

Modellierung des Energiebedarfs von Regalbedien- geräten und verschiedener Lagerbetriebsstrategien zur Reduzierung des Energiebedarfs

Modeling the Energy Need of Storage and Retrieval Vehicles and
Different Storage Operating Strategies for the Reduction of the Energy Need

Armin Siegel *
Robert Schulz **
Karsten Turek *
Thorsten Schmidt *
Hartmut Zadek **

* Professur für Technische Logistik
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Fakultät Maschinenwesen
Technische Universität Dresden

** Lehrstuhl für Logistik
Institut für Logistik und Materialflusstechnik, Fakultät Maschinenbau
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

In diesem Beitrag wird ein detailliertes Berechnungsmodell für den Leistungsbedarf eines Regalbediengerätes vorgestellt und durch den Vergleich mit Messungen an einem Versuchsgerät validiert. Aspekte der Leistungsmessung und der Versuchsauswertung werden erläutert. Darüber hinaus wird aufgezeigt, wie der Energiebedarf für Einzel- und Doppelspiele eines Regalbediengerätes auf der Basis des Berechnungsmodells ermittelt werden kann. Weiterhin werden vier Lagerbetriebsstrategien zur Reduzierung des Energiebedarfs vorgestellt und mit bestehenden Strategien hinsichtlich der Auswirkungen auf den mittleren erzielbaren Durchsatz und den mittleren Energiebedarf verglichen.

[Schlüsselwörter: Regalbediengerät, Leistungsmodell, Energiebedarf, Lagerbetriebsstrategien]

In this article a detailed model for the power consumption of a storage and retrieval machine is presented. The model is validated by experiments. Aspects of the measurement process and evaluation are discussed. It is shown how to calculate the energy need of a storage and retrieval machine based on the proposed model for single and double cycles. In addition, four warehouse operating strategies to reduce the energy need of storage and retrieval vehicles are presented and compared to existing strategies regarding their impact on the average throughput and the average energy need per hour.

[Keywords: storage and retrieval vehicle, power consumption model, energy need, warehouse operating strategies]

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

Förderhinweis: Dieser Beitrag entstand im Rahmen der IGF-Vorhaben Nr. 17014 BR „Energieeffiziente Steuerungsstrategien für Materialflusssysteme“ der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme e.V. (FG IFL) und 17389 BR „Energieeffiziente Lagerstrategien und Lastverteilung“ der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V. Diese Vorhaben werden von der AiF über das Programm zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung- und Entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

1 ENERGIEEFFIZIENZ BEI REGALBEDIENGERÄTEN

Im Zuge des steigenden Umweltbewusstseins und einhergehend mit den begrenzt zur Verfügung stehenden Primärenergieressourcen rückt die Energieumsatzbetrachtung auch in der Materialflusstechnik stärker in den Vordergrund. Die Kosten für die Energieversorgung eines fördertechnischen Systems übersteigen die Investitionskosten oft schon nach wenigen Jahren. Mit steigenden Energiepreisen wird dieser Zeitraum kürzer. Bei der Bewertung der Lebenszykluskosten eines Materialflusssystems sind deshalb die Energiekosten von steigender Bedeutung. Die hohe Eigenmasse der Regalbediengeräte als auch die Verknüpfung von Fahr- und Hubbewegung bieten Potential für Energieeinsparungen (vgl. [Sch09] und [BLS12]).

Dies bildet den Ausgangspunkt für die beiden Forschungsprojekte an der TU Dresden und der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU). Insbesondere die Möglichkeiten einer energieeffizienten Steuerung sollen in diesem Beitrag aufgezeigt und diskutiert werden. Grundlage bildet ein Energiebedarfsmodell der TU Dresden, dessen Entwicklung zunächst beschrieben wird. Auf-

bauend darauf wurden an der OvGU verschiedene Lagerbetriebsstrategien hinsichtlich des Energiebedarfs untersucht. Deren Beschreibung und ihre Auswirkungen sowohl auf den Energiebedarf als auch auf die erzielbare Durchsatzleistung eines RBG bilden den zweiten Teil dieses Beitrags.

2 LEISTUNGSBEDARFSERFASSUNG AN REGALBEDIENGERÄTEN

Den typischen Aufbau der Bewegungsachsen eines Regalbediengerätes (RBG) zeigt Abbildung 1.

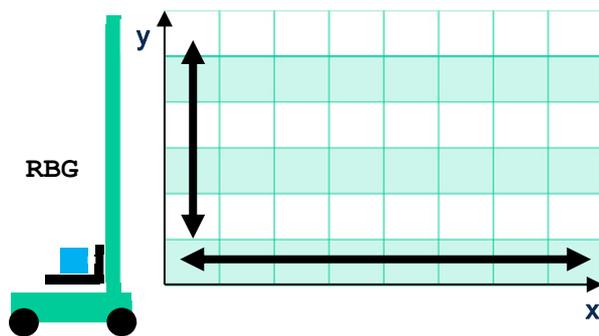


Abbildung 1. Aufbau eines Regalbediengerätes

Ein RBG besteht aus einem Fahrwagen, mit dem eine horizontale Bewegung realisiert wird und einem Hubwagen an einem Mast auf dem Fahrwagen für die vertikale Bewegung. Zur Einlagerung des Lagergutes erfolgt eine Bewegung in x-Richtung mit dem Fahrwerk und eine in y-Richtung mit dem Hubwerk. Beide Bewegungen werden im Weiteren als siebenphasiger Bewegungsablauf, wie ihn Abbildung 2 darstellt, angenommen.

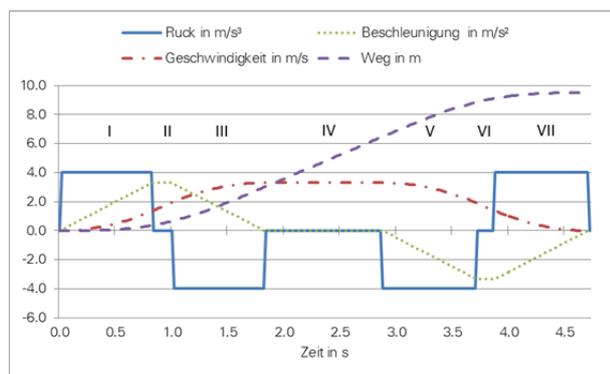


Abbildung 2. Siebenphasiger Bewegungsablauf

Der Bewegungsablauf gliedert sich in die Beschleunigung (Phasen I-III), Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit (Konstantfahrt Phase IV) und das Abbremsen (Phasen V-VII). Während des Anfahr- bzw. Abbremsvorgangs wird der Betrag der zeitlichen Änderung der Beschleunigung, der sogenannte Ruck r , begrenzt. Die physikalischen Größen Beschleunigung a , Geschwindigkeit v und

Weg s sind über ihre zeitlichen Ableitungen miteinander verknüpft, wie in Gleichung (1) dargestellt.

$$r = \frac{\partial a}{\partial t} = \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial^3 s}{\partial t^3} \quad (1)$$

Zur Ermittlung des Energiebedarfs des Regalbediengerätes erfolgt eine getrennte Betrachtung der beiden Bewegungen, bevor sie im Gesamtmodell wieder zusammengefügt werden. Dabei muss zunächst der elektrische Aufbau eines RBG betrachtet werden, um mögliche Messpunkte zur Erfassung der Leistung zu identifizieren.

2.1 ELEKTRISCHER AUFBAU EINES REGALBEDIENGERÄTES

Damit das RBG dem oben dargestellten Bewegungsablauf folgt, ist eine Regelung erforderlich, um zur jeweiligen Drehzahl (Geschwindigkeit) das passende Drehmoment in der Antriebsmaschine einzuprägen. Darüber hinaus ist eine Regelung notwendig, um die positionsgenaue Anfahrt eines Regalfaches sicherzustellen. Als Antrieb bei Regalbediengeräten kommen heute üblicherweise frequenzgeregelter Drehfeldmaschinen in Form einer Asynchronmaschine oder Synchronmaschine zum Einsatz. Zur Erzeugung des elektrischen Drehfeldes mit im Vergleich zum speisenden Netz veränderbarer Spannungsamplitude und Frequenz wird ein sogenannter Frequenzumrichter eingesetzt (vgl. [Fis04]). Abbildung 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Frequenzumrichters.

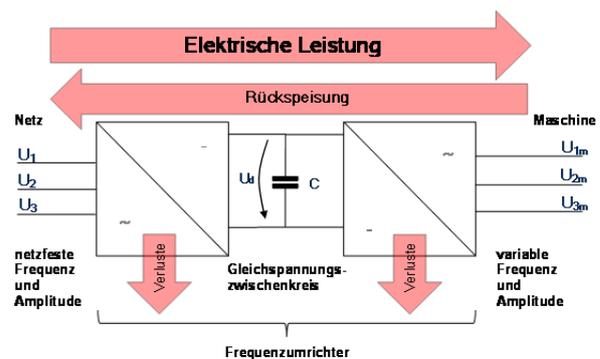


Abbildung 3. Aufbau eines Frequenzumrichters

Die vom Netz bereitgestellten Spannungen U_1 , U_2 und U_3 werden im netzseitigen Stromrichter gleichgerichtet und vom Wechselrichter in ein Drei-Phasen-System mit variabler Frequenz und Spannung umgeformt. Die typische Form der verkettenden Spannung am Ausgang zeigt Abbildung 4 für U_{12m} beispielhaft. Wie zu erkennen, weicht die Form der Spannung von der am Eingang anliegenden Sinusform deutlich ab. Durch die Ansteuerung der elektrischen Schalter im Wechselrichter wird eine Rechteckspannung erzeugt, die durch entsprechenden Pulsbetrieb einer angenäherten Sinusspannung nahe kommt. Dies geschieht analog für die Phasen 2 und 3 mit einer Phasenverschiebung von 120 Grad. Im Ergebnis entsteht

ein in Frequenz und Amplitude veränderliches Drehstromsystem, das die Grundlage für die Regelung der jeweiligen Antriebsmaschine bildet. In Regalbediengeräten ist heute der Einsatz von zwei getrennten Frequenzumrichtern für das Fahr- und Hubwerk typisch.

