r_{FW}} - (t_{HW \text{ Bew real}} - t_{FW \text{ Ruck}}) \cdot a_{FW \text{ err}} \right) \pm \sqrt{\left[ -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{a_{FW \text{ err}}^2}{r_{FW}} - (t_{HW \text{ Bew real}} - t_{FW \text{ Ruck}}) \cdot a_{FW \text{ err}} \right) \right]^2 - s_{FW \text{ ges}} \cdot a_{FW \text{ err}}} \quad (1)$$

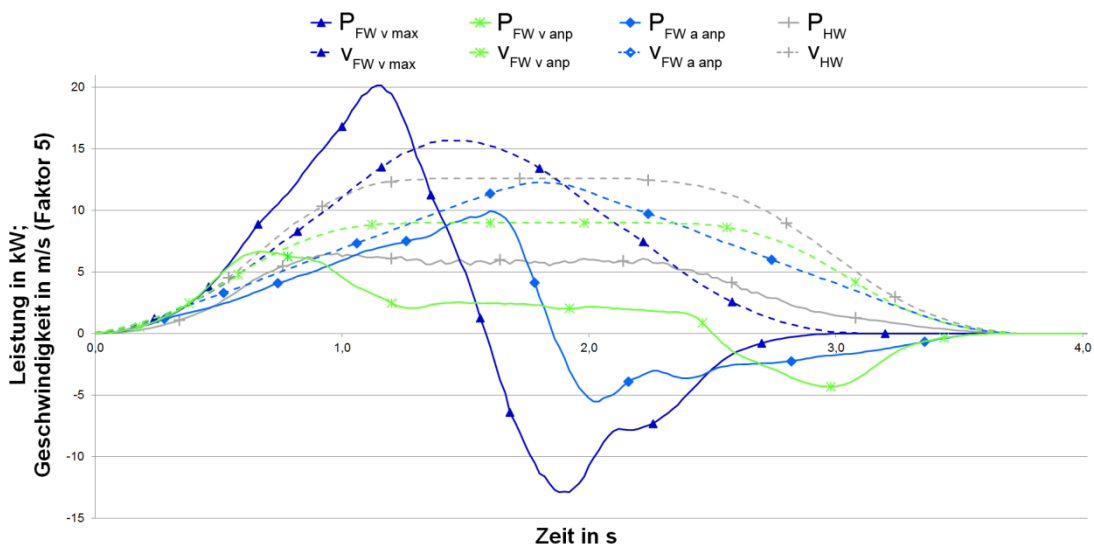


Abbildung 7: Vergleich der Leistungs- und Geschwindigkeitsverläufe bei Anpassung der Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung des Fahrwerks an die Bewegungszeit des Hubwerks (in Anlehnung an [SMZ12b, S. 77])

Ist dagegen die Fahrzeit länger, kann die Hubbewegung optimal gestartet werden, sodass die vom Fahrwerk maximal zurückgewonnene Energie für die Hubbewegung genutzt werden kann. Wird die Hubbewegung gestartet sobald die Fahrbewegung gebremst wird, kann dies zu einer Verlängerung der Arbeitsspielzeit führen. Somit sollte der Startpunkt des Hubwerkes so gewählt werden, dass Hubschlitten und Fahrwerk gleichzeitig ankommen. Bei einer Senkbewegung starten jedoch beide gleichzeitig, um die im Hubschlitten gespeicherte potentielle Energie für die Beschleunigung des Fahrwerkes nutzen zu können.

Zusätzlich zur Lagerbetriebsstrategie hat die Position des Ein- und Auslagerpunktes (E-/A-Punkt) Einfluss auf den Energiebedarf eines automatisierten Lagers. Daher wurden in Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss verschiedene Punkte definiert, die anfangs betrachtet werden sollen. Es wurde festgelegt, den E-/A-Punkt ausgehend von der realen Lage im Automatischen Kleinteilelager des ILM (ILM-AKL) horizontal und vertikal zu verlegen, um die energetischen Auswirkungen zu überprüfen. Mit dem Simulationsmodell wurden die Auswirkungen der verschiedenen Positionen des E-/A-Punktes auf den mittleren erzielbaren Durchsatz und den mittleren Energiebedarf pro Stunde bei den maximalen kinematischen Parametern und chaotischer Lagerung simuliert. Es hat sich herausgestellt, dass eine vertikale Verschiebung des E-/A-Punktes nur zu einer geringen Reduzierung des Energiebedarfs pro Stunde im ILM-AKL führt. Als Ursache kann der relativ hohe Wirkungsgrad der Rekuperation des Hubwerkes genannt werden, der bei ca. 75-80% liegt. Die Vermutung, dass der Energiebedarf des RBG durch die Anordnung des E-/A-Punktes in der obersten Ebene des Regals verringern lässt, weil die potentielle Energie besser genutzt wird, konnte nicht bestätigt werden. Wird ein Paletten-RBG betrachtet, könnte das Ergebnis jedoch ein anderes sein. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen. Weiterhin wurde eine horizontale Verschiebung des E-/A-Punktes untersucht. Der E-/A-Punkt wird theoretisch mittig unter dem Regal angeordnet. Für die Förderung der Ladeeinheiten dorthin könnten Shuttles oder Rollenförderer zum Einsatz kommen. Es wurde angenommen, dass die Förderung mit Shuttles realisiert wird. Der Energiebedarf der Shuttles (Last- und Leerfahrten) wird in die Energiebedarfswerte des RBG mit einbezogen. Die horizontale Verlagerung des E-/A-Punktes erzielt die besten Ergebnisse hinsichtlich des mittleren erzielbaren Durchsatzes und des mittleren Energiebedarfs pro Stunde. Wird der E-/A-Punkt nicht unter, sondern über dem Regal angeordnet, unterscheiden sich die Ergebnisse nicht. Der Nachteil dieser Variante ist allerdings, dass sie baulich viel schwieriger zu realisieren wäre. Zuletzt wurde noch ein getrennter E- und A-Punkt untersucht. Es wird angenommen, dass der E-Punkt vertikal mittig und der A-Punkt in der zweiten Regalebene (wie bei der realen Anlage) liegt. Zwar sinkt der mittlere Energiebedarf pro Stunde bei diesem E-/A-Punkt gegenüber einem E-/A-Punkt, der an der Regalstirnseite des Regals liegt, aber gleichzeitig sinkt der mittlere erzielbare Durchsatz wegen der Zwischenfahrt vom A- zum E-Punkt. Daher sollte ein getrennter E-/A-Punkt nur dann weitergehend untersucht werden, wenn dies aus baulichen Gründen erforderlich ist.

Aufgrund der Simulationsergebnisse, bei denen die Energiebedarfe für ein RBG ohne und mit Rückspeiseeinheit in Einzel- und Doppelspielen ermittelt wurden (siehe Abbildung 8), wurde in den Beratungen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss beschlossen, sich in den weiteren Untersuchungen auf zwei E-/A-Punkte zu konzentrieren: den klassischen E-/A-Punkt, wie er an der realen Anlage des ILM zu finden ist (auf der zweiten Regalebene

an der Stirnseite des Regals) und den horizontal verschobenen E-/A-Punkt, der mittig unter dem Regal angeordnet ist und mit theoretisch mit Shuttles angefahren wird. Dabei wurde angenommen, dass sich die Ergebnisse bei anderen Lagerbetriebsstrategien oder anderen vorgegebenen Geschwindigkeiten zwar quantitativ ändern werden, dies aber in gleichem Maße für alle E-/A-Punkte, sodass die qualitativen Ergebnisse unverändert bleiben.

Insbesondere aus den Erkenntnissen von Arbeitspaket 2 konnten mehrere Lagerbetriebsstrategien abgeleitet werden, mit denen der Energiebedarf von RBGs reduziert werden könnte. Zu diesen Strategien gehört die „Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an die Hubzeit“ (siehe Abbildung 7). Die zweite Strategie ist die „energetische ABC-Zonierung“, bei der die Fächer einer Zone im Regal den A-, B- und C-Artikel auf Basis des Energiebedarfs jedes Fachs zugeordnet werden (vgl. Abbildung 4). In Anlehnung an die Kürzeste-Fahrzeit-Regel wurde die Niedrigste-Energiebedarfs-Regel abgeleitet, bei der eine Ladeinheit in das freie Lagerfach mit dem niedrigsten Energiebedarf eingelagert wird. Weil der erforderliche Durchsatz pro Stunde in der Realität schwankt und somit die maximal erzielbare Durchsatzleistung nur zu wenigen Zeitpunkten benötigt wird, wurde die Lagerbetriebsstrategie „Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den Durchsatz“ abgeleitet. Bei dieser Strategie wird die Fahrwerksgeschwindigkeit (in 0,5-m/s-Schritten) dem je Stunde geforderten Durchsatz angepasst. Die Auswirkungen der abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien werden nach der Verifikation der Einzelbewegungen des RBG simuliert und mit bestehenden Lagerbetriebsstrategien gegenübergestellt.

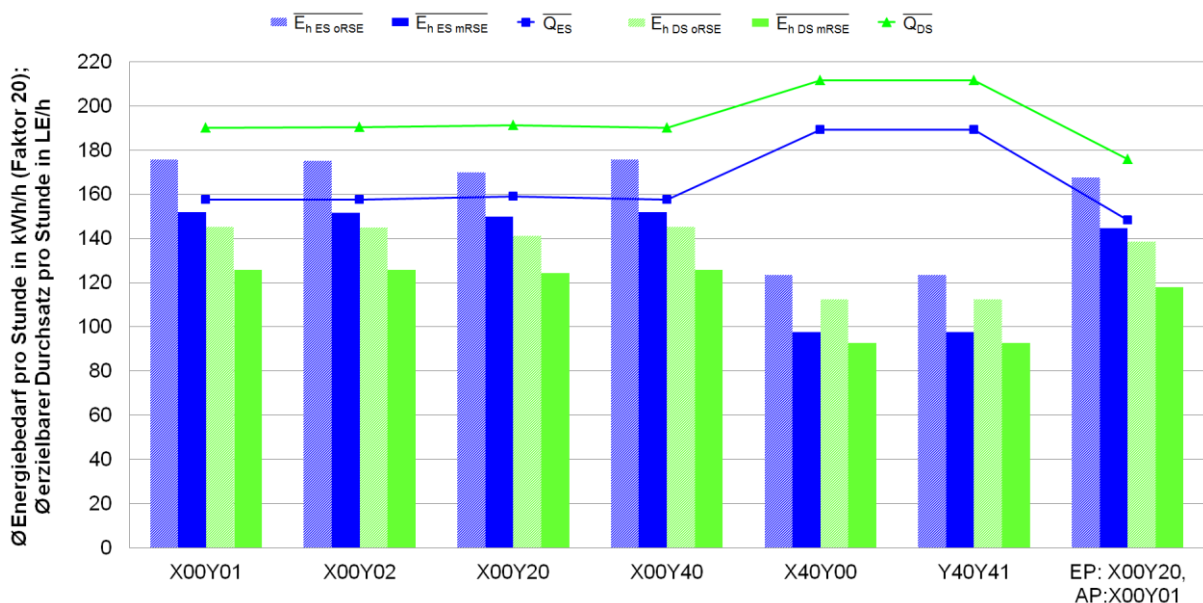


Abbildung 8: Mittlerer Energiebedarf pro Stunde und mittlerer Durchsatz für verschiedene Positionen des Ein- und Auslagerungspunktes

<b>Arbeitspaket 4</b>	<b>Personaleinsatz [PM]</b>
<b>Verifikation der entwickelten Szenarien (Lagerzonen / Tageslastprofil / Arbeitsspiele)</b>	<b>8</b>

Durchgeführte Arbeiten:

Die in Arbeitspaket 3 entwickelten Optimierungen für Einzelbewegungen wurden am Automatischen Kleinteilelager des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik (ILM-AKL) praktisch getestet. Zum einen wurde überprüft, ob die Berechnung der angepassten Fahrwerksgeschwindigkeit an die Hubzeit zu einem niedrigeren Energiebedarf als bei nicht-optimierten RBG-Bewegungen führt und ob Fahr- und Hubwerk bei einem gleichzeitigen Start bei der berechneten Geschwindigkeit dann auch zeitgleich an den Zielkoordinaten ankommen. Da die elektrischen Leistungsdaten am ILM-AKL direkt an den Antrieben aufgezeichnet werden (Werte alle 20ms), wurde die Daten zum Vergleich auch mit einem externen Messgerät aufgezeichnet. Da das ILM-AKL eine relativ kurze Regalgasse hat, wurde ein weiterer Test an einer Anlage der SSI Schäfer Noell GmbH in ihrer Versuchshalle in Giebelstadt durchgeführt, um die elektrischen Leistungen bei höheren Geschwindigkeiten mit einem externen Leistungsmessgerät bestimmen zu können. Weiterhin wurden ausgewählte Einzel- und Doppelspiele nachgefahren, um die entsprechenden Energiebedarfe vergleichen zu können. Für die Berechnung der Bewegungszeiten sollten außerdem die kinematischen Parameter des ILM-AKL verifiziert werden. Hierfür wurde ein Ladehilfsmittel mit einem Messsystem und entsprechenden Sensoren ausgerüstet, womit die Beschleunigungen aufgenommen wurden.

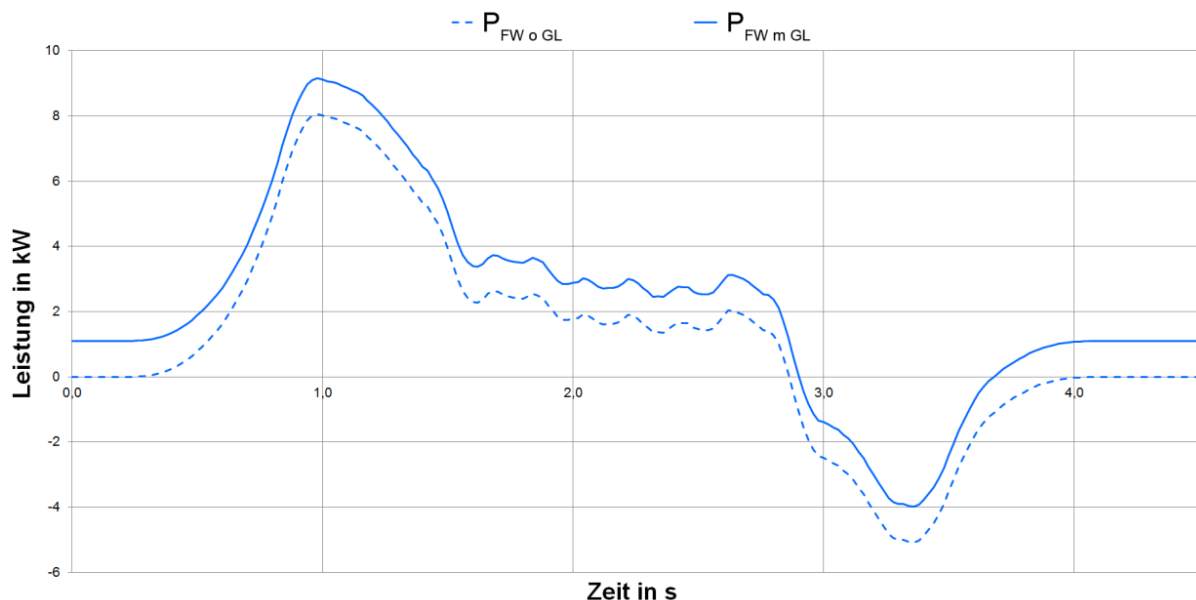
Erzielte Ergebnisse:

Die in Arbeitspaket 3 entwickelten Optimierungen für Einzelbewegungen (reduzierte Fahrwerksgeschwindigkeit, wenn die Hubzeit länger als die Fahrzeit ist und verzögerter Start des Hubwerkes, wenn die Fahrzeit länger als die Hubzeit ist) wurden mehrere Bewegungen theoretisch berechnet. Mit den sich ergebenden Parametern, z. B. für die reduzierte Fahrwerksgeschwindigkeit, wurden im Folgenden dann am Automatischen Kleinteilelager des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik eingegeben und mit nicht-optimierten Bewegungen verglichen. Im Ergebnis ist festzustellen, dass mit den optimierten kinematischen Parametern Fahrwerk und Hubschlitten gleichzeitig starten und an den Zielkoordinaten ankommen sowie auf diese Weise der Energiebedarf dieser Bewegungen reduziert wird ohne die Gesamtbewegungszeit zu verlängern. Somit konnte praktisch bewiesen werden, dass diese Bewegungsstrategie energieeffizienter ist als klassische, nicht-optimierte Bewegungen.

Als weiteres Ergebnis wurde festgestellt, dass bei gleicher Fahrzeit eine Geschwindigkeitsreduzierung des Fahrwerks gegenüber einer Beschleunigungsreduzierung energetisch günstiger ist (vgl. auch Abbildung 7), wodurch die Modellbildung hinsichtlich der Optimierung vereinfacht wird.

Insbesondere anhand der Daten, die an der Anlage von SSI Schäfer gewonnen wurden, konnte festgestellt werden, dass neben dem Energiebedarf für Fahrwerk, Hubwerk und die Lastübergabe die sogenannte Grundlast wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf von RBGs hat. Die Grundlast ist die elektrische Leistung, die in jedem Fall anliegt, um die elektrischen Verbraucher zu versorgen. Sie ist bei RBGs, die mit einer Rückspeiseeinheit ausge-

stattet sind, höher als bei RBGs ohne Rückspeiseeinheit, weil eine Rückspeiseeinheit ebenfalls ein elektrischer Verbraucher ist. Abbildung 9 visualisiert die Auswirkungen der Grundlast. Es wird deutlich, dass die Grundlast bei Energierückgewinnung zuerst überwunden werden muss, bevor die Energie weiterverwendet werden kann. Somit muss die Grundlast über die Arbeitsspielzeiten in die Berechnung des Energiebedarfs pro Ladeeinheit (und über den Durchsatz in die Berechnung des Energiebedarfs pro Stunde) einbezogen werden. Dementsprechend wird auch deutlich, dass die Berechnung der Bewegungs- bzw. Arbeitsspielzeiten so exakt wie möglich erfolgen sollte, weil der Energiebedarf sonst zu niedrig berechnet wird. Aus diesem Grund werden die Bewegungszeiten für Fahr- und Hubwerk des RBG unter Berücksichtigung des Rucks bestimmt (siehe Abbildung 5). Für die Verifizierung der vorgegebenen kinematischen Parameter des RBG am ILM wurde ein Ladehilfsmittel mit einem Messsystem und entsprechenden Sensoren ausgerüstet. Es wurde festgestellt, dass die Beschleunigungswerte des Hubwerks nicht den vom Hersteller gegebenen Werten entsprechen. Nur in der Beschleunigungsphase decken sich die Werte ( $4,0 \text{ m/s}^2$ ). In der Verzögerungsphase des Hubwerks ist der Beschleunigungswert jedoch geringer ( $3,2 \text{ m/s}^2$ ). Abbildung 10 zeigt das ILM-AKL.



**Abbildung 9: Leistungsverlauf einer Bewegung mit und ohne Berücksichtigung der Grundlast**

Die wichtigsten Daten des ILM-AKL sind:

- Regal:

- Länge: 10,00 m; Fachbreite: 0,50 m; 20 Fächer in horizontaler Richtung
- Höhe: 6,51 m; Fachhöhe: 0,31 m; 21 Fächer in der vertikalen Richtung
- Ein- und Auslagerungspunkt befindet sich an der Stirnseite des Regals auf Höhe der zweiten Regalzeile
- Maximale Fachlast: 30 kg

- RBG:

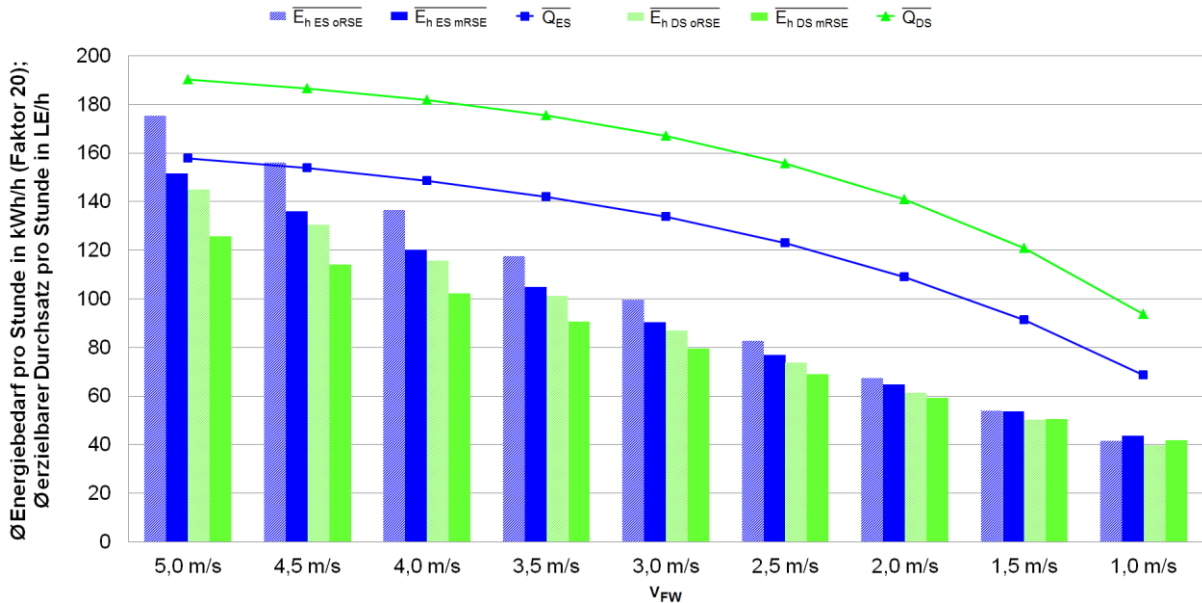
- Gesamtmasse des RBG: 1.996 kg
- Masse des Hubschlittens: 215 kg
- Maximale Nutzlast: 100 kg

- Fahrwerk:
  - Maximale Geschwindigkeit: 5,0 m/s
  - Maximale Beschleunigung: 3,0 m/s<sup>2</sup>
  - Ruck: 6,0 m/s<sup>3</sup>
- Hubschlitten:
  - Maximale Geschwindigkeit: 4,0 m/s
  - Maximale Beschleunigung in der Beschleunigungsphase: 4,0 m/s<sup>2</sup>
  - Maximale Beschleunigung in der Verzögerungsphase: - 3,2 m/s<sup>2</sup>
  - Ruck: 8,0 m/s<sup>3</sup>
- Grundlast in Bewegung: 1,1 kW
- Grundlast nach einer Minute Stillstandzeit: 0,685 kW



**Abbildung 10:** Das Automatische Kleinteilelager am Institut für Logistik und Materialflusstechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg [SMZ12b, S. 71]

Wie zu erwarten war, ist der mittlere Energiebedarf von Doppelspielen (sowohl pro Ladeinheit als auch pro Stunde) niedriger als von Einzelspielen (siehe Abbildung 11). Da jedoch nicht immer Doppelspiele ausgeführt werden können und der tatsächlich geforderte Durchsatz in der Realität schwankt, wurden Durchsatz-Szenarien kreiert, die unterschiedlich hoch ausgelastete Regalläger mit Regalbediengeräten repräsentieren sollen. In diesen Szenarien schwanken die geforderten Durchsätze über der Zeit.