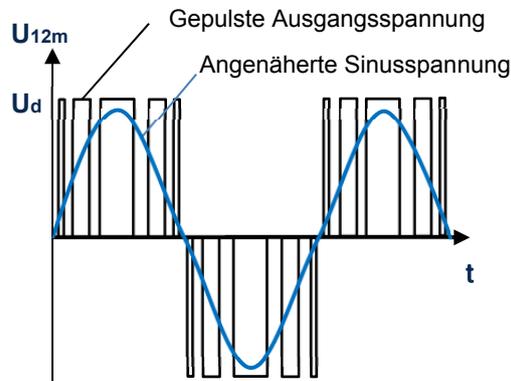


Abbildung 4. Ausgangsspannung des Frequenzumrichters

2.2 LEISTUNGSFLUSS

Um den Ort für die Leistungsmessung festzulegen, erfolgt die Betrachtung des Leistungsflusses am RBG. Grundsätzlich wird die Leistung vom elektrischen Netz über den Frequenzumrichter der Drehfeldmaschine zur Verfügung gestellt. Dabei entstehen Leistungsverluste bei der Gleichrichtung und der Wechselrichtung bedingt durch die Übergangswiderstände der eingesetzten Halbleiterbauelemente (vgl. [EM01]). Außerdem gibt es Betriebszustände, in denen von der Maschine Leistung an den Wechselrichter geliefert wird. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn das Hubwerk absenkt oder das Fahrwerk abbremst. In einem solchen Fall erhöht sich die Zwischenkreisspannung im Frequenzumrichter. Abhängig von der Art des Umrichters kann nun eine Rückspeisung der Energie in das Versorgungsnetz erfolgen. Bei älteren Anlagen hingegen befindet sich im Zwischenkreis ein elektrischer Widerstand, der über einen Schalter den Kondensator C definiert entlädt (vgl. Abbildung 3). Die in diesem Widerstand in Wärme umgesetzte Energie steht für eine weitere Nutzung nicht mehr zur Verfügung. Im Gegensatz dazu ist bei neueren Entwicklungen der Zwischenkreis von Fahr- und Hubwerk verbunden um gegebenenfalls frei werdende Energieanteile der jeweils anderen Achse zur Verfügung zu stellen bzw. dieses Verhalten gezielt zur Energieeinsparung zu nutzen (vgl. [EG13]). Um die Leistungsaufnahme eines Regalbediengerätes nachzubilden, ist die Erfassung der gesamten aufgenommenen Leistung am netzseitigen Eingang des Frequenzumrichters geeignet, da so die gesamte Anlage mit allen Nebenverbrauchern modelliert werden kann.

2.3 VERSUCHSAUFBAU

Die Erfassung der Leistung am netzseitigen Anschluss des RBG bietet den Vorteil, dass neben der eigentlichen Fahrbewegung und deren Verlusten auch der Grundbedarf für die Steuerung, Sensorik, Beleuchtung usw. sowie die Verluste im Frequenzumrichter erfassbar werden. Beim netzseitigen Anschluss handelt es sich um ein Drei-Phasen-System mit fester Frequenz von 50 Hz. Zur Erfassung der aufgenommenen Leistung eignet sich die Messung in der sogenannten Aronschaltung (vgl. [Lun91]). Abbildung 5 stellt den Aufbau der Messschaltung dar. Mit dieser ist die Erfassung der Gesamtleistung mit nur zwei Leistungsmessern möglich.

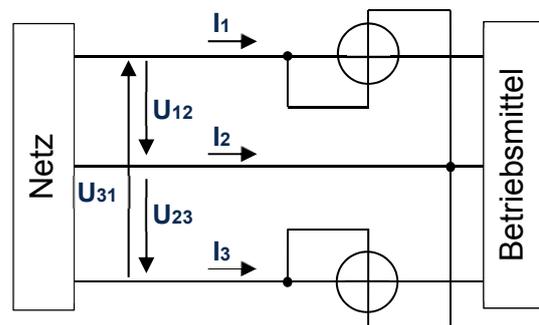


Abbildung 5. Leistungsmessung in der Aronschaltung

Für die Versuche wurden das Fahrwerk und das Hubwerk getrennt betrachtet. In den Experimenten erfolgten jeweils fünf Fahrten entlang der Regalgasse (Fahrwerk) bzw. entsprechend Hebe- und Senkvorgänge. Dabei wurden die Vorgaben für die maximale Beschleunigung und Geschwindigkeit variiert. Abbildung 6 zeigt exemplarisch den gemessenen Leistungsverlauf für eine Fahrwerksfahrt mit einer Beschleunigung von $2,0 \text{ m/s}^2$ und einer Geschwindigkeit von $2,5 \text{ m/s}$. In der Phase Konstantfahrt im Bereich von $3,5 \text{ s}$ - $5,7 \text{ s}$ zeigt das Gerät eine Leistungsaufnahme von ca. $5,5 \text{ kW}$.

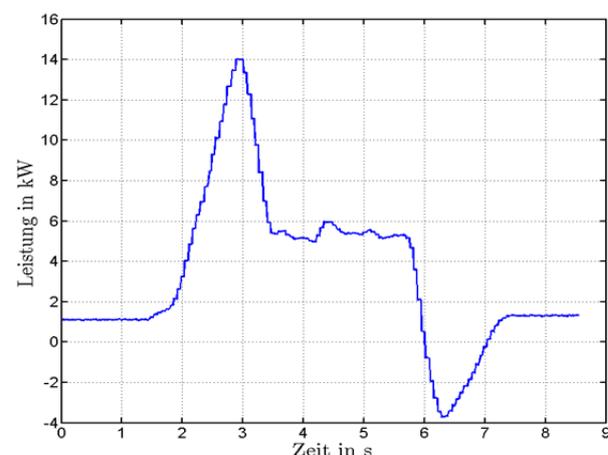


Abbildung 6. Leistungsverlauf einer Einzelfahrt

Die Leistungsmessungen wurden an einem RBG für ein automatisches Kleinteilelager (AKL) an der OvGU durchgeführt. Das RBG weist laut Datenblatt die folgenden Parameter auf. Fahrwerk schließt im Weiteren die Parameter des Fahrwagens ein, gleiches gilt für Hubwerk.

Tabelle 1. RBG-Parameter

Parameter	Fahrwerk	Hubwerk
Ruck	6,0 m/s ³	8,0 m/s ³
Maximale Beschleunigung	3,0 m/s ²	4,0 m/s ²
Maximale Geschwindigkeit	5,0 m/s	4,0 m/s
Masse	1.996 kg	215 kg

3 BERECHNUNGSMODELL

Für die Nachbildung der experimentell bestimmten Leistungskurven des vorgestellten RBG wurde ein Berechnungsmodell entwickelt. Das Modell basiert auf grundlegenden physikalischen Gleichungen und technischen Systemwerten. Es besitzt deshalb allgemeingültigen Charakter, insofern die gleichen technischen Systemeigenschaften vorliegen. Nachfolgend werden die Bestandteile des Berechnungsmodells vorgestellt. Dabei werden der Fahrvorgang und der Hubvorgang getrennt betrachtet. Weiterhin sind der Energiebedarf des Frequenzumrichters und der Grundbedarf der Anlage Bestandteile des Modells.