**Abbildung 11: Mittlerer Energiebedarf pro Stunde und mittlerer erzielbarer Durchsatz pro Stunde bei chaotischer Lagerung [SSTSZ13, S. 100]**

Innerhalb der Szenarien können auch Stillstandzeiten des RBG entstehen. In diesen Zeiten liegt weiterhin eine Grundlast an und daher müssen die Stillstandzeiten in die Berechnung der Energiebedarfe pro Stunde einbezogen werden. Wenn ausschließlich entweder Einzel- oder Doppelspiele im Betrachtungszeitraum ausgeführt werden, können die entsprechenden stündlichen Energiebedarfe mit den Formeln (2) und (3) bestimmt werden. Werden sowohl Einzel- und Doppelspiele im Betrachtungszeitraum ausgeführt, d. h. es gibt einen Doppelspielanteil (gekennzeichnet durch „p“), muss die mittlere Stillstandzeit pro Stunde in Formel (4) über die kumulierten (mittleren) Einzel- und Doppelspielzeiten bestimmt werden.

$$\overline{E}_{h ES} \text{ [kWh/h]} = \frac{\overline{E}_{ES} \cdot \overline{Q}_{ES} + (3.600 - \overline{t}_{ES} \cdot \overline{Q}_{ES}) \cdot P_{GL}}{3.600} \quad (2)$$

$$\overline{E}_{h DS} \text{ [kWh/h]} = \frac{\frac{\overline{E}_{DS}}{2} \cdot \overline{Q}_{DS} + (3.600 - \frac{\overline{t}_{DS}}{2} \cdot \overline{Q}_{DS}) \cdot P_{GL}}{3.600} \quad (3)$$

$$\overline{E}_h \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{h}} \right] = \frac{\overline{Q}_p \cdot \overline{E}_{LE}}{3.600} + \overline{t}_{\text{Still}} \cdot P_{GL} \quad (4)$$

$$\overline{E}_h \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{h}} \right] = \overline{ES}_p \cdot \overline{E}_{LE ES} + 2 \cdot \overline{DS}_p \cdot \overline{E}_{LE DS} + (3.600 - \overline{t}_{ES} \cdot \overline{ES}_p - \overline{t}_{DS} \cdot \overline{DS}_p) \cdot P_{GL}$$

Die Erarbeitung der isoenergetischen Fächer wurde anhand der Erkenntnisse dieses Arbeitspaketes überarbeitet, sodass die Grundlast in der Berechnung des Energiebedarfs jedes Lagerfachs berücksichtigt wird. Es ist anzumerken, dass die isoenergetischen Fächer auf Grundlage von Einzelspielen entwickelt wurden. In die Berechnung ihres Energiebedarfs fließen über die Einzelspielzeit das Ein- und das Auslagereinzelspiel ein, wobei die jeweiligen Zeiten identisch sind.



<b>Arbeitspaket 5</b>	<b>Personaleinsatz [PM]</b>
<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung / komplexe Anlagen</b>	<b>12</b>

Durchgeführte Arbeiten:

Die Auswirkungen auf den mittleren erzielbaren Durchsatz und den mittleren Energiebedarf der in Arbeitspaket 3 abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien wurden mittels des Simulationsmodells überprüft und mit bestehenden Strategien gegenübergestellt. Mitarbeiter zweier Firmen des Projektbegleitenden Ausschusses wurden beim Design der Simulationsexperimente und bei den Kostenberechnungen für Beratungen konsultiert. Für die übergeordnete Bewegungsstrategie „Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den Durchsatz“ wurden die in Arbeitspaket 4 entwickelten Durchsatz-Szenarien herangezogen, um die Auswirkungen dieser Strategie in Verbindung mit der chaotischen Lagerung zu simulieren. Anschließend wurden die abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien miteinander kombiniert, weil sie sich ggf. gegenseitig (positiv wie auch negativ) beeinflussen. Beispielsweise sinkt das Potential der Anpassung der Fahrgeschwindigkeit an die Hubzeit bei gleichzeitiger Anpassung der Geschwindigkeit an den geforderten Durchsatz je Stunde. Mit den Ergebnissen konnten die jährlichen Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen jeder Lagerbetriebsstrategie(-kombination) in einem realistischen Szenario bestimmt werden.

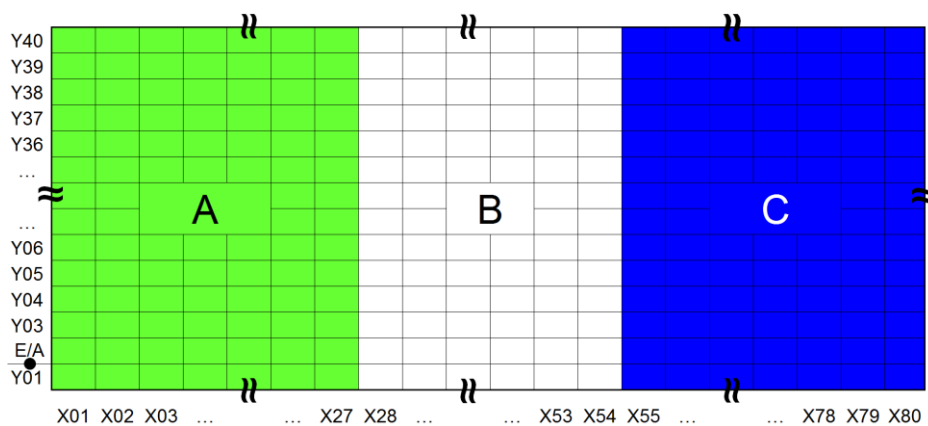
Erzielte Ergebnisse:

Im Simulationsmodell wurden die abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien in einem größeren AKL implementiert als es dem ILM zur Verfügung steht, da die real zur Verfügung stehende Anlage im Vergleich zu Anlagen in der Industrie relativ klein ist. Für das Regal wird angenommen, dass es 40,00 m lang und 12,40 m hoch ist. Es verfügt über eine Gesamtkapazität von 3.200 Fächern (80x40 Fächer). Das Beispiel-RBG wiegt insgesamt 2.190 kg, wovon die Masse des Hubschlittens 215 kg beträgt. Diese Daten stammen vom Versuchs-RBG, das SSI für die Versuchszwecke in Arbeitspaket 4 zur Verfügung stellte. Es wird eine durchschnittliche Nutzmasse von 20,00 kg angenommen. Für die Simulation wird von einer Lageranfangsbelegung von 80%, einem Sicherheitsbestand von 10% und einem maximalen Lagerfüllgrad von 95% ausgegangen.

Die erste abgeleitete Lagerbetriebsstrategie, deren Auswirkungen im Simulationsmodell überprüft wurde, ist die „Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an die Hubzeit“. Bei jeder einzelnen Bewegung des RBG wird die Fahrwerksgeschwindigkeit so weit reduziert, dass Fahr- und Hubzeit bei der einzelnen Bewegung nach der Anpassung gleich groß sind (siehe Abbildung 7). Somit hat diese Strategie keinen Einfluss auf die (mittleren erzielbaren) Durchsatzleistungen, sondern nur auf den mittleren Energiebedarf. Sie ist mit jeder anderen Lagerbetriebsstrategie kombinierbar. Für die Simulation wurde die chaotische Lagerung zugrunde gelegt. Die Simulationsläufe wurden mit unterschiedlichen fest vorgegebenen maximalen Fahrwerksgeschwindigkeiten durchgeführt. Wie zu erwarten war, verringert sich das Energieeinsparpotential der Strategie „Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den Durchsatz“ mit sinkender vorgegebener Geschwindigkeit, weil die bei jeder Einzelbewegung im RBG gespeicherte kinetische Energie geringer ist. Wird die chaotische Lagerung ange-

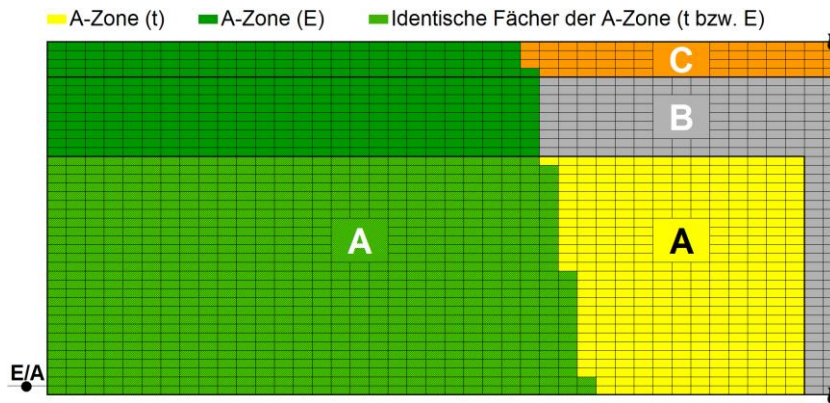
wendet, beträgt das Energieeinsparpotential z. B. bei 5,0 m/s ca. 10,5% und bei 1,0 m/s nur noch ca. 2,5%. Im Ergebnis konnte jedoch trotzdem festgestellt werden, dass die Strategie bei jeder vorgegebenen Fahrwerksgeschwindigkeit einen geringeren Energiebedarf aufweist als ohne Anpassung der Geschwindigkeit an die Hubzeit, unabhängig davon, ob das RBG über eine Rückspeiseeinheit verfügt oder nicht. Die möglichen Energieeinsparungen hängen jedoch auch von der gewählten Lagerbetriebsstrategie ab. So sinkt das mögliche Energieeinsparpotential z. B. bei einer ABC-Zonierung kombiniert mit der Kürzesten-Fahrzeit-Regel bei Doppelspielen je nach vorgegebener maximaler Fahrwerksgeschwindigkeit auf unter 2%.

In Anlehnung an die klassische ABC-Zonierung (auf Basis der Zeit) wurde in Arbeitspaket 3 die energetische ABC-Zonierung abgeleitet. Die Fächer des Regals sollen annähernd gleichverteilt auf die Zonen sein (siehe Abbildung 12). Somit entfallen 1.080 Fächer auf die A- und C-Zone sowie 1.040 Fächer auf die B-Zone. In den Untersuchungen wird die 80/20-Regel angewendet, d. h. 80% aller Lagerbewegungen werden von ca. 20% der Artikel (A-Artikel) verursacht, 15% der Lagerbewegungen von 30% der Artikel (B-Artikel) und lediglich 5% der Bewegungen entfallen auf 50% des Artikelspektrums (C-Artikel). Außerdem wird „unterstellt, dass der Anteil der jeweiligen Artikelklasse an den Lagerbewegungen der Anfahrwahrscheinlichkeit der korrespondierenden Zone entspricht“ [SSTSZ13, S. 101]. Innerhalb der Zonen erfolgt eine chaotische Lagerung. (vgl. [SSTSZ13, S. 101])



**Abbildung 12: ABC-Zonierung auf Basis der Zeit [SSTSZ13, S. 101]**

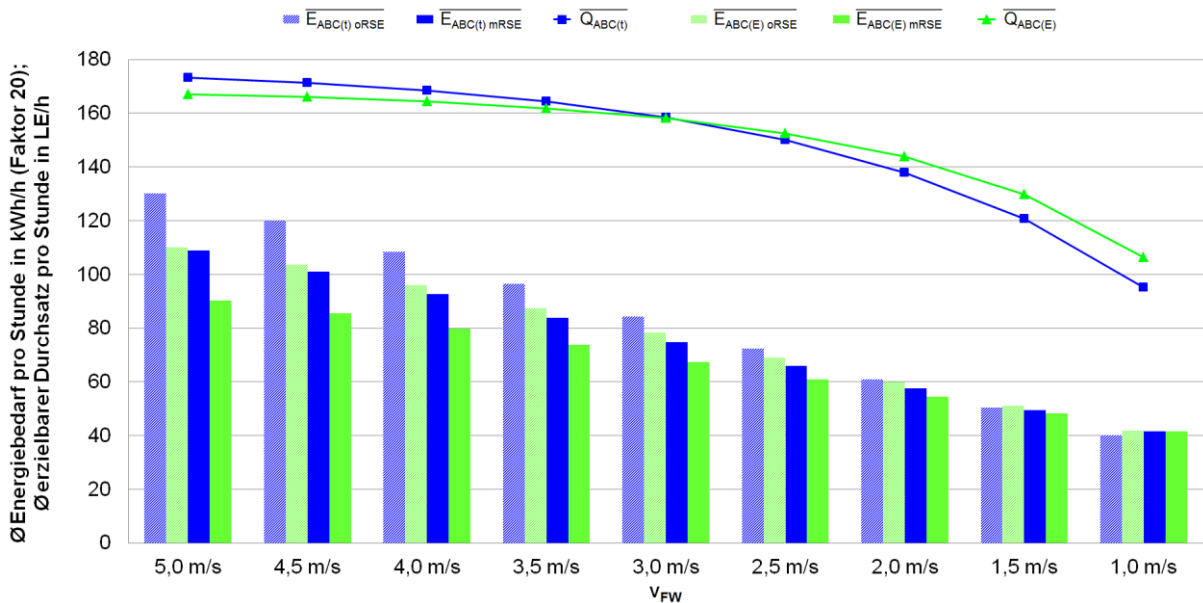
Beim Vergleich der zeitlichen und energetischen ABC-Zonierung konnten zunächst keine Unterschiede bzgl. Durchsatzleistung und Energiebedarf festgestellt werden, weil die Zonierungen zu ähnlich waren. Daher wurde die Hubgeschwindigkeit von 4,0 m/s auf 1,5 m/s reduziert, weil dadurch zwar die Form der zeitlichen Zonierung, aber nicht die Form der energetischen Zonierung verändert wird. Abbildung 13 stellt die A-Zonen beider ABC-Zonierungen bei 1,5 m/s Hubgeschwindigkeit dar.



**Abbildung 13: A-Zonen bei zeitlicher bzw. energetischer Zonierung und 1,5 m/s Hubgeschwindigkeit [SSTSZ13, S. 102]**

Die Ergebnisse der Simulationsexperimente zeigt Abbildung 14 für Einzelspiele. Zwar ist die mittlere erzielbare Durchsatzleistung der energetischen ABC-Zonierung bei maximaler Fahrwerksgeschwindigkeit geringer als die mittlere erzielbare Durchsatzleistung der zeitlichen ABC-Zonierung (ca. 3,5%), aber der mittlere Energiebedarf pro Stunde sinkt überproportional dazu (ca. 15,5% ohne Rückspeiseeinheit und ca. 17,0% mit Rückspeiseeinheit geringer als bei der zeitlichen ABC-Zonierung). Die Unterschiede bzgl. des Durchsatzes zwischen beiden Zonierungsarten nehmen mit sinkender vorgegebener Fahrwerksgeschwindigkeit bis zu 3,0 m/s ab. Unter dieser Geschwindigkeit ist die mittlere erzielbare Durchsatzleistung der energetischen ABC-Zonierung sogar höher als die der zeitlichen ABC-Zonierung. Der Grund ist, dass die mittleren vom Fahrwerk zurückgelegten Wege bei der energetischen ABC-Zonierung geringer ausfallen und die Zonen nicht an die geringeren Fahrgeschwindigkeiten angepasst werden, weil eine Anpassung der Zonen eher eine taktisch-strategische Entscheidung für den Betreiber ist. Auf eine Ladeinheit bezogen ist der mittlere Energiebedarf der energetischen ABC-Zonierung bei jeder Fahrwerksgeschwindigkeit geringer als der Energiebedarf der zeitlichen ABC-Zonierung, sowohl für ein RBG ohne als auch mit Rückspeiseeinheit. Pro Stunde gilt dies nur für ein RBG, das mit einer Rückspeiseeinheit ausgestattet ist. Wenn das RBG nicht über eine Rückspeiseeinheit verfügt, ist der mittlere Energiebedarf pro Stunde der energetischen ABC-zonierung bei niedrigen Fahrwerksgeschwindigkeiten (1,5 m/s und 1,0 m/s) höher als der mittlere Energiebedarf der zeitlichen ABC-Zonierung. Als Ursache kann hier der höhere Durchsatz der energetischen ABC-Zonierung in Verbindung mit der geringeren Grundlast des RBG angeführt werden. (vgl. [SSTSZ13, S. 102 f.] )

Der Vergleich der Auswirkungen der beiden Zonierungsarten wurde außerdem für den zweiten betrachteten E-/A-Punkt ausgeführt, der horizontal mittig unter dem Regal liegen soll. Hier fallen die Unterschiede zwischen der zeitlichen und energetischen ABC-zonierung noch deutlicher aus. Im Extremfall liegt der mittlere erzielbare Durchsatz der zeitlichen ABC-Zonierung bei ausschließlicher Ausführung von Einzelspielen und einer vorgegebenen Fahrwerksgeschwindigkeit von 5,0 m/s ca. 9,0% über dem Durchsatz der energetischen ABC-Zonierung, während der mittlere Energiebedarf pro Stunde der energetischen ABC-zonierung ca. 29,1% (RBG ohne Rückspeiseeinheit) bzw. 29,9% (RBG mit Rückspeiseeinheit) unter dem Energiebedarf der zeitlichen ABC-Zonierung.



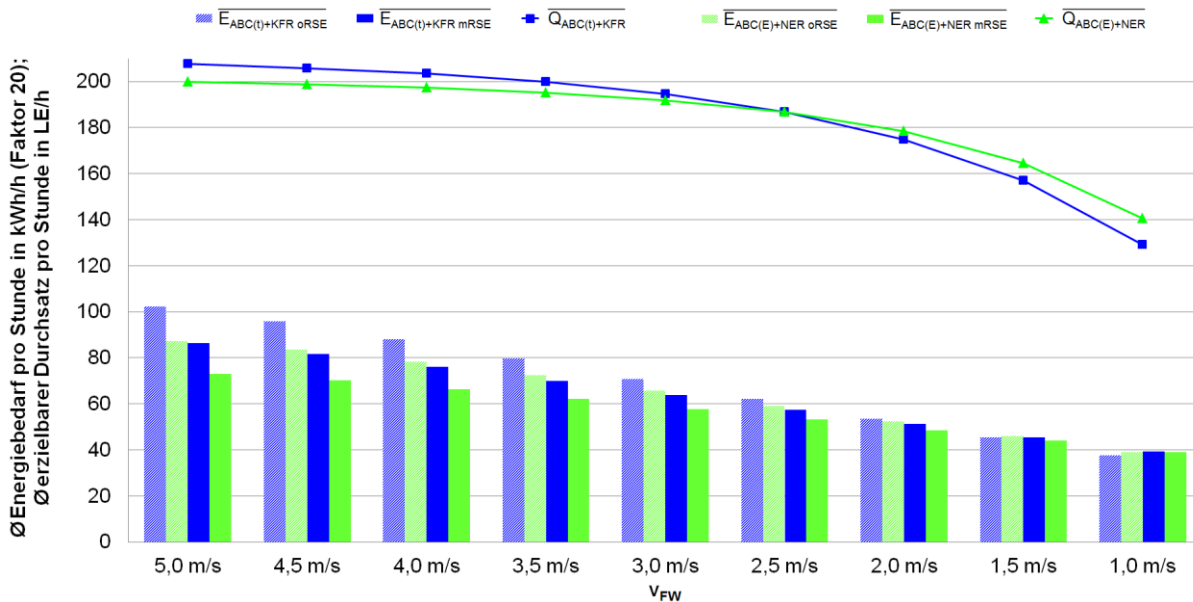
**Abbildung 14: Vergleich der mittleren Durchsätze und Energiebedarfe pro Stunde zwischen zeitlicher und energetischer ABC-Zonierung bei Einzelspielen und 1,5 m/s Hubgeschwindigkeit [SSTSZ13, S. 102]**

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass sich die beschriebenen Effekte bzgl. der mittleren erzielbaren Durchsatzleistung und der mittleren Energiebedarfe pro Stunde verstärken, je größer die Unterschiede der Fächerlagen zwischen zeitlicher und energetischer ABC-Zonierung bei identischen kinematischen Parametern sind. Zu welchen Ergebnissen die beiden Zonierungsarten führen, sollte jedoch immer im Einzelfall überprüft werden. Somit hat der Betreiber eines automatischen Regallagers die Möglichkeit zu entscheiden, ob die höhere mittlere erzielbare Durchsatzleistung der zeitlichen ABC-Zonierung erforderlich ist oder ob er eine relativ hohe Reduzierung des mittleren Energiebedarfs pro Stunde durch eine energetische ABC-Zonierung auf Kosten eines etwas geringeren mittleren erzielbaren Durchsatzes in Kauf nimmt. Weiterhin reagiert die energetische ABC-Zonierung bzgl. der mittleren erzielbaren Durchsatzleistung weniger sensitiv auf eine Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit als die zeitliche ABC-Zonierung.

Die Niedrigste-Energiebedarfs-Regel wurde als dritte Lagerbetriebsstrategie von der Kürzesten-Fahrzeit-Regel abgeleitet. „Bei der Niedrigsten-Energiebedarfs-Regel wird eine LE in das Lagerfach eingelagert, das mit dem niedrigsten Energiebedarf bedient werden kann“ [SSTSZ13, S. 103]. Auch diese Strategie berücksichtigt sowohl das komplette Einlager- als auch das komplette Auslagereinzelspiel. Wenn die Kürzeste-Fahrzeit-Regel und die Niedrigste-Energiebedarfs-Regel direkt gegenübergestellt werden, konnten keine Unterschiede bzgl. mittlerem erzielbarem Durchsatz oder mittlerem Energiebedarf pro Stunde festgestellt werden. Als Ursachen werden zum einen vermutet, dass eine einheitliche Nutzmasse von 20 kg angenommen wurde und zum anderen, dass bei beiden Strategien langfristig im Durchschnitt in die gleichen Lagerfächer ein- bzw. aus den gleichen Lagerfächern ausgelagert wird. (vgl. [SSTSZ13, S. 103])

Weil die Niedrigste-Energiebedarfs-Regel gegenüber der Kürzesten-Fahrzeit-Regel nicht zu einer Veränderung führte, wurden beide Strategien mit den entsprechenden ABC-

zonierungen kombiniert. Abbildung 15 stellt die Ergebnisse für eine ausschließliche Durchführung von Doppelspielen bei einer Hubgeschwindigkeit von 1,5 m/s und dem klassischen E-/A-Punkt dar. Die Verläufe ähneln den Resultaten des Vergleichs zwischen zeitlicher und energetischer ABC-Zonierung (siehe Abbildung 14), allerdings sind die mittleren erzielbaren Durchsätze höher und die mittleren Energiebedarfe pro Stunde geringer.



**Abbildung 15: Vergleich der mittleren Durchsätze und Energiebedarfe pro Stunde zwischen zeitlicher und energetischer ABC-Zonierung und Kombination mit Kürzester-Fahrzeit-Regel bzw. Niedrigsten-Energiebedarfs-Regel bei Doppelspielen und 1,5 m/s Hubgeschwindigkeit [SSTSZ13, S. 104]**

Die Unterschiede zwischen der zeitlichen und der energetischen ABC-Zonierung vergrößern sich durch die Kombination mit der Kürzesten-Fahrzeit- bzw. Niedrigsten-Energiebedarfs-Regel. So ist beispielsweise bei 5,0 m/s Fahrwerksgeschwindigkeit und Einzelspielen die mittlere erzielbare Durchsatzleistung der energetischen ABC-Zonierung kombiniert mit der Niedrigsten-Energiebedarfs-Regel ca. 4,8% niedriger verglichen mit der zeitlichen ABC-Zonierung in Kombination mit der Kürzesten-Fahrzeit-Regel, der mittlere Energiebedarf pro Stunde ist jedoch auch um ca. 18,7% (RBG ohne Rückspeiseeinheit) bzw. 20,1% (RBG mit Rückspeiseeinheit) geringer. Die Niedrigste-Energiebedarfs-Regel kann auch dazu eingesetzt werden, die maximal erzielbare Durchsatzleistung eines automatischen Regallagers mit RBG zu erhöhen. Soll die Lagerbetriebsstrategie von einer zeitlichen ABC-Zonierung auf eine energetische ABC-Zonierung umgestellt werden und die Kürzeste-Fahrzeit-Regel wird noch nicht zusätzlich angewendet, könnte die geringe Reduzierung der mittleren erzielbaren Durchsatzleistung durch die zusätzliche Implementierung der Niedrigsten-Energiebedarfs-Regel teilweise kompensiert werden. (vgl. [SSTSZ13, S. 103 f.] )

Für die Untersuchung der bisher abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien wurde in den Simulationsläufen ein bzgl. des Durchsatzes voll ausgelastetes System betrachtet, damit die Auswirkungen auf die mittleren erzielbaren Durchsatzleistungen und die mittleren Energiebedarfe bei bestimmten Parameterkonfigurationen ermittelt werden können. Die maximale Durchsatzleistungen wird in realen Anwendungen jedoch nur selten benötigt. Daher kann die