3.1 HORIZONTALE BEWEGUNG

Die Masseträgheit des RBG bewirkt einen Beschleunigungswiderstand während des Anfahrvorgangs. Über den gesamten Bewegungsvorgang wirkt der Fahrwiderstand der Rad-Schiene-Kombination. Das Produkt aus Normalkraft F_N und spezifischem Fahrwiderstand μ_f ergibt die Widerstandskraft. Der spezifische Fahrwiderstand beinhaltet die Wirkung aus der rollenden Reibung und der Lagerreibung. Die dementsprechend erforderliche Antriebskraft wurde nach Scheffler [Sch94] mit folgender Formel bestimmt.

$$F_{FW} = (m + m_{\text{nutz}}) \cdot g \cdot \left[\frac{2}{D} \cdot \left(\mu_L \cdot \frac{d}{2} + f \right) \right] \quad (2)$$

- m = Masse des RBG
- m_{nutz} = Masse der Nutzlast
- g = Erdbeschleunigung
- D = Raddurchmesser
- d = Nabendurchmesser
- f = Hebelarm der rollenden Reibung
- μ_L = Lagerreibwert

Das RBG fährt mit VULKOLLAN[®] beschichteten Rädern auf einer Stahlschiene. Diese Werkstoffpaarung bestimmt den Wert des Hebelarms der rollenden Reibung. Der Zahlenwert im Berechnungsmodell wurde aus technischen Tabellen entnommen, ebenso der Wert für die Lagerreibung. Raddurchmesser und Nabendurchmesser wurden vor Ort gemessen. Die Annahme zur Masse des RBG beruht auf den Angaben in der Anlagenbeschreibung des Herstellers. Nachfolgende Formel fasst die aufzubringende mechanische Leistung der horizontalen Bewegung zusammen.

$$P_{\text{mech_horizont}} = ((m + m_{\text{nutz}}) \cdot a + F_{FW}) \cdot v \quad (3)$$

Der zusätzliche Energiebedarf von Getriebe und Kraftübertragung wird über angenommene Wirkungsgrade unabhängig von den kinematischen Parametern hinzugefügt, ebenso der Eigenbedarf des Antriebsmotors. Im Ergebnis ergibt sich die Verlustleistung, die im Antriebsstrang für die Bewegung verloren geht.

$$P_{V\text{mech}} = P_{\text{mech_horizont}} \left(1 - \mu_{\text{Motor}} \cdot \mu_{\text{Getriebe}} \cdot \mu_{\text{Kraftübertrag}} \right) \quad (4)$$

Zur Ermittlung der Verlustleistung P_{VU} am Frequenzumrichter wird vereinfachend ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Motoreingangsleistung $P_{ME} = P_{\text{mech_horizont}} + P_{V\text{mech}}$ und zugehöriger Verlustleistung angenommen. Die Angaben zur maximalen Verlustleistung ($P_{V\text{max}}$) und maximaler Ausgangsleistung ($P_{FU\text{max}}$) werden aus der technischen Spezifikation des Umrichters entnommen. Zusätzlich kann eine Grundverlustleistung (P_{GV}) des Umrichters berücksichtigt werden. Zur Berechnung der aktuellen Verlustleistung P_{VU} wird folgende Gleichung herangezogen:

$$P_{VU} = \frac{P_{ME} \cdot P_{V\text{max}}}{P_{FU\text{max}}} + P_{GV} \quad (5)$$

Der Grundverlust der Anlage entsteht aus dem Energiebedarf der betriebsbereiten Anlage und der Stromversorgung. Der Wert wird im Stillstand des RBG ermittelt und als konstante Größe dem Modell hinzugefügt. Der Leistungsbedarf für die horizontale Bewegung ist mit der Summe aus den Gleichungen (3) bis (5) und den Grundverlusten bestimmt.

3.2 VERTIKALE BEWEGUNG

Beim Heben und Senken der Last ist neben dem Beschleunigungswiderstand zusätzlich die Erdanziehungskraft zu berücksichtigen. Mit nach oben gerichtet definierter Bewegungsrichtung ergibt sich:

$$P_{\text{mech_vertikal}} = (m_h + m_{\text{nutz}}) \cdot (a + g) \cdot v \quad (6)$$

Der Leistungsverlust infolge von Widerständen in Motor, Getriebe und Kraftübertragung wird ebenfalls, siehe Gleichung (4), über angenommene Wirkungsgrade be-

schrieben. Abhängig vom jeweiligen RBG sind diese Werte anzupassen. Die Ermittlung der Verlustleistung P_{VU} am Frequenzumrichter erfolgt analog zum Fahrwerk.

3.3 BEWEGUNGSMODELL

Im dargestellten Energiebedarfsmodell wird die jeweils aktuelle Geschwindigkeit als Berechnungsgröße benötigt. Die dynamischen Größen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck der Fahr- und Hubbewegung des RBG wurden im Experiment nicht gemessen, sondern mithilfe eines Bewegungsmodells bestimmt. Dieses Vorgehen motiviert sich daraus, dass für die Messung an weiteren Regalbediengeräten ein möglichst geringer Aufwand nötig sein soll. Dazu wurde ein Berechnungsmodell für den Bewegungsablauf, mit beliebig einstellbaren Werten für Fahrweg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck, aufgestellt. Grundlage bildete ein siebenphasiger Bewegungsablauf, wie ihn Abbildung 2 zeigt. Insbesondere waren spezielle Fahrten zu berücksichtigen, bei denen einzelne Bewegungsphasen aufgrund der gewählten Werte entfallen.

4 VERSUCHSAUSWERTUNG

Nach Abschluss der Messungen wurden aus den fünf Fahrversuchen eines Experiments die Mittelwerte für jeden Leistungsmesspunkt berechnet. Die entstandenen Kurven bilden den Ausgangspunkt für die weitere Auswertung und Modellanpassung. Gegenübergestellt wurden den Messdaten die berechneten Leistungsverläufe. Abbildung 7 zeigt exemplarisch einen Vergleich von berechneter und gemessener Wirkleistung für die ebenfalls bei Abbildung 6 verwendeten Parameter $a = 2,0 \text{ m/s}^2$ und $v = 2,5 \text{ m/s}$.

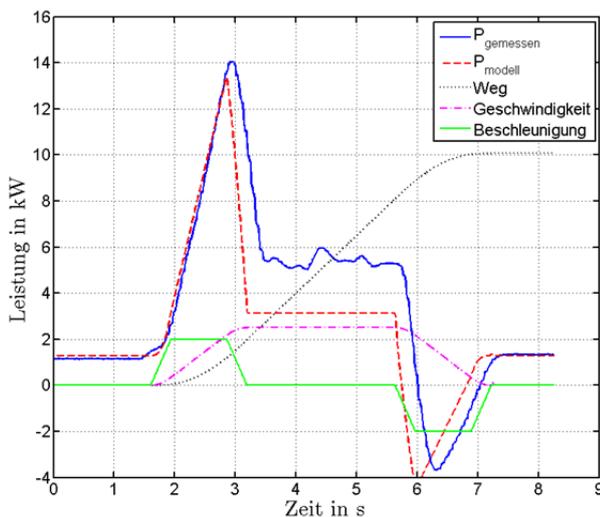


Abbildung 7. Modell und Messung im Vergleich vor Anpassung der Modellparameter

Die gute strukturelle Übereinstimmung im Kurvenverlauf bestätigt den gewählten Modellierungsansatz. Die deutlichen Differenzen der Werte in einzelnen Bereichen erfordern jedoch eine Anpassung der Modellparameter.

Zur Bewertung der Modellanpassung muss zunächst ein Fehlermaß definiert werden. Dafür wird der quadratische Abstand der Leistungswerte $P_{i\text{gemessen}} - P_{i\text{modell}}$ normiert auf der Messpunkteanzahl i gewählt:

$$\frac{1}{i} \sum_i \sqrt{(P_{i\text{gemessen}} - P_{i\text{modell}})^2} \quad (7)$$

Um nun eine Möglichkeit zu schaffen, das Fehlermaß in Abhängigkeit einer Parameteranpassung zu beobachten, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

Dabei werden alle Parameter des Modells bis auf einen in ihrem Wert festgehalten und nacheinander in kleinen Schritten um einen bestimmten Prozentsatz verändert. Ist dies für einen Parameter durchgeführt, wird der Vorgang solange wiederholt, bis alle Parameter untersucht wurden. Im Ergebnis ergibt sich ein Bild, welches das Fehlermaß der Anpassung in Abhängigkeit vom Parameter zeigt. Mit der so gewonnenen Bilderserie konnte das Modell schrittweise angepasst werden. Dazu wurden für alle durchgeführten Experimente Sensitivitätsanalysen erstellt und nach Parametern durchsucht, deren Veränderung (Richtung und Größen) für alle Experimente eine bessere Modellanpassung liefert. Nach mehreren Bewertungsschritten über alle aufgenommenen Experimente ergibt sich ein angepasstes Modell, in dem das Fehlermaß ein lokales Minimum annimmt. Abbildung 8 stellt das so angepasste Modell für ausgewählte Parameter eines Experiments dar.

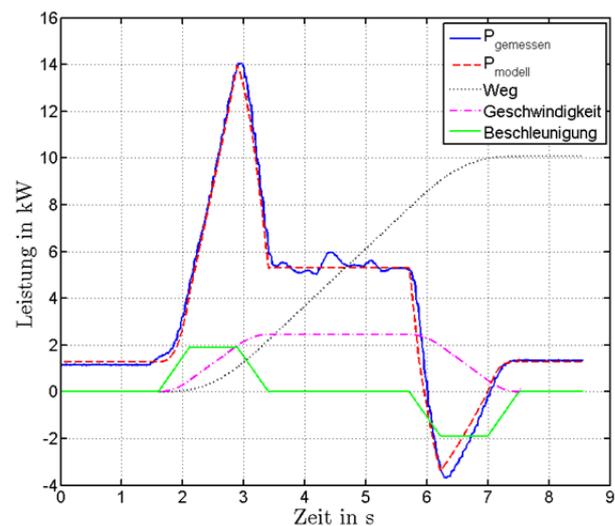


Abbildung 8. Modell und Messung im Vergleich nach Anpassung der Modellparameter

Darüber hinaus zeigt Abbildung 9 die dazugehörige Sensitivitätsanalyse dieses Experiments nach der Optimierung. Zur Anpassung wurden nicht alle Parameter herangezogen. Der Weg, den das RBG zurücklegt, ist bekannt und eignet sich deshalb nicht für eine Anpassung. Ähnlich verhält es sich mit den am Gerät gemessenen Größen Rad- und Nabendurchmesser sowie der direkt gemessenen Grundverlustleistung.

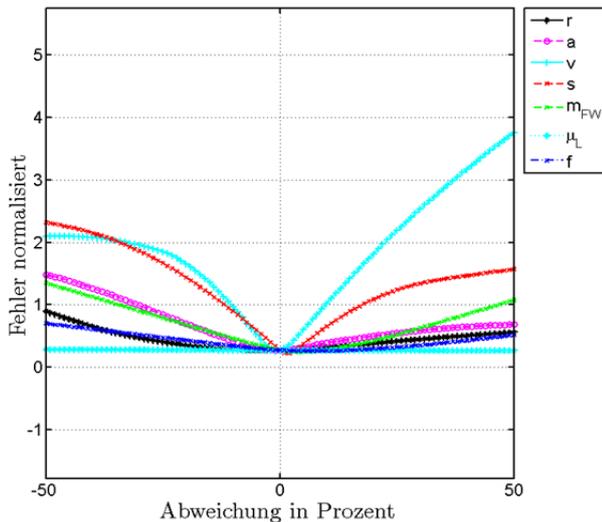


Abbildung 9. Sensitivitätsanalyse für ausgewählte Parameter nach Anpassung

Die angepassten Ausgangsparameter, deren relative Veränderung sowie die sich für das dargestellte Experiment resultierenden Parameterwerte zeigt Tabelle 2. Die Parameter Ruck, Beschleunigung, Geschwindigkeit, Masse sowie der Lagerreibwert und Hebelarm der rollenden Reibung wurden angepasst.

Tabelle 2. Veränderte Parameter des Fahrwerks

Parameter	Ausgangswert	Veränderung	Wert
Ruck	6,0 m/s ³	-38 %	3,72 m/s ³
Beschleunigung	2,0 m/s ²	-5 %	1,9 m/s ²
Geschwindigkeit	2,5 m/s	-2 %	2,45 m/s
Masse	1.996 kg	+10 %	2.200 kg
Lagerreibwert	0,005	+60 %	0,008
Hebelarm der rollenden Reibung	0,0045 m	+20 %	0,0054 m

Wie zu erkennen, stimmen die Kurven erheblich besser überein. Eine physikalische Erklärung für die veränderten Parameter kann darin begründet sein, dass die Anlage den angegebenen Ruck nicht erreicht bzw. die Regelung des RBG aufgrund von Unbestimmtheiten im System einem ideal berechneten Bewegungsablauf nicht exakt genug folgt. Damit ergeben sich ebenfalls Abweichungen zu dem in der Auswertung verwendeten ideal berechneten Bewegungsablauf. Die Ursachen hierfür können mit einer Messung der Bewegungskordinaten untersucht werden, waren aber nicht Gegenstand der aktuellen Untersuchung.

Die gute Übereinstimmung der Kurven mit einer höheren Masse des RBG im Modell kann darin begründet sein, dass die rotatorischen Trägheitsmomente des Motors sowie des Antriebsstranges im Modell nicht berücksichtigt sind. In der Vergrößerung der Masse finden diese Trägheitsmomente Eingang in das Modell. Eine andere Ursache wird bei der Reibungsmodellierung vermutet. Dort waren zum einen die geforderten Umgebungsbedingungen der Tabellenbuchwerte nicht gegeben und zum anderen die Materialeigenschaften nicht exakt bekannt.

Neben den geschilderten Anpassungen zeigen die Messdaten bei jeweils gleicher Beschleunigung und wachsenden Geschwindigkeiten eine zunehmende Abweichung im Bereich der Konstantfahrt. Diese Abweichung kann korrigiert werden, wenn im Modell ein vom Quadrat der Geschwindigkeit abhängiger Parameter k aufgenommen wird. Für den Leistungsbedarf entspricht dies, wie Gleichung (8) zeigt, einem zusätzlichen Produkt aus dem hinzugefügten Faktor und der Geschwindigkeit in der dritten Potenz.

$$P_{zu} = k \cdot v^3 \quad (8)$$

Typisch wäre dieser Ansatz für die Berücksichtigung eines Strömungswiderstandes. Allerdings ist die Größe des ermittelten Faktors mit 90 kg/m, der sich aus der Anpassung ergibt, deutlich über dem, den der Luftwiderstandsfaktor des Regalbediengerätes annehmen kann. Für das RBG ergibt sich mit etwa 3 m² Fläche, einem Widerstandsbeiwert von 2,2 und einer Luftdichte von 1,22 kg/m³ ein Wert von etwa 4 kg/m. Dieser ist mehr als 20-mal kleiner als der Wert, der mit der Anpassung bestimmte wurde. Mögliche Ursachen für dieses Verhalten waren bisher noch nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Das Hubwerk wurde analog dem Fahrwerk untersucht. Es ergeben sich die in Tabelle 3 aufgeführten relativen Parameteranpassungen. Beim Hubwerk waren wie beim Fahrwerk nur die nicht erfassten Eingangparameter Gegenstand der Anpassung. Darüber hinaus wurde die Masse von 215 kg auf 250 kg erhöht. Die jeweiligen Ursachen werden in einem dem Fahrwerk ähnlichen Verhalten vermutet.

Tabelle 3. *Veränderte Parameter des Hubwerks*

Parameter	Veränderung
Ruck	-20 %
Beschleunigung	-4 %
Geschwindigkeit	-2 %

Für das Gesamtmodell sind darüber hinaus weitere Parameter notwendig. Diese sind für das Regalbediengerät an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg in Tabelle 4 bis Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 4. *Allgemeine Modellparameter*

Parameter	Wert
Grundverlustleistung	0,685 kW
Gabelhalteleistung	0,415 kW

Tabelle 5. *Modellparameter des Fahrwerks*

Parameter	Wert
Raddurchmesser	0,3 m
Nabdurchmesser	0,06 m
Antriebswirkungsgrad	0,8
Maximale Verlustleistung Frequenzumrichter	1,84 kW
Frequenzumrichter Anschlussleistung	36,8 kW
Grundverlustleistung Frequenzumrichter	0,129 kW

Tabelle 6. *Modellparameter des Hubwerks*

Parameter	Wert
Antriebswirkungsgrad	0,9
Maximale Verlustleistung Frequenzumrichter	0,78 kW
Frequenzumrichter Anschlussleistung	15,5 kW
Grundverlustleistung Frequenzumrichter	0,054 kW

5 ENERGIEBERECHNUNG

Mit dem im vorherigen Abschnitt bestimmten Leistungsbedarfsmodell ist nun die Möglichkeit geschaffen, um innerhalb gewisser Grenzen für beliebige kinematische Parameter und Wege den Leistungsverlauf zu berechnen. Aus dem so bestimmten Leistungsverlauf kann dann der Energiebedarf für eine Fahrt aus dem Integral über den Leistungsverlauf gebildet werden. Abbildung 10 zeigt den mit den oben gegebenen Parametern berechneten Leistungsverlauf.

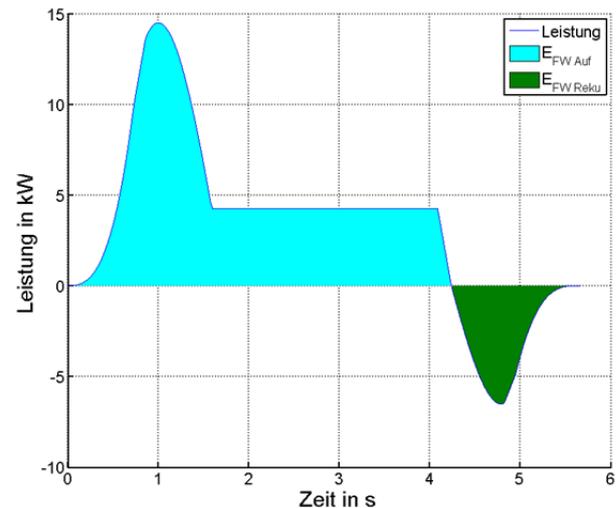


Abbildung 10. *Leistungsverlauf nach Berechnungsmodell*

In der Abbildung wurden die Grundverluste nicht berücksichtigt, da diese in den nachfolgend betrachteten Untersuchungen der Lagerbetriebsstrategien als Produkt aus Grundlast und benötigter Arbeitsspielzeit Einzug finden. Die gekennzeichneten Flächen visualisieren die aufgenommene Energie und den zurückgespeisten Anteil.

6 BERECHNUNG DES ENERGIEBEDARFS VON EINZEL- UND DOPPELSPIELN

Soll der mittlere Energiebedarf eines RBG für gegebene Lagerbetriebsstrategien bestimmt werden, muss der Energiebedarf der Arbeitsspiele bekannt sein. Der Energiebedarf von Arbeitsspielen setzt sich zusammen aus dem Energiebedarf des Fahrwerks, des Hubwerks, dem Energiebedarf der Lastübergabe/ -übernahme und Positionierung $E_{Pos/\dot{U}}$ sowie dem Energiebedarf der Grundlast, die über die komplette Arbeitsspielzeit wirkt. Bei der Berechnung des Energiebedarfs von RBGs muss unterschieden werden, ob es sich um ein RBG ohne oder mit Rückspeiseeinheit (RSE) handelt (vgl. Abschnitt 2.2). Verfügt das RBG nicht über eine Rückspeiseeinheit (oRSE), gehen in die Energiebilanz lediglich die aufgenommenen Energiewerte ($E_{FW Auf}$, $E_{HW Auf}$) ein. Ist das betrachtete RBG mit einer Rückspeiseeinheit (mRSE) ausgestattet, werden bei der Ermittlung des Energiebedarfs der Arbeitsspiele die bei der Verzögerung des Fahrwerks bzw. beim Senkvorgang des Hubwerks rekurrierenden Energie-

mengen $E_{FW\text{ Reku}}$ bzw. $E_{HW\text{ Reku}}$ von den insgesamt aufgenommenen Energiemengen subtrahiert. Weiterhin ist die Grundlast P_{GL} eines RBG mit RSE höher als die Grundlast eines RBG ohne RSE.