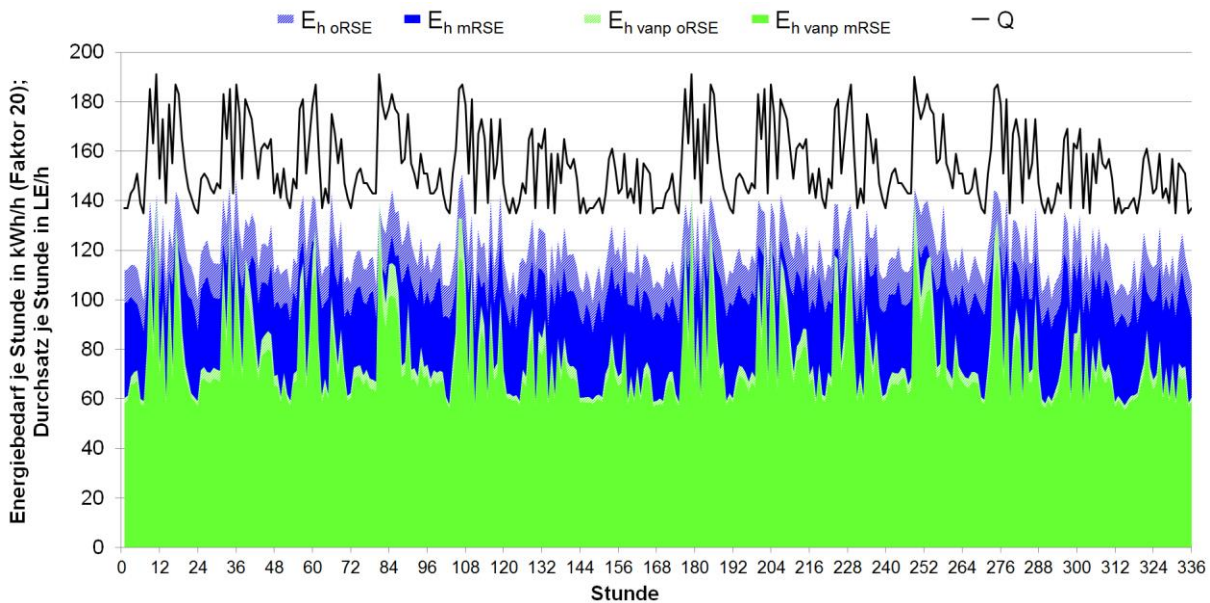
Fahrwerksgeschwindigkeit an den in der jeweiligen Stunde erforderlichen Durchsatz angepasst werden, um den Energiebedarf von RBGs möglichst weit zu senken. Diese Lagerbetriebsstrategie wird mit „Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den geforderten Durchsatz“ bezeichnet. Aus den vorhergehenden Untersuchungen liegen die mittleren erzielbaren Durchsatzleistungen bei verschiedenen Fahrwerksgeschwindigkeiten in Schritten von 0,5 m/s vor. In diesen Schritten kann dementsprechend auch eine Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den je Stunde geforderten Durchsatz erfolgen. (vgl. [SSTSZ13, S. 105])

Zur Bestimmung der Potentiale dieser Lagerbetriebsstrategie wurden fünf Szenarien definiert, in denen von einem 24/7-Betrieb des betrachteten AKL ausgegangen wird. Das AKL wird 14 Tage (exklusive der Einschwingphase) simuliert. Nachts sollen weniger Ein- und Auslagerungen ausgeführt werden als tagsüber und die Auftragslast soll am Wochenende ausfallen als an den restlichen Wochentagen. Die Szenarien sollen verschieden bzgl. der maximalen Durchsatzleistung ausgelastete AKL-Systeme abbilden. In einem sehr hoch ausgelasteten AKL (Szenario 1) wird davon ausgegangen, dass der in einer Stunde geforderte Durchsatz nicht unter 90% des bei der angewendeten Lagerbetriebsstrategie maximal erzielbaren Durchsatzes fällt. Bei einem hoch ausgelasteten AKL (Szenario 2) beträgt der Wert 80%. In Szenario 3 liegt der Wert bei 70% und in Szenario 4 beträgt er 60%. Ein sehr niedrig ausgelastetes AKL wird in Szenario 5 abgebildet, in dem der Durchsatz einer bestimmten Stunde nicht unter 50% der maximal erzielbaren Durchsatzleistung sinkt. Bei den meisten Lagerbetriebsstrategien sollte dieser Durchsatz mit der niedrigsten Fahrwerksgeschwindigkeit bearbeitbar sein. (vgl. [SSTSZ13, S. 105])

Bei der Betrachtung der Lagerbetriebsstrategie „Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den geforderten Durchsatz“ wird das betrachtete AKL nicht zu jedem Zeitpunkt maximal ausgelastet, sodass auch Stillstandzeiten entstehen können. Somit muss der Energiebedarf, der in Stillstandzeiten durch die Grundlast anfällt, in die Berechnung des Energiebedarfs je Stunde einbezogen werden (siehe Formel (2) und (3) auf S. 23). In Abbildung 16 sind die Verläufe der Durchsätze und Energiebedarfe je Stunde für einen vollständigen Simulationslauf des Szenarios 3 über 14 Tage (336 Stunden) bei chaotischer Lagerung und ausschließlicher Ausführung von Doppelspielen dargestellt. Aus der Abbildung wird deutlich, dass der Energiebedarf durch die Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den Durchsatz geringer ist als ohne Anpassung der Geschwindigkeit, solange die maximale Durchsatzleistung nicht gefordert ist. Dementsprechend ist es energieeffizienter, die Fahrgeschwindigkeit dem erforderlichen Durchsatz anzupassen als die vorgegebene Fahrwerksgeschwindigkeit wie bisher beim Maximum zu fixieren und Stillstandzeiten zu verursachen. (vgl. [SSTSZ13, S. 105 f.] )

Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass das Energieeinsparpotential einer Rückspeiseeinheit durch die Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den geforderten Durchsatz abnimmt (jeweils erkennbar an der Differenz zwischen gestricheltem und nichtgestricheltem Bereich in Abbildung 16). Je weiter die Fahrwerksgeschwindigkeit des RBG aufgrund der Differenz zwischen maximal erzielbarem und tatsächlich gefordertem Durchsatz gesenkt werden kann, desto geringer fällt die Energieeinsparung durch den Einsatz einer Rückspeiseeinheit aus. Die Energiereduzierung der Lagerbetriebsstrategie „Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit

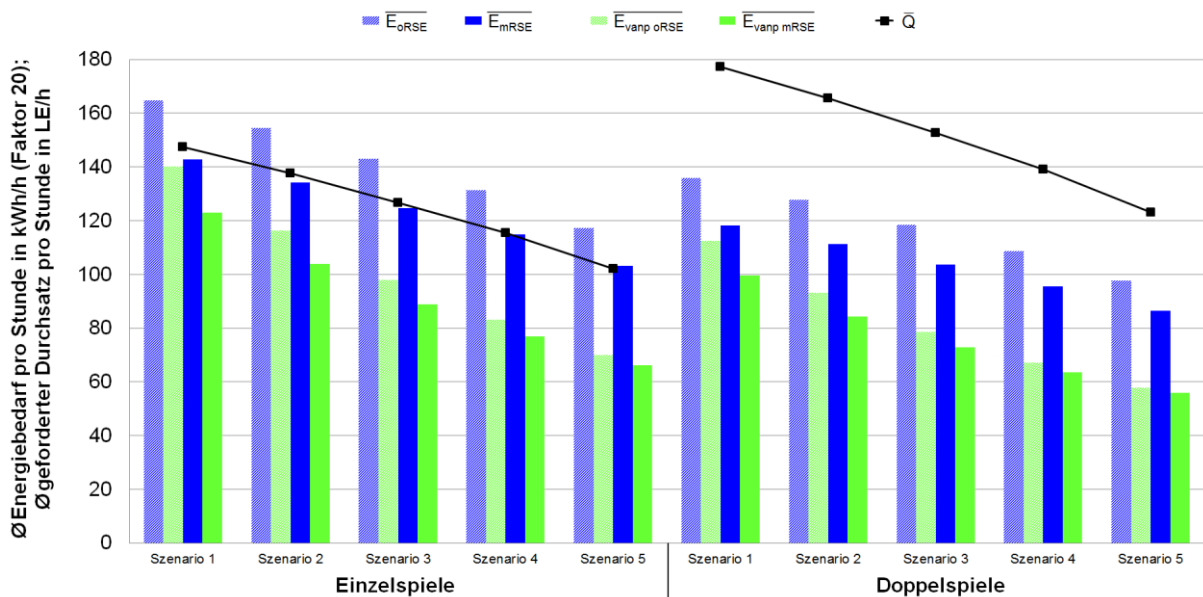
keit an den geforderten Durchsatz“ beruht vorrangig auf der Senkung der Energieaufnahme, denn gleichzeitig ist zu Beginn des Verzögerungsvorgangs des RBG auch weniger kinetische Energie gespeichert. (vgl. [SSTSZ13, S. 106])



**Abbildung 16: Durchsätze und Energiebedarfe je Stunde ohne und mit Anpassung der Fahrwerks-geschwindigkeit an den geforderten Durchsatz bei chaotischer Lagerung und ausschließlicher Ausführung von Doppelspielen [SSTSZ13, S. 105]**

Abbildung 17 stellt die mittleren Durchsätze und Energiebedarfe pro Stunde ohne und mit Anpassung der Fahrwerks-geschwindigkeit an den je Stunde geforderten Durchsatz bei chaotischer Lagerung für ein RBG ohne und mit Rückspeiseeinheit gegenüber. Es wird zunächst deutlich, dass die Anpassung der Geschwindigkeit in jedem Szenario und für jede technische Konfiguration des betrachteten RBG zu niedrigeren Energiebedarfswerten pro Stunde führt ohne den mittleren Durchsatz zu beeinflussen. Auch ohne die Anpassung der Fahrwerks-geschwindigkeit an den je Stunde benötigten Durchsatz sinkt der Energiebedarf mit sinkendem mittleren Durchsatz (zwischen den Szenarien), weil der mittlere Energiebedarf pro Ladeeinheit gleich bleibt und damit nur noch vom mittleren Durchsatz abhängig ist. Wird die Geschwindigkeit angepasst, sinkt auch der mittlere Energiebedarf pro Ladeeinheit. Der mittlere Energiebedarf pro Stunde kann durch eine Anpassung der Fahrwerks-geschwindigkeit an den je Stunde geforderten Durchsatz umso mehr reduziert werden kann, je größer der Unterschied zwischen der maximal erzielbaren Durchsatzleistung und dem tatsächlich geforderten mittleren Durchsatz jeweils bei einer vorgegebenen Lagerbetriebsstrategie ist. So kann der mittlere Energiebedarf pro Stunde bei chaotischer Lagerung und ausschließlicher Ausführung von Doppelspielen beispielsweise im Szenario 1, welches ein bzgl. des Durchsatzes sehr hoch ausgelastetes AKL repräsentiert, um ca. 17% bei einem RBG ohne Rückspeiseeinheit bzw. um ca. 15% bei einem RBG mit Rückspeiseeinheit reduziert werden. Im Szenario 5, das einen relativ niedrigen mittleren Durchsatz erfordert, steigen diese Senkungspotentiale auf ca. 37% für ein RBG ohne Rückspeiseeinheit und ca. 31% für ein RBG mit Rückspeiseeinheit. „Je optimierter die eingesetzte Lagerbetriebsstrategie hinsichtlich des Energiebedarfs jedoch ist, desto weniger kann der mittlere Energiebedarf pro Stunde noch

weiter reduziert werden. Beispielsweise kann der mittlere Energiebedarf pro Stunde bei Einsatz einer energetischen ABC-Zonierung in Kombination mit der Niedrigsten-Energiebedarfs-Regel prozentual weniger verringert werden als bei einer chaotischen Lagerung, weil das RBG meistens bereits in den energieoptimalen Bereichen des Regals operiert“ [SSTSZ13, S. 106]. Falls aufgrund der Geschwindigkeitsanpassung nicht alle der in einer bestimmten Stunde vom Lagerverwaltungssystem geforderten Ein- und Auslagerungsaufträge vom RBG bearbeitet werden können, werden die entsprechenden Aufträge zu Beginn der folgenden Stunde bearbeitet und in der aktuellen Stunde entstehen dementsprechend keine Stillstandzeiten. (vgl. [SSTSZ13, S. 106])



**Abbildung 17: Mittlere Durchsätze und Energiebedarfe pro Stunde mit und ohne Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den je Stunde geforderten Durchsatz bei chaotischer Lagerung [SSTSZ13, S. 106]**

Aus den bisherigen Ergebnissen des Arbeitspaktes 5 lässt sich eine Rangfolge der abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien, die zur Reduzierung des Energiebedarfs eines RBG geeignet sind, aufstellen:

1. Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den je Stunde geforderten Durchsatz
2. Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an die Hubzeit
3. Energetische ABC-Zonierung
4. Niedrigste-Energiebedarfs-Regel

In jedem Fall sollte jeder Betreiber eines automatischen Regallagers mit RBG die Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den je Stunde geforderten Durchsatz und an die Hubzeit einführen. Diese beiden Lagerbetriebsstrategien sind auch mit allen anderen (sowohl bestehenden als auch neu abgeleiteten) Strategien kombinierbar. Dabei bietet die Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den je Stunde geforderten Durchsatz ein größeres Potential zur Senkung des mittleren Energiebedarfs pro Stunde als die Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an die Hubzeit. Wenn eine ABC-Zonierung eingeführt werden kann, sollte über die Anwendung einer energetischen ABC-Zonierung anstatt einer zeitlichen nachgedacht werden. Sollen die energetische ABC-Zonierung und/ oder die Niedrigste-Energiebedarfs-