Somit lässt sich der Energiebedarf eines RBG ohne RSE für Einzelspiele mittels Gleichung (9) und für Doppelspiele über Formel (10) berechnen. Die Arbeitsspielzeit, die, wie bereits erwähnt, ebenfalls einen Einfluss auf den Energiebedarf der Arbeitsspiele hat, wird für Einzelspiele (ES) mittels Formel (11) und für Doppelspiele (DS) mittels Gleichung (12) berechnet. Die Arbeitsspielzeiten entsprechen der Summe aus den maßgeblichen Bewegungszeiten $t_{Bew\text{ maß}}$ sowie den Positionierungs- und Übergabezeiten $t_{Pos/\bar{U}}$. Verfügt das RBG über eine RSE, gelten für die Berechnung des Energiebedarfs von Einzel- bzw. Doppelspielen die Formeln (13) bzw. (15).

$$E_{ES\text{ oRSE}} [\text{kWs}] = 2 \cdot E_{FW\text{ Auf}} + E_{HW\text{ Auf}} + 2 \cdot E_{Pos/\bar{U}} + P_{GL\text{ oRSE}} \cdot t_{ES} \quad (9)$$

$$E_{DS\text{ oRSE}} [\text{kWs}] = \sum E_{FW\text{ Auf}} + \sum E_{HW\text{ Auf}} + 4 \cdot E_{Pos/\bar{U}} + P_{GL\text{ oRSE}} \cdot t_{DS} = E_{FW\text{ Auf}}(\overline{EP_1}) + E_{FW\text{ Auf}}(\overline{P_1P_2}) + E_{FW\text{ Auf}}(\overline{P_2A}) + E_{HW\text{ Auf}}(\overline{EP_1}) + E_{HW\text{ Auf}}(\overline{P_1P_2}) + E_{HW\text{ Auf}}(\overline{P_2A}) + 4 \cdot E_{Pos/\bar{U}} + P_{GL\text{ oRSE}} \cdot t_{DS} \quad (10)$$

$$t_{ES} = 2 \cdot \text{MAX} \{t_{FW\text{ Bew}}, t_{HW\text{ Bew}}\} + 2 \cdot t_{Pos/\bar{U}} \quad (11)$$

$$t_{DS} = t_{Bew\text{ maß}}(\overline{EP_1}) + t_{Bew\text{ maß}}(\overline{P_1P_2}) + t_{Bew\text{ maß}}(\overline{P_2A}) + 4 \cdot t_{Pos/\bar{U}} \quad (12)$$

$$E_{ES\text{ mRSE}} [\text{kWs}] = 2 \cdot E_{FW\text{ Auf}} - 2 \cdot |E_{FW\text{ Reku}}| + E_{HW\text{ Auf}} - |E_{HW\text{ Reku}}| + 2 \cdot E_{Pos/\bar{U}} + P_{GL\text{ mRSE}} \cdot t_{ES} \quad (13)$$

$$E_{ES\text{ mRSE}} [\text{kWs}] = 2 \cdot E_{FW\text{ ges}} + E_{HW\text{ ges}} + 2 \cdot E_{Pos/\bar{U}} + P_{GL\text{ mRSE}} \cdot t_{ES} \quad (14)$$

$$E_{DS\text{ mRSE}} [\text{kWs}] = \sum E_{FW\text{ Auf}} - \left| \sum E_{FW\text{ Reku}} \right| + \sum E_{HW\text{ Auf}} - \left| \sum E_{HW\text{ Reku}} \right| + 4 \cdot E_{Pos/\bar{U}} + P_{GL\text{ mRSE}} \cdot t_{DS} = E_{FW\text{ ges}}(\overline{EP_1}) + E_{FW\text{ ges}}(\overline{P_1P_2}) + E_{FW\text{ ges}}(\overline{P_2A}) + E_{HW\text{ ges}}(\overline{EP_1}) + E_{HW\text{ ges}}(\overline{P_1P_2}) + E_{HW\text{ ges}}(\overline{P_2A}) + 4 \cdot E_{Pos/\bar{U}} + P_{GL\text{ mRSE}} \cdot t_{DS} \quad (15)$$

7 ERMITTLUNG DES MITTLEREN ENERGIEBEDARFS EINES REGALBEDIENGERÄTS MITTELS SIMULATION

Um den mittleren Energiebedarf eines RBG zu bestimmen, muss der mittlere Energiebedarf pro Ladeinheit (LE) berechnet werden. Dieser ergibt sich allgemein aus der Division des kumulierten Energiebedarfs aller Ar-

beitsspiele durch den kumulierten Durchsatz im betrachteten Zeitraum. Werden ausschließlich Einzelspiele ausgeführt, kann der mittlere Energiebedarf für bestimmte Lagerbetriebsstrategien analytisch berechnet werden. Werden auch Doppelspiele ausgeführt, ist eine analytische Berechnung des mittleren Energiebedarfs eines RBG aufgrund der großen Anzahl möglicher Doppelspielkombinationen nicht mehr möglich. Wenn Lagerbetriebsstrategien auf der aktuellen Lagerplatzbelegung basieren, z. B. die Kürzeste-Fahrzeit-Regel, ist eine analytische Berechnung ebenfalls nicht möglich. In diesen Fällen muss der mittlere Energiebedarf eines RBG mit Hilfe des Werkzeugs der Simulation ermittelt werden.

Die Auswirkungen verschiedener Lagerbetriebsstrategien auf den Energiebedarf und den Durchsatz eines RBG werden im folgenden Abschnitt dargelegt. Hierfür wurden die Strategien anhand eines Beispiel-AKL in der Software Plant Simulation simuliert. Die Strategien gelten jedoch auch für andere automatisierte Läger, in denen RBGs eingesetzt werden, z. B. Paletten-Hochregalläger. Gegebenenfalls unterscheidet sich das energetische Verhalten des Fahr- und Hubwerks vom betrachteten RBG. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen. Im gewählten Beispiel hat das Regal folgende Maße: 40,00 m Länge; 12,40 m Höhe; 0,50 m Länge der Regalfächer; 0,31 m Höhe der Regalfächer; 80 x 40 Fächer. Weiterhin wird angenommen, dass jede LE artikelrein ist. Das RBG verfügt über ein Einfach-LAM. Die kinematischen Parameter des RBG wurden vom RBG, das am Institut für Logistik und Materialflusstechnik an der OvGU zur Verfügung steht, übernommen (siehe Tabelle 1). Weil das im Beispiel betrachtete Regal höher als das real zur Verfügung stehende ist, muss die Gesamtmasse des RBG ebenfalls angepasst werden. Hierfür stand ein entsprechendes RBG vom Hersteller zur Verfügung, sodass dessen Gesamtmasse von 2.190 kg übernommen werden konnte. Die Parameter wurden entsprechend der in Abschnitt 4 beschriebenen Vorgehensweise an das Berechnungsmodell angepasst. Das Gewicht des Ladehilfsmittels beträgt 2,5 kg. In der Simulation wird von einer durchschnittlich geförderten Nutzlast von 20 kg ausgegangen. Der Übergabepunkt für Ein- und Auslagerungen (E-/A-Punkt) befindet sich an der Stirnseite des Regals auf Höhe der zweiten Regalzeile (siehe auch Abbildung 13).

Mit den Daten des Modells zur Bestimmung des Energiebedarfs einzelner Fahrten (vgl. Abschnitt 3) kann der mittlere Energiebedarf des AKL bei gegebenen Lagerbetriebsstrategien bestimmt werden. Der Energiebedarf der jeweiligen Arbeitsspiele und die Arbeitsspielzeiten werden über die Formeln (9)-(15) berechnet. Der Energiebedarf der Lastübergabe $E_{Pos/\bar{U}}$ entspricht durchschnittlich 0,7 kWs. Im Simulationsmodell wird unterschieden, ob es sich um ein RBG ohne oder mit RSE handelt. Wenn das RBG nicht über eine RSE verfügt, wird eine Grundlast $P_{GL\text{ oRSE}}$ von 0,8 kW angenommen. Verfügt das RBG über eine RSE, beträgt die Grundlast $P_{GL\text{ mRSE}}$ 1,1 kW.

Steht das RBG länger als eine Minute still, sinkt die Grundlast beim RBG ohne RSE auf 0,5 kW und mit RSE auf 0,685 kW. Anstatt der elektrischen Bremse wird die Haltearbeit von der mechanischen Bremse verrichtet.

In den Simulationsläufen wird von einer Lageranfangsbelegung von 80 %, einem Sicherheitsbestand von 10 % und einem maximalen Lagerfüllgrad von 95 % ausgegangen. Die Hubgeschwindigkeit wird zunächst bei 4,0 m/s fixiert, weil die Variation der Geschwindigkeit keinen Einfluss auf den Energiebedarf des Hubwerks hat (vgl. [SMZ12b, S. 74]). Umlagerungen werden nicht betrachtet, weil diese einen zusätzlichen Energiebedarf verursachen. Um die Ergebnisse statistisch abzusichern, wurden pro Parameterkombination mindestens fünf Simulationsläufe mit verschiedenen Zufallszahlen pro Parameterkombination durchgeführt. Das betrachtete AKL wird in jedem Simulationslauf 14 Tage simuliert. Eine Aufwärmphase von einem Tag bzw. zwei Tagen bei einer ABC-Zonierung wird zusätzlich berücksichtigt, damit die Ladeinheiten der zufällig vom Modell generierten Anfangsbelegung einmal umzuschlagen werden und somit der Einfluss der Anfangsbelegung minimiert wird, bevor die Aufzeichnung der Simulationsergebnisse startet. Es wird außerdem ein 24/7-Betrieb angenommen, um schichtbedingte Stillstandzeiten auszuschließen.

Als Ergebnisse liefert das Simulationsmodell u. a. den mittleren Durchsatz und den mittleren Energiebedarf bei Einzel- und Doppelspielen. Abbildung 11 stellt diese Kennzahlen für ein RBG ohne und mit RSE bei einer chaotischen Lagerung und unterschiedlichen maximal vorgegebenen Fahrgeschwindigkeiten gegenüber. Der mittlere Energiebedarf pro LE ist, wie zu erwarten, für Doppelspiele geringer als für Einzelspiele. Sein Minimum, das

auf den Energiebedarf der Grundlast zurückzuführen ist, erreicht er in beiden Fällen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 1,5 m/s. Weiterhin ist der mittlere Energiebedarf pro LE eines RBG mit RSE unter dieser Geschwindigkeit höher als bei einem RBG ohne RSE. Der Grund ist, dass zwar der Energiebedarf des Fahrwerks mit sinkender Geschwindigkeit abnimmt (vgl. [SMZ12b, S. 71 ff.]), der Einfluss der (höheren) Grundlast wegen der längeren Arbeitsspieldauer jedoch zunimmt. Aus dem Energieminimum pro LE den Schluss zu ziehen, dass die Geschwindigkeit nicht unter den entsprechenden Wert gesenkt werden sollte, ist jedoch falsch, weil sich der mittlere absolute Energiebedarf pro Stunde aus der Multiplikation des mittleren Energiebedarfs pro LE und dem mittleren Durchsatz pro Stunde ergibt. Hinzu kommt ggf. der Energiebedarf, der in Stillstandzeiten des RBG anfällt. Werden ausschließlich Einzelspiele ausgeführt, wird der mittlere absolute Energiebedarf pro Stunde E_{hES} mittels Formel (16) berechnet. Für Doppelspiele gilt dementsprechend Formel (17). \bar{E}_{ES} bzw. \bar{E}_{DS} ist der mittlere Energiebedarf pro Einzel- bzw. Doppelspiel. Analog ist \bar{Q}_{ES} bzw. \bar{Q}_{DS} der mittlere Durchsatz pro Stunde bei Einzel- bzw. Doppelspielen.

$$\bar{E}_{hES} \text{ [kWh/h]} = \frac{\bar{E}_{ES} \cdot \bar{Q}_{ES} + (3.600 - \bar{t}_{ES} \cdot \bar{Q}_{ES}) \cdot P_{GL}}{3.600} \quad (16)$$

$$\bar{E}_{hDS} \text{ [kWh/h]} = \frac{\frac{\bar{E}_{DS}}{2} \cdot \bar{Q}_{DS} + (3.600 - \frac{\bar{t}_{DS}}{2} \cdot \bar{Q}_{DS}) \cdot P_{GL}}{3.600} \quad (17)$$

Abbildung 12 zeigt die zu Abbildung 11 korrespondierenden absoluten Energiebedarfe pro Stunde. Es ist zu erkennen, dass der absolute Energiebedarf pro Stunde uneingeschränkt mit abnehmender vorgegebener Fahrge-

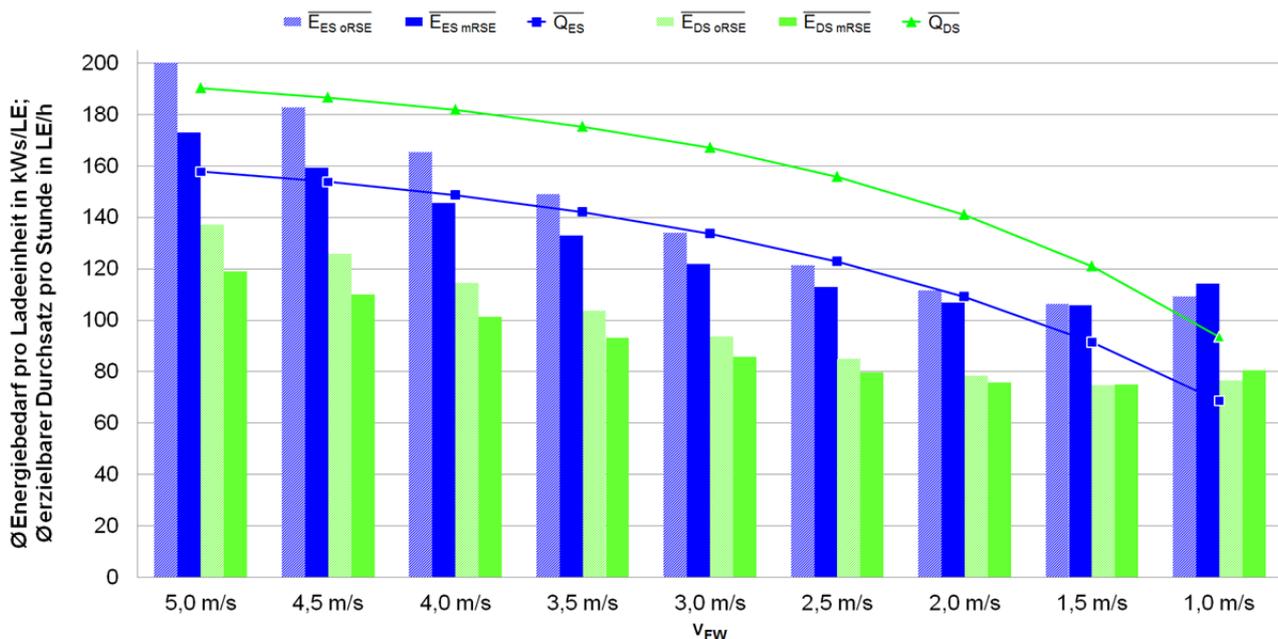


Abbildung 11. Mittlerer Energiebedarf pro Ladeinheit eines Regalbediengerätes ohne und mit Rückspeiseeinheit und mittlerer erzielbarer Durchsatz pro Stunde bei chaotischer Lagerung

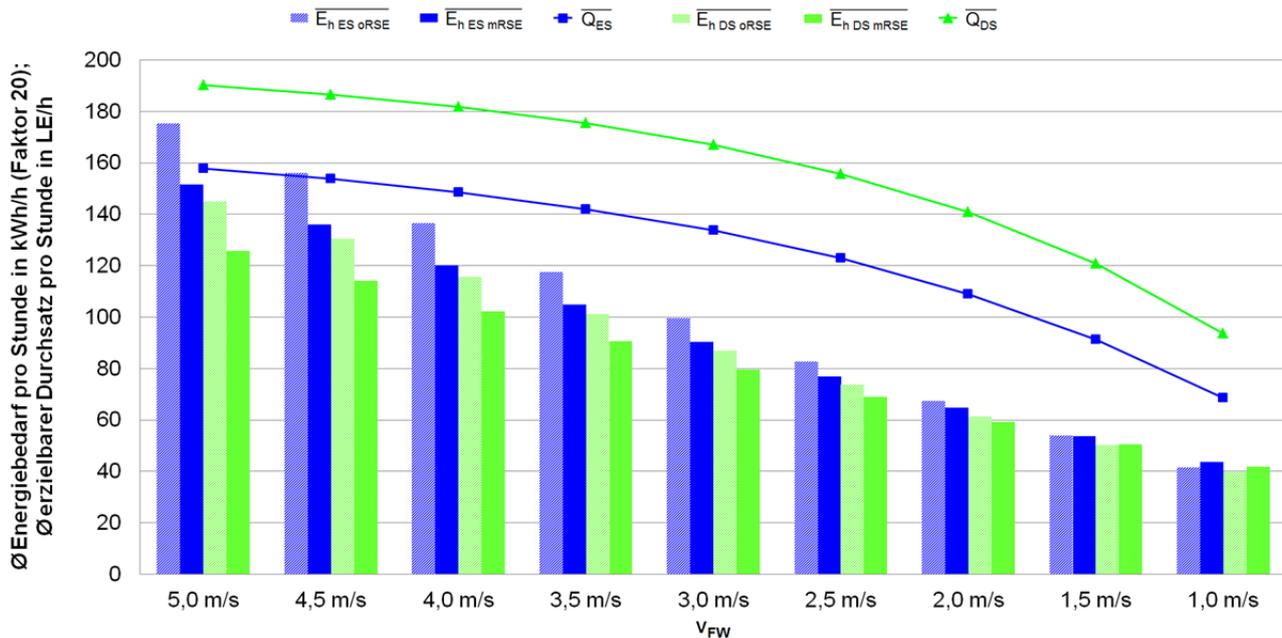


Abbildung 12. Mittlerer Energiebedarf pro Stunde eines Regalbediengerätes ohne und mit Rückspeiseeinheit und des mittlerer erzielbarer Durchsatz pro Stunde bei chaotischer Lagerung

schwindigkeit sinkt. Obwohl der Energiebedarf pro LE unter 1,5 m/s wieder ansteigt, sinkt der absolute Energiebedarf pro Stunde aufgrund des geringeren Durchsatzes weiter. Somit sollte der mittlere absolute Energiebedarf pro Stunde (neben dem mittleren erzielbaren Durchsatz pro Stunde) als Kriterium zum Vergleich verschiedener Lagerbetriebsstrategien herangezogen werden. Die Untersuchungen bzgl. des mittleren Energiebedarfs pro LE, des mittleren Durchsatzes pro Stunde und des mittleren Energiebedarfs pro Stunde wurden für verschiedene Lagerbetriebsstrategien durchgeführt. Die in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellten Verläufe sind für alle untersuchten Lagerbetriebsstrategien typisch. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse für den mittleren Energiebedarf pro Stunde und die mittleren (erzielbaren) Durchsatzleistungen für die untersuchten Lagerbetriebsstrategien vorgestellt und verglichen.

8 SIMULATION DES MITTLEREN ENERGIEBEDARFS VERSCHIEDENER LAGERBETRIEBSSTRATEGIEN

Im Rahmen dieses Beitrags wurden die chaotische Lagerung, die ABC-Zonierung und die Kürzeste-Fahrzeit-Regel bzw. deren Kombination mit der ABC-Zonierung hinsichtlich der mittleren Durchsatzleistungen und der mittleren Energiebedarfe pro Stunde untersucht. Um den Energiebedarf zu senken, wurden basierend auf vorangegangenen Studien (siehe u. a. [SMZ12a, S. 28 ff.; SMZ12b, S. 70 ff.; SMZ13, S. 171 ff.]) weitere Lagerbetriebsstrategien entwickelt. Voraussetzung für die Definition energieeffizienterer Lagerbetriebsstrategien ist, dass diese Strategien bei allen technischen RBG-Konfigurationen eine Verringerung des Energiebedarfs erzielen

bzw. sich dieser nicht gegenüber bestehenden Strategien erhöht. Daher wurde jede betrachtete Strategie für ein RBG ohne und mit RSE simuliert. Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse der betrachteten Lagerbetriebsstrategien vorgestellt und mit den bestehenden Strategien verglichen.

8.1 ABC-ZONIERUNG AUF ENERGETISCHER BASIS

Die erste Strategie, mit der der Energiebedarf eines automatischen Lagers mit RBG reduziert werden soll, ist die ABC-Zonierung auf energetischer Basis. Anstatt der Arbeitszeit pro Fach (klassische Zonierung) dient bei dieser Strategie der Energiebedarf jedes Lagerfachs als Grundlage für die Zonierung. Für die Berechnung des Energiebedarfs eines Lagerfachs wird nicht nur die Hin- und Rückfahrt der Einlagerung oder der komplette Einlagerungsprozess herangezogen. Für jedes Lagerfach wird der Energiebedarf der Ein- und Auslagerung mit Hin- und Rückfahrt zum E-/A-Punkt berechnet.

Weil die Ausgestaltung einer ABC-Zonierung vom Artikelspektrum des Unternehmens abhängt, wird zum einen vorausgesetzt, dass die ABC-Zonierung im betrachteten Fall möglich ist und zum anderen wird angenommen, dass die Anzahl der Lagerfächer möglichst auf jede Zone gleichverteilt ist. Bei der ABC-Zonierung auf zeitlicher Basis hat die maßgebliche Bewegungsdauer als Einteilungskriterium zur Folge, dass es zu Abweichungen zwischen der theoretisch ermittelten und der tatsächlichen Lagerplatzkapazität der Zonen kommt. Daher werden jeweils 1.080 Fächer der A- und C-Zone sowie 1.040 Fächer der B-Zone zugeordnet (siehe Abbildung 13).

Basiert die Zonierung auf dem Energiebedarf der Lagerfächer, sollen die Zonen ebenfalls diese Lagerplatzkapazitäten aufweisen, damit die beiden Lagerbetriebsstrategien vergleichbar sind. Dementsprechend gehören die 1.080 Fächer mit dem niedrigsten Energiebedarf zur A-Zone, die folgenden 1.040 zur B-Zone und die 1.080 Fächer mit dem höchsten Energiebedarf werden der C-Zone zugeordnet. Die Zonierungen basieren jeweils auf einer Fahrgeschwindigkeit von 5,0 m/s und werden auch bei geringeren Geschwindigkeiten nicht verändert, da eine Veränderung der Zonen eher eine langfristige Entscheidung für den Betreiber darstellt. Weiterhin wird die 80-20-Regel angewendet, d. h. 80 % der Lagerbewegungen werden von 20% der Artikel (A-Artikel) verursacht, 15 % der Lagerbewegungen von 30 % der Artikel (B-Artikel) und 5 % der Bewegungen sind auf 50 % des Artikelspektrums (C-Artikel) zurückzuführen. Es wird außerdem unterstellt, dass der Anteil der jeweiligen Artikelklasse an den Lagerbewegungen der Anfahrscheinlichkeit der korrespondierenden Zone entspricht. Innerhalb der Zonen erfolgt eine chaotische Lagerung der Lagereinheiten (LE).

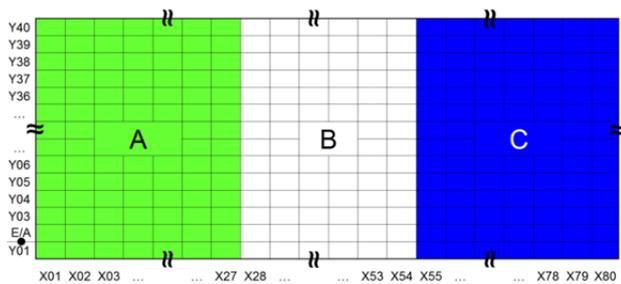


Abbildung 13. ABC-Zonierung auf zeitlicher Basis bei 4,0 m/s Hubgeschwindigkeit

In den Simulationsexperimenten konnte festgestellt werden, dass bei einer solchen ABC-Zonierung, bei der die Zonen horizontal vollständig hintereinander angeordnet sind (siehe Abbildung 13), zwischen einer ABC-Zonierung auf zeitlichen Basis und einer ABC-Zonierung auf energetischer Basis keine Unterschiede bzgl. des mittleren Durchsatzes und des mittleren Energiebedarfs pro Stunde existieren. Dieses Ergebnis ist auf die annähernd gleiche Lage der Zonen beider Zonierungsarten zurückzuführen (siehe Abbildung 14). Die Grenzen zwischen B- und C-Zone haben die gleiche Form.

Daher wurde die Hubgeschwindigkeit auf 2,5 m/s angepasst, sodass bei der ABC-Zonierung auf Grundlage der Bewegungs- bzw. Arbeitsspielzeit über der A-Zone ein Teil der B-Zone liegt. Aufgrund der Änderung der Hubgeschwindigkeit muss die Fächeranzahl der A- und B-Zone leicht angepasst werden. So weist die A-Zone bei 2,5 m/s Hubgeschwindigkeit 1.085 Fächer auf, während die B-Zone nur noch über 1.035 Fächer verfügt.

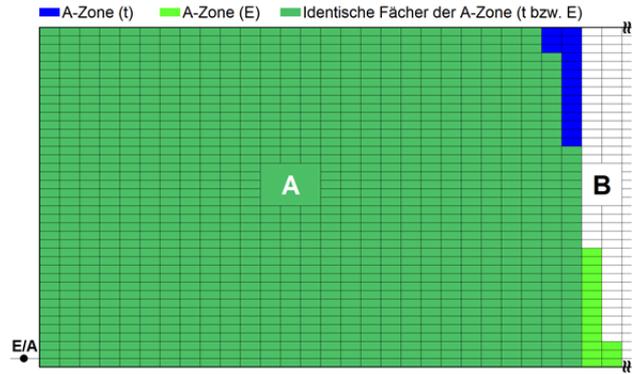


Abbildung 14. A-Zonen bei Zonierung auf zeitlicher bzw. energetischer Basis und 4,0 m/s Hubgeschwindigkeit

Tabelle 7 zeigt auszugsweise die Ergebnisse der Simulationsexperimente. Die ABC-Zonierung auf zeitlicher Basis wird mit der ABC-Zonierung auf energetischer Basis bzgl. der mittleren erzielbaren Durchsatzleistungen und der mittleren Energiebedarfe pro Stunde bei einem RBG mit RSE für Einzelspiele und verschiedene vorgegebenen Fahrwerksgeschwindigkeiten verglichen.