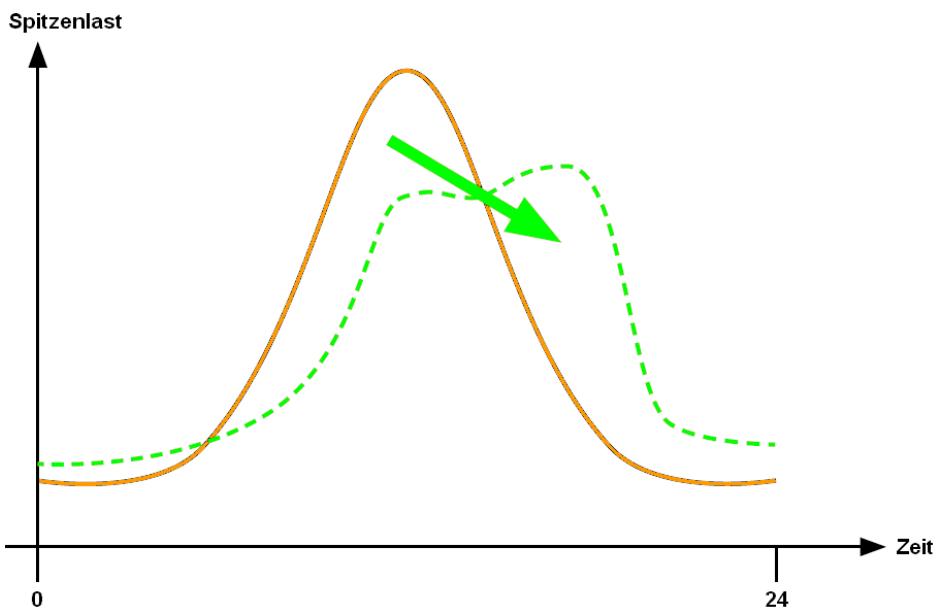
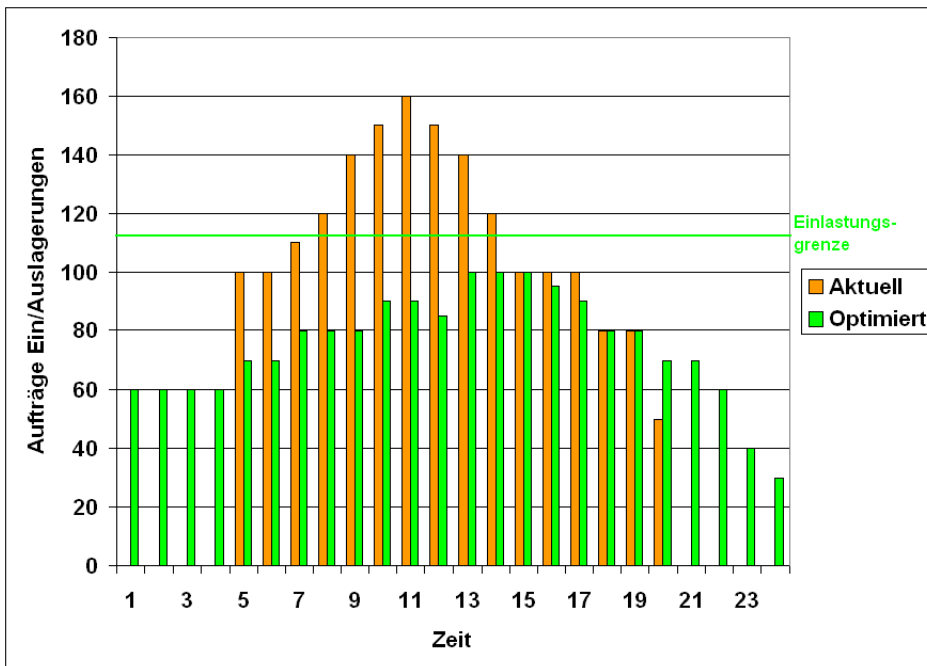
Regel eingesetzt werden, muss der Energiebedarf jedes einzelnen Lagerplatzes bestimmt werden. Die entsprechenden Energiebedarfe können entweder durch Messungen ermittelt, modelliert (vgl. u. a. [SSTSZ13]) oder ggf. analytisch berechnet werden (vgl. u. a. [GE13a und GE13b]). Wird bereits eine zeitliche ABC-Zonierung angewendet und soll auf eine energetische ABC-zonierung umgestellt werden, muss vor der Einführung überprüft werden, ob der *mittlere erforderliche* Durchsatz bearbeitet werden kann, weil der *mittlere maximal erzielbare* Durchsatz einer energetischen ABC-Zonierung ggf. sein könnte als der mittlere maximal erzielbare Durchsatz einer zeitlichen ABC-Zonierung (siehe Abbildung 14). Die Differenz bzgl. des mittleren maximal erzielbaren Durchsatzes könnte ggf. durch eine zusätzliche Anwendung der Niedrigsten-Energiebedarfs-Regel ausgeglichen werden.

Ein Ziel, das im Forschungsantrag formuliert wurde, war die Ableitung von Strategien zur Energieverbrauchsreduzierung während des Tageslastprofils durch die Glättung des Tageslastprofils eines Lagersystems (siehe Abbildung 18). Diese Strategie würde mit der Lagerbetriebsstrategie „Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den momentan geforderten Durchsatz“ kombiniert werden. Somit wäre eine Auftragslastverschiebung mit dem Ziel der Reduzierung des Energiebedarfs eines automatischen Regallagers mit Regalbediengerät nur unter zwei Voraussetzungen sinnvoll:

1. Die einstellbaren Fahrwerksgeschwindigkeiten sind nicht vollkommen variabel und es werden Geschwindigkeiten in verschiedenen Abständen, z. B. 0,5 m/s, vorgegeben.
2. Sollen/ Können Ein- bzw. Auslagerungsaufträge von einer Stunde in die folgende(n) verschoben werden, müssen diese in der folgenden Stunde mit einer geringeren Fahrwerksgeschwindigkeit bearbeitet werden können. Dementsprechend darf die maximal erzielbare Durchsatzleistung in der folgenden Stunde bei dem geringeren Geschwindigkeitsprofil noch nicht vollständig erreicht sein, sodass die Aufträge der Folgestunde mit den Aufträgen der aktuellen Stunde maximal bis zu dieser Durchsatzgrenze „aufgefüllt“ werden.

Weil das zukünftige Ziel der Lagerbetriebsstrategie „Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den momentan geforderten Durchsatz“ jedoch ist, dass die Fahrwerksgeschwindigkeit des betrachteten RBG exakt an den erforderlichen Durchsatz angepasst werden soll, erscheint auch eine Auftragslastverschiebung wenig sinnvoll, um den Energiebedarf zu verringern. Zwar könnte durch eine Auftragslastverschiebung voraussichtlich die mittlere Spitzenlast pro Stunde reduziert werden, wenn der maximal erforderliche Durchsatz dadurch dauerhaft reduziert werden könnte, dies ist aber nicht anzunehmen, da Auftragspitzen im Lager kaum gesteuert werden können.

Um die finanziellen Potentiale der vier abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien quantifizieren zu können, wurden die Strategien miteinander kombiniert und mit bestehenden Lagerbetriebsstrategien als Ausgangssituation (chaotische Lagerung, Kürzeste-Fahrzeit-Regel, zeitliche ABC-Zonierung und die Kombination der zeitlichen ABC-Zonierung mit der Kürzesten-Fahrzeit-Regel) in den unterschiedlichen Szenarien gegenübergestellt. Somit konnten auch ggf. auftretende Wechselwirkungen der abgeleiteten Strategien überprüft werden, z. B. sinkt das Potential der Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an die Hubzeit bei gleichzeitiger Anpassung der Geschwindigkeit an den geforderten Durchsatz je Stunde.



**Abbildung 18: Beziehung zwischen dispositiver zeitlicher Verschiebung der Abarbeitung von Aufträgen (oben) und der Glättung des Spitzen-Tageslastprofils (unten) (in Anlehnung an [Tim09])**

Für alle Simulationsläufe wurde ein Doppelspielanteil von 20% angenommen, weil dieser am ehesten die Realität wiedergibt (vgl. [tHSN07, S. 190]). Die verschiedenen Durchsatz-Szenarien wurden mit den Ausgangs-Lagerbetriebsstrategien und den betrachteten Kombinationen der abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien simuliert. Ein weiterer Betrachtungsschwerpunkt stellte die zusätzliche horizontale Verschiebung des E-/A-Punktes dar, wodurch zusätzlich Energie eingespart werden kann. Auf diese Weise konnten mittleren Energiebedarfe pro Stunde aller Lagerbetriebsstrategien bzw. den Kombinationen für alle fünf Szenarien ermittelt werden. Je nach Szenario und Ausgangssituation kann der mittlere Energiebedarf ohne Verschiebung des E-/A-Punktes mindestens um ca. 20% (Ausgangssituation zeitliche ABC-Zonierung kombiniert mit der Kürzesten-Fahrzeit-Regel im Szenario 1) und bis zu

63% im Maximum (Ausgangssituation chaotische Lagerung im Szenario 5) reduziert werden. Wird der E-/A-Punkt theoretisch horizontal mittig unter das Regal verschoben, steigen diese Werte auf ca. 39% im Minimum und ca. 46% im Maximum. Je optimierter die Lagerbetriebsstrategie in der Ausgangssituation bereits hinsichtlich des Energiebedarfs ist, desto weniger kann, wie bereits erwähnt, der mittlere Energiebedarf pro Stunde durch Einführung (und Kombination) der abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien reduziert werden.

Die auf diese Weise ermittelten Werte für den mittleren Energiebedarf pro Stunde jeder Lagerbetriebsstrategie(-kombination) wurden im Folgenden herangezogen, um die möglichen finanziellen Einsparungen theoretisch zu quantifizieren. Hierfür wird ein realitätsnahes Szenario zugrunde gelegt, in dem ein Logistikdienstleister ein AKL mit sechs Gassen und je einem RBG mit den Maßen sowie kinematischen Parametern (1,5 m/s Hubgeschwindigkeit) des Beispiel-AKL betreibt. Das betrachtete AKL soll jedoch nicht wie in den bisherigen Untersuchungen einem 24/7-Betrieb unterliegen, sondern an sechs Tagen pro Woche in jeweils zwei Schichten à acht Stunden an durchschnittlich 302 Arbeitstagen pro Jahr (insgesamt 28.992 Betriebsstunden) betrieben werden. Außerdem wurden die Auswirkungen untersucht, die sich aus einer Abschaltung der Anlage in betriebsbedingten Stillstandzeiten (23.604 Stunden in einem Jahr mit durchschnittlich 365,25 Tagen), z. B. in der Nachtschicht, ergeben. In den betriebsbedingten Stillstandzeiten liegt die Grundlast an, die sich je nach RBG-Konfiguration unterscheidet. Die jährlichen Energiekosten werden mit einem Preis von 0,168 €/kWh berechnet.

Tabelle 1 zeigt auszugsweise die jährlichen Energiekosten eines RBG mit Rückspeiseeinheit der verschiedenen Ausgangs-Lagerbetriebsstrategien, in denen der E-/A-Punkt klassisch angeordnet ist. Durch die Kombination der abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien können ohne die horizontale Verschiebung des E-/A-Punktes bei der chaotischen Lagerung als Ausgangssituation, die am häufigsten in der Realität zum Einsatz kommt, je nach Szenario ca. 15.000 € bis 22.000 € Energiekosten jährlich eingespart werden. Wird in der Ausgangssituation von der Kombination aus der zeitlichen ABC-Zonierung und der Kürzesten-Fahrzeit-Regel, welche kaum in der Realität eingesetzt wird, ausgegangen, sinken die Werte auf ca. 6.000 bis 9.000 € jährlich, weil die Strategiekombination als Ausgangssituation bereits eine sehr gute Strategie darstellt. Durch die theoretische horizontale Verlagerung der Position des E-/A-Punkt könnten laut den Simulationsergebnissen unter Anwendung der kombinierten abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien die Energiekosten pro Jahr bei der chaotischen Lagerung als Ausgangssituation sogar bis zu ca. 25.000 € und bei der zeitlichen ABC-Zonierung kombiniert mit der Kürzesten-Fahrzeit-Regel als Ausgangssituation bis zu ca. 11.000 € reduziert werden. Weil die Implementierung der abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien allein durch ein Software-Update abgewickelt werden könnte, sind die Strategien auch in bestehende Anlagen mit einer verhältnismäßig kurzen Amortisationsdauer (je nach Ausgangssituation voraussichtlich zwischen einem und maximal drei Jahren) implementierbar.

Wie bereits aus der Rangfolge der abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien ersichtlich wird, ist ein Großteil der Einsparungen mit einer Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den je Stunde geforderten Durchsatz und an die Hubzeit erreichbar. Beispielsweise können in der Ausgangssituation der chaotischen Lagerung die jährlichen Energiekosten allein durch diese Maßnahme je nach Durchsatzszenario um mindestens 10.000 € Energiekosten sowohl für

ein RBG ohne Rückspeiseeinheit als auch ein RBG mit Rückspeiseeinheit jährlich gesenkt werden. Wahrscheinlich fällt die Reduktion der Gesamtbetriebskosten noch höher aus, weil durch die Geschwindigkeitsanpassung der Verschleiß reduziert wird.

**Tabelle 1: Jährliche Energiekosten eines Regalbediengerätes mit Rückspeiseeinheit der untersuchten Lagerbetriebsstrategiekombinationen für verschiedene Lagerbetriebsstrategien als Ausgangssituation**

<b>Strategiekombi</b>	<b>Szenario 1</b>	<b>Szenario 2</b>	<b>Szenario 3</b>	<b>Szenario 4</b>	<b>Szenario 5</b>
<i>Mit Abschaltung der Anlage [€/a]</i>					
Chaotische Lagerung	31.741,56	29.796,48	27.708,28	25.537,54	23.018,00
Kürzeste-Fahrzeit-Regel	28.039,62	26.392,61	24.564,47	22.635,18	20.370,95
Zeitliche ABC-Zonierung	23.957,55	22.581,64	21.049,51	19.467,11	17.634,26
Kombination Zeitliche ABC-Zonierung und Kürzeste-Fahrzeit-Regel	22.620,89	21.354,13	19.816,66	18.357,65	16.775,55
<i>Ohne Abschaltung der Anlage [€/a]</i>					
Chaotische Lagerung	34.457,91	32.512,83	30.424,63	28.253,89	25.734,35
Kürzeste-Fahrzeit-Regel	30.755,97	29.108,96	27.280,82	25.351,53	23.087,30
Zeitliche ABC-Zonierung	26.673,90	25.297,98	23.765,86	22.183,46	20.350,61
Kombination Zeitliche ABC-Zonierung und Kürzeste-Fahrzeit-Regel	25.337,24	24.070,48	22.533,01	21.074,00	19.491,90

Wenn die Energiekosten zwischen der Abschaltung und Nicht-Abschaltung der Anlage in betriebsbedingten Stillstandzeiten verglichen werden, kann festgestellt werden, dass eine Rückspeiseeinheit insbesondere bei energiebedarfs-optimierenden Lagerbetriebsstrategien teilweise zu höheren jährlichen Energiekosten führen kann. Dieses Verhalten ist v. a. auf die folgenden zwei Ursachen zurückzuführen. Einerseits verringern sich die mittleren Bewegungswege durch optimierende Strategien. Durch die Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den Durchsatz sinkt die kinetische Energie im RBG und in der Folge wird das Potential zur Energierückgewinnung sowie die Nutzung durch eine Rückspeiseeinheit reduziert. Als zweite Ursache ist die Erhöhung der Grundlast anzuführen, die bei einem RBG mit Rückspeiseeinheit höher ist als bei einem RBG ohne Rückspeiseeinheit. Wird die Anlage betriebsbedingt nicht benötigt, aber auch nicht abgeschaltet, steigen dementsprechend die Energiekosten, wenn das RBG längere Zeit still steht. Je niedriger die mittlere Auslastung eines automatischen Regallagers mit RBG bzgl. des Durchsatzes ist und je weiter die Fahrwerksgeschwindigkeit durch Anpassung an den geforderten Durchsatz reduziert werden kann, desto wahrscheinlicher ist es, dass ein RBG mit Rückspeiseeinheit zu höheren jährlichen Energiekosten führt als ein RBG, das nicht mit einer Rückspeiseeinheit ausgestattet ist.

Im letzten Punkt des Arbeitspaketes 5 wurde die Lage des E-/A-Punktes untersucht. Gegenüber dem klassisch angeordneten E-/A-Punkt weist der horizontal verschobene E-/A-Punkt stets niedrigere Energiekosten auf. Die Unterschiede zwischen den Energiekosten dieser beiden Übergabepunkte bei identischer Lagerbetriebsstrategiekombination fallen jedoch mit maximal ca. 5.700 € pro Jahr insgesamt über alle sechs Gassen relativ gering aus. Neben den Energiekosten müssten aber bei der Planung auch die zusätzlichen Investitionskosten für die Fördertechnik unter dem Regal, z. B. für die Shuttlefahrzeuge und die Fahrschienen,

sowie ggf. zusätzliche Software berücksichtigt werden. Es wird angenommen, dass diese Kosten für das komplette AKL (sechs Gassen) ca. 15-20% und somit ca. 300.000-350.000 € höher ausfallen würden als bei einer klassischen Lösung. Somit wäre die Amortisationszeit gegenüber einem nicht horizontal verschobenem E-/A-Punkt viel zu hoch. Ein System mit horizontal mittig unter dem Regal angeordnetem E-/A-Punkt wird dementsprechend dann empfohlen, wenn die logistische Leistung, d. h. der mittlere erzielbare Durchsatz, gegenüber einem klassisch angeordneten E-/A-Punkt erhöht werden soll. Es muss jedoch eine Einzelfallbetrachtung erfolgen, welches System die geringeren Gesamt-(Lebenszyklus-)Kosten aufweist.

<b>Arbeitspaket 6</b>	<b>Personaleinsatz [PM]</b>
<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung / komplexe Anlagen</b>	<b>6</b>

Durchgeführte Arbeiten:

Die inhaltlichen Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens wurden im vorliegenden Schlussbericht (siehe insbesondere Arbeitspakete 1 bis 5) zusammengefasst. Empfehlungen für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) wurden in diesem Arbeitspaket formuliert.

Erzielte Ergebnisse (Empfehlungen für KMU):

KMU wird zunächst empfohlen, vor der Anschaffung von automatischen Regallägern mit RBG zu überprüfen, ob sich die Ausstattung der RBGs mit einer Rückspeiseeinheit lohnt. An dieser Stelle müssen Hersteller, Planer und Betreiber zusammenarbeiten. Weiterhin sollten Betreiber bzw. Planer entscheiden, welche Lagerbetriebsstrategie genutzt werden sollte. In jedem Fall sollten im Anschluss daran auf dieser Grundlage die Strategien der Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den momentan erforderlichen Durchsatz und an die Hubzeit eingeführt werden, um den Energiebedarf höchstmöglich zu reduzieren. Sollen die Lagerbetriebsstrategien der energetischen ABC-Zonierung bzw. der Niedrigsten-Energiebedarfs-Regel oder soll die Einsparung des Energiebedarfs bzw. der Energiekosten quantifiziert werden, ist es notwendig, das energetische Verhalten der eingesetzten RBGs zu bestimmen. Auch hierfür müssen Hersteller, Planer und Betreiber zusammenarbeiten und gegenseitig notwendige Informationen austauschen. Da die abgeleiteten Lagerbetriebsstrategien über ein Software-Update implementierbar sind, sollten sich die Betreiber automatischer Regalläger ein Angebot vom Softwarelieferanten bzw. Hersteller der Anlage (falls dieser die bestehende Software entwickelt hat) zukommen lassen und die Amortisationsdauer der Implementierungsmaßnahme bestimmen. Hierfür ist es zunächst notwendig, den mittleren Energiebedarf der Anlage zu ermitteln, wofür Messungen als geeignetes Mittel angesehen werden.

Intralogistik-Hersteller sollten das energetische Verhalten ihrer Fördermittel analysieren, um weitere Potentiale zur Energiebedarfsreduzierung zu identifizieren. Ähnlich wie in den Ergebnissen des vorliegenden Forschungsprojektes könnten Maßnahmen bzw. Strategien identifiziert werden, mit denen der Energiebedarf der Fördermittel und somit des gesamten Intralogistiksystems bei gleichbleibender logistischer Leistung reduziert werden könnte. Auf

diese Weise könnte der Wettbewerb der Hersteller untereinander erhöht werden, weil sich Wettbewerbsvorteile für Unternehmen ergeben, die energieeffiziente Fördermittel anbieten. Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes zeigen, dass die Fördermittel sich zunehmend an den in bestimmten Zeiträumen geforderten Durchsatz anpassen müssen, damit der Energiebedarf erheblich reduziert werden kann. Planer sollten diese Erkenntnis zukünftig bei der Planung von Intralogistiksystem berücksichtigen und dabei nicht nur RBGs betrachten.

## 4. Nutzen für KMU

Der Nutzen für KMU durch die Forschungsergebnisse besteht allgemein in der Reduzierung des Energiebedarfs und somit der Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen in automatischen Regallägern mit Regalbediengeräten. Es muss jedoch in Hersteller, Planer und Anwender differenziert werden. Die Hersteller der Anlagen können ihren Kunden zum einen neue Betriebsweisen anbieten, mit denen der Energiebedarf der Kunden reduziert werden kann. Die Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den Durchsatz muss automatisch erfolgen. Für die Softwareimplementierung dieser und der abgeleiteten Strategien können die Hersteller dementsprechend einen bestimmten Preis veranschlagen. Außerdem ist es ein großer Imagegewinn, wenn die Anlagen bei gleicher logistischer Leistung einen geringeren mittleren Energiebedarf aufweisen als die Anlagen der Konkurrenz. Daraus kann sich auch ein Wettbewerbsvorteil ergeben.

Planer können eine Logik definieren, mit der die jeweilige Fahrwerksgeschwindigkeit für die Anpassung an den momentan geforderten Durchsatz ermittelt werden kann. Weiterhin können sie den mittleren Energiebedarf der Anlagen bestimmen und in die Berechnung der Betriebskosten mit einbeziehen. Sie können ihren Auftraggebern ebenfalls eine Variante mit horizontal verschobenem E-/A-Punkt vorschlagen. Hier müssen die Planer im Einzelfall überprüfen, ob durch die höhere maximal erzielbare Durchsatzleistung pro Gasse ein bzw. mehrere RBGs bei gleicher Gesamtdurchsatzleistung im Vergleich zu einer herkömmlichen Lösung eingespart werden kann. Außerdem werden Planer ihren Auftraggebern zukünftig mitteilen können, welche Anlagenteile des Intralogistiksystems welchen Anteil am Energiebedarf verursachen. Auf diese Weise steigern die Betreiber der Anlagen die (Kosten-) Transparenz, wodurch weitere Optimierungsansätze aufgedeckt werden können. Die Forschungsergebnisse, insbesondere die Kostentransparenz und die Benchmarks, geben Anreize für Investitionen in energieeffiziente Intralogistikanlagen, was wiederum für die Hersteller dieser Anlagen bedeutet, dass sie energieeffiziente Lösungen anbieten müssen.

Die Anwender profitieren schließlich im Betrieb der Anlagen durch die Implementierung der abgeleiteten Strategien. Durch die Reduzierung des Energiebedarfs können die Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen von automatischen Regallägern mit Regalbediengeräten reduziert werden. Die Investition in die Software würde sich je nach Größe des Lagers (Anzahl der Gassen) relativ schnell amortisieren. Der Vorteil ist, dass die Strategien bei bestehenden Anlagen durch ein Software-Update implementieren lassen, ohne den laufenden Betrieb in größerem Maße zu beeinflussen und ohne die Anlage für konstruktive oder technologische Erweiterungen bzw. Anpassungen zeitweise stillzulegen.