Tabelle 7. Zeitliche vs. energetische ABC-Zonierung für Einzelspiele und einem Regalbediengerät mit Rückspeiseeinheit bei 2,5 m/s Hubgeschwindigkeit für verschiedene Fahrwerksgeschwindigkeiten

V _{FW} [m/s]	ØQ _{ABC-t} [LE/h]	ØQ _{ABC-E} [LE/h]	ΔQ [%]	ØE _{ABC-t} [kWh/h]	ØE _{ABC-E} [kWh/h]	ΔE [%]
5,0	183,4	182,6	-0,4	5,07	4,84	-4,6
4,5	181,5	180,9	-0,3	4,76	4,57	-4,5
4,0	178,8	178,5	-0,2	4,41	4,25	-3,6
3,5	174,9	175,0	+0,1	4,02	3,90	-3,0
3,0	169,2	169,9	+0,4	3,63	3,54	-2,4
2,5	161,0	162,4	+0,9	3,23	3,17	-1,8
2,0	149,0	151,2	+1,5	2,85	2,81	-1,2
1,5	131,5	134,4	+2,3	2,47	2,46	-0,6
1,0	105,1	108,4	+3,1	2,10	2,10	0,0

Es sei daran erinnert, dass die Lage der Fächer der einzelnen Zonen nicht verändert werden, wenn die Fahrgeschwindigkeit reduziert wird, sodass die Zonen in jedem Fall auf den Werten der höchsten Fahrgeschwindigkeit, im Beispiel 5,0 m/s, basieren. Aus Tabelle 7 ist ersichtlich, dass der mittlere Energiebedarf pro Stunde bei der energetischen ABC-Zonierung in jedem Fall unter der zeitlichen ABC-Zonierung liegt, die Differenz jedoch mit sinkender Fahrwerksgeschwindigkeit abnimmt. Die mittleren erzielbaren Durchsatzleistungen beider Zonierungsformen unterscheiden sich kaum. Auffällig ist jedoch, dass die ABC-Zonierung auf Basis des Energiebedarfs ab einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit, in diesem Fall ab 3,5 m/s, bzgl. des mittleren Durchsatzes ebenfalls Vorteile gegenüber der ABC-Zonierung auf zeitlicher Basis hat. Das beschriebene Verhalten kann auch für ein RBG mit RSE oder ebenso bei Doppelspielen beobachtet werden.

Da die Unterschiede zwischen den beiden Zonierungsarten noch relativ gering sind und noch keine allgemeine Aussage bzgl. des Verhaltens der Durchsatzleistungen und Energiebedarfe getroffen werden kann, wurde eine weitere Zonierung mit 1,5 m/s Hubgeschwindigkeit simuliert. Bei dieser Konfiguration verfügt die A-Zone über 1.080 Fächer, die B-Zone weist 1.044 Fächer auf und die C-Zone demzufolge 1.076 Fächer. Abbildung 15 zeigt die Fächerlage der A-Zone für eine ABC-Zonierung auf Basis der Zeit bzw. der Energie bei einer vorgegebenen Hubgeschwindigkeit von 1,5 m/s. Zu erkennen ist, dass der Unterschied der Fächerlagen zwischen der ABC-Zonierung auf Basis der Zeit und auf Basis des Energiebedarfs nun erheblich größer ist als bei den Zonierungen mit 4,0 m/s Hubgeschwindigkeit.

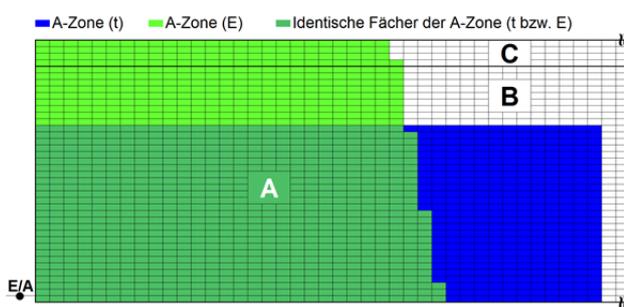


Abbildung 15. A-Zonen bei Zonierung auf zeitlicher bzw. energetischer Basis und 1,5 m/s Hubgeschwindigkeit

Die Ergebnisse der Simulationsexperimente stellt Abbildung 16 für unterschiedliche vorgegebene Fahrwerksgeschwindigkeiten dar. Die mittleren Durchsatzleistungen und die mittleren Energiebedarfe pro Stunde der ABC-Zonierung auf zeitlicher Basis werden bei abschließlicher Ausführung von Einzelspielen verglichen

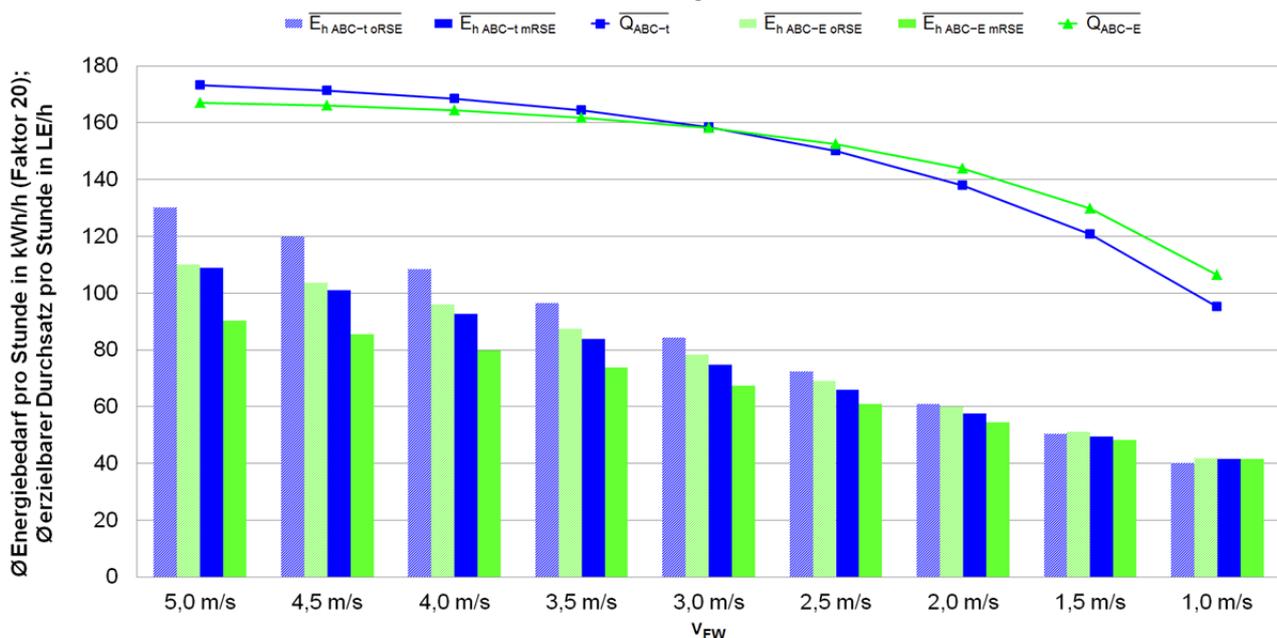


Abbildung 16. Mittlerer Energiebedarf pro Stunde eines Regalbediengerätes ohne und mit Rückspeiseeinheit und mittlerer erzielbarer Durchsatz pro Stunde einer ABC-Zonierung auf zeitlicher vs. energetischer Basis bei Einzelspielen

mit der ABC-Zonierung auf energetischer Basis. Die beschriebenen Effekte werden auch hier deutlich. Die energetische Zonierung weist bei jeder Fahrwerksgeschwindigkeit einen geringeren mittleren Energiebedarf pro Stunde auf. Bis zu einer Fahrwerksgeschwindigkeit von 3,0 m/s ist der mittlere erzielbare Durchsatz der ABC-Zonierung auf zeitlicher Basis höher als der Durchsatz der ABC-Zonierung auf energetischer Basis. Ab dieser Geschwindigkeit ist der mittlere erzielbare Durchsatz der energetischen ABC-Zonierung höher. Dies führt bei einem RBG ohne RSE sogar dazu, dass der mittlere Energiebedarf pro Stunde bei 1,5 m/s bzw. 1,0 m/s Fahrwerksgeschwindigkeit höher ist als bei der zeitlichen ABC-Zonierung. Dass die mittlere Durchsatzleistung pro Stunde ab einer bestimmten Geschwindigkeit, im gewählten Beispiel 2,5 m/s, bei der ABC-Zonierung auf energetischer Basis höher ist als bei der ABC-Zonierung auf zeitlicher Basis, liegt daran, dass die Zonen, wie bereits erwähnt, nicht an die Geschwindigkeiten angepasst werden und das RBG dementsprechend bei der energetischen ABC-Zonierung geringere mittlere Fahrwege (siehe Abbildung 15) zurücklegen muss.

Tabelle 8 enthält die prozentualen Änderungen der mittleren erzielbaren Durchsatzleistungen und mittleren Energiebedarfe pro Stunde der ABC-Zonierung auf Basis des Energiebedarfs im Vergleich zur ABC-Zonierung auf Basis der Zeit für die Zonierung bei einer Hubgeschwindigkeit von 1,5 m/s. Es wird deutlich, dass eine ABC-Zonierung auf Basis des Energiebedarfs zwar zu einer geringen Verringerung der mittleren erzielbaren Durchsatzleistung führen kann, aber der mittlere Energiebedarf pro Stunde erheblich sinkt. Beispielsweise