## 5. Transfer der Forschungsergebnisse

Maßnahmenbereich	Maßnahme	Termin
Projektbegleitender Ausschuss	Erste, konstituierende Sitzung	durchgeführt am 27.04.2012
	Zweite Sitzung	durchgeführt am 16.11.2012
	Dritte Sitzung	durchgeführt am 07.06.2013
	Vierte, abschließende Sitzung	durchgeführt am 24.01.2014
Präsentationen und Vorträge	8. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL)	27.09.2012
	LogiMAT 2013	20.02.2013
	18. Magdeburger Logistiktage	20. Juni 2013
	9. Fachkolloquium der WGTL	17.09.2013
	CeMAT 2014	19.-23.05.2014
	LogistikWerkstatt (TU Graz)	27.05.2014
Publikation der Forschungsergebnisse im Internet	Pressemitteilung unter <a href="http://www.warehouse-logistics.com/57/1/6297/automatisches-kleinteilelager-fuer-die-universitaet-magdeburg.html">http://www.warehouse-logistics.com/57/1/6297/automatisches-kleinteilelager-fuer-die-universitaet-magdeburg.html</a>	30.11.2012
	Pressemitteilung unter <a href="http://www.ssi-schaefer.de/news-infocenter/presse/single/article/akademische_ausbildung_mit_akl_von_ssi_schaefer.html">http://www.ssi-schaefer.de/news-infocenter/presse/single/article/akademische_ausbildung_mit_akl_von_ssi_schaefer.html</a>	02.11.2011
	Pressemitteilung unter <a href="http://www.ssi-schaefer.de/news-infocenter/single/article/automatisches_kleinteilelager_fuer_die_universitaet_magdeburg.html">http://www.ssi-schaefer.de/news-infocenter/single/article/automatisches_kleinteilelager_fuer_die_universitaet_magdeburg.html</a>	30.11.2012

<b>Maßnahmenbereich</b>	<b>Maßnahme</b>	<b>Termin</b>
Publikation der Forschungsergebnisse im Internet	Beitrag „Isoenergetic Shelves of Automatic Small Parts Warehouses“ unter <a href="http://www.logistics-journal.de/not-reviewed/2012/10/-3488/2012_10schulz_en.pdf">http://www.logistics-journal.de/not-reviewed/2012/10/-3488/2012_10schulz_en.pdf</a>	31.10.2012
	Beitrag „Der Einfluss kinematischer Parameter auf den Energiebedarf eines Regalbediengerätes“ unter <a href="http://www.logistics-journal.de/proceedings/2012/3432/09-schulz-wgtl2012.pdf">http://www.logistics-journal.de/proceedings/2012/3432/09-schulz-wgtl2012.pdf</a>	11.10.2012
	Beitrag „Modellierung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten und verschiedener Lagerbetriebsstrategien zur Reduzierung des Energiebedarfs“ unter <a href="https://www.logistics-journal.de/proceedings/2013/3774/siegel_2013-wgtl.pdf">https://www.logistics-journal.de/proceedings/2013/3774/siegel_2013-wgtl.pdf</a>	16.10.2013
Veröffentlichungen in Fachzeitschriften oder sonstigen gedruckten Veröffentlichungen	Beitrag „Isoenergetische Fächer eines Automatischen Kleinteilelagers“ im Jahrbuch Logistik 2012	März 2012
	Beitrag „Der Einfluss kinematischer Parameter auf den Energiebedarf eines Regalbediengerätes“ im Tagungsband zum 8. Fachkolloquium der WGTL	26./27.09.2012
	Beitrag „Der Zusammenhang zwischen Durchsatzleistung und Energiebedarf eines Automatischen Kleinteilelagers“ im Jahrbuch Logistik 2013	März 2013
	Beitrag im Tagungsband zum 9. Fachkolloquium der WGTL	17./18.09.2013



<b>Maßnahmenbereich</b>	<b>Maßnahme</b>	<b>Termin</b>
Veröffentlichungen in Fachzeitschriften oder sonstigen gedruckten Veröffentlichungen	Beitrag „Der Einfluss der Lagerbetriebsstrategie auf die Durchsatzleistung und den Energiebedarf von Regalbediengeräten“ im Tagungsband der 18. Magdeburger Logistiktagung	19.06.2013
	Tagungsband der LogistikWerkstatt 2014	27.05.2014
Dissertation	Veröffentlichung der Dissertationschrift	geplant für 3. Quartal 2014
Demonstration an der Forschungsstelle	Demonstration der Forschungsergebnisse anhand der realen Anlage während der 17. Magdeburger Logistiktagung	27. und 28.06.2012
	Demonstration der Forschungsanlage im Rahmen der Campus Days und langen Nacht der Wissenschaft 2013	31.05. und 01.06.2013
	Demonstration der Forschungsanlage im Rahmen des Campus Day und der langen Nacht der Wissenschaft 2014	17.05.2014
Übernahme der Forschungsergebnisse in Lehre und Weiterbildung	Einbeziehung der Forschungsergebnisse in praktische Versuche der Studenten	seit Anfang 2012
	Abschlussarbeiten	seit Anfang 2012
	Einbindung der Forschungsergebnisse in die Lehre in die Fächer „Automatisierung in der Materialflusstechnik“ und „Energieeffiziente Logistik“ des Bachelorstudienganges Wirtschaftsingenieurwesen Logistik	seit Oktober 2012
Abschlussdokumentation	Schlussbericht	August 2014

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden gewerbliche Schutzrechte weder erworben, noch ist ihre Anmeldung beabsichtigt.

## 6. Durchführende Forschungsstelle

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Lehrstuhl für Logistik  
Institut für Logistik und Materialflusstechnik  
Universitätsplatz 2  
39106 Magdeburg

Leiter der Forschungsstelle:  
Prof. Dr.-Ing. Hartmut Zadek  
Tel.: +49 (0)391/67-18604  
Fax: +49 (0)391/67-12646  
E-Mail: Zadek@ovgu.de

Projektleiter:  
Dipl.-Ing. Jörg Monecke  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Robert Schulz, M.Sc.  
Tel.: +49 (0)391/67-18158  
Fax: +49 (0)391/67-12646  
E-Mail: Joerg.Monecke@ovgu.de, Robert.Schulz@ovgu.de

## 7. Literaturverzeichnis

- [AF09] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Verlag: Springer, 6. Auflage, Berlin, Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-642-01404-8.
- [Bar12] Barde, S.: Der Zweck bestimmt die Mittel. In: dhf Intralogistik, Ausgabe 10/2012, S. 42-53, Verlag: AGT Verlag Thum, Ludwigsburg, 2012, ISSN 0947-9481.
- [Clau06] Clausen, U.; Schmidt, K.: Nachhaltige Mobilität durch Innovationen im Güterverkehr, BMU-Studie, 2006.
- [FM09] Hörmann Logistik: Effiziente Energienutzung im Hochregallager. In: FM Das Logistik-Magazin, Ausgabe 11-12/2009, S. 19, 2009.
- [GAU11] Günthner, W. A. (Hrsg.); Atz, T.; Ulbrich, A.: Forschungsbericht zum Projekt Integrierte Lagersystemplanung. TU München, Garching bei München, 2011.

- [GE13a] Günthner, W. A.; Ertl., R.: Schnell zu aussagekräftigen Werten gelangen - Teil I - Analytische Berechnung des mittleren Energiebedarfs von Regalbediengeräten mit Energierückspeisung. In: Fördern + Heben (f+h), Ausgabe 6/2013, S. 12-14, Verlag: Vereinigte Fachverlage, Mainz, 2013, ISSN 0341-2636.
- [GE13b] Günthner, W. A.; Ertl., R.: Schnell zu aussagekräftigen Werten gelangen - Teil II - Analytische Berechnung des mittleren Energiebedarfs von Regalbediengeräten mit Energierückspeisung. In: Fördern + Heben (f+h), Ausgabe 7-8/2013, S. 12-15, Verlag: Vereinigte Fachverlage, Mainz, 2013, ISSN 0341-2636.
- [Gla05] Glass, M.; Marquardt, H.-G.: Schnellläuferstrategien in Lagern und Dynamische Zonierung. Abschlussbericht, TU Dresden, Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik, 2005.
- [Gud10] Gudehus, T.: Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen. Verlag: Springer, 4. Auflage, Berlin, Heidelberg, 2010, ISBN 978-3-540-89388-2.
- [Gün08] Günthner, W. A.; Sanladerer, S.; Kraul, R.: Konfigurationsauswahl für automatische Lagersysteme. BMWi-Projekt, Garching, 2008.
- [IPCC07] Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, Kapstadt, Singapur, São Paulo, Delhi, 2007.
- [ITP09] IT&Production: Energieeffizienz im Fokus der Intralogistik. [http://www.it-production.com/index.php?seite=einzel\\_artikel\\_ansicht&id=49882](http://www.it-production.com/index.php?seite=einzel_artikel_ansicht&id=49882), Stand: 19.03.2010.
- [Kno09] Knoll, A.: Energieeffiziente Antriebstechnik: Welche Wege führen zum Ziel?. <http://www.elektroniknet.de/home/automation/news/n/d/energieeffiziente-antriebstechnik-welche-wege-fueh/>, Stand: 19.03.2010.
- [Kra08] Kramm, M.: Der Energieausweis für Distributionszentren. In: Tagungsband Energieeffizienz im Lager, Köln, 2008.
- [Mar08] Marquardt, H.-G.; Könze, A.: Transportoptimierung in spurgebundenen Fahrzeugsystemen mit überlappenden Bedienbereichen und Mehrfach-Lastaufnahme (Transportoptimierung). TU Dresden, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Dresden, 2008.
- [NeSc07] Nendel, K.; Schumann, M.: Ermittlung der Umschlagleistung von Hochregallagern unter Berücksichtigung lagerorganisatorischer Rahmenbedingungen. TU Chemnitz, Institut für allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik, Chemnitz, erschienen im Logistics Journal, 2007

- [Öko07] Schmied, M.; Havers, K.; Zimmer, W.; Schmidt, K.; Goerke, M.; Schlüter, O.: Nachhaltige Mobilität durch Innovationen im Güterverkehr. Öko-Institut e.V., Universität Dortmund (Lehrstuhl Verkehrssysteme und -logistik), Berlin, Dortmund, 2007.
- [Qua06] Quadriguasi, J.; Walther, G.; Bloemhof, J.; Van Nunen, J.A.E.E.; Spengler, T.: A methodology for assessing eco-efficiency in logistics networks. Braunschweig, Rotterdam, 2006
- [SMZ12a] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Isoenergetische Fächer eines Automatischen Kleinteilelagers. In: Wolf-Kluthausen, H. (Hrsg.): Jahrbuch Logistik 2012. S. 28-33, Verlag: free beratung GmbH, Korschenbroich, 2012, ISBN 978-3-9809412-8-0.
- [SMZ12b] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Der Einfluss kinematischer Parameter auf den Energiebedarf eines Regalbediengerätes. In: Zadek, H. (Hrsg.): 8. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V., S. 70-79, Verlag: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2012, ISBN 978-3-940961-80-8.
- [SSTSZ13] Siegel, A.; Schulz, R.; Turek, K.; Schmidt, T.; Zadek, H.: Modellierung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten und verschiedener Lagerbetriebsstrategien zur Reduzierung des Energiebedarfs. In: ten Hompel, M. (Hrsg.): 9. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V., S. 91-108, Verlag: Praxiswissen, Dortmund, 2013, ISBN 978-3-86975-085-9.
- [Tha09] Thaler, A.: TGW nutzt Energieeffizienz-Potentiale in Fördersystemen. <http://www.logistik-express.eu/artikel/1/4297/tgw-nutzt-energieeffizienz-potentiale-in-foerdersystemen/>, Stand: 19.03.2010
- [tHSN07] ten Hompel, M. (Hrsg.); Schmidt, T.; Nagel, L.; Jünemann, R. (Hrsg.): Materialflusssysteme - Förder- und Lagertechnik. Verlag: Springer, 3. Auflage, Berlin, Heidelberg, 2007, ISBN 978-3-540-73235-8.
- [tHS10] ten Hompel, M.; Schmidt, T.: Warehouse Management - Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen. Verlag: Springer, 4. Auflage, Berlin, Heidelberg, 2010, ISBN 978-3-642-03184-7.
- [Tim09] Timpe, W: Smart Domestic Appliances Supporting the System - Integration of Renewable Energy. Öko-Institut, Darmstadt, 2009.
- [UBA07] Umweltbundesamt: Klimaschutz in Deutschland: 40%-Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2020 gegenüber 1990. Dessau, 2007.
- [ZVEI06] Zentralverband Elektrotechnik - und Elektronikindustrie e.V.: High-Tech-Strategie Deutschland - Empfehlungen der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie. Frankfurt am Main, 2006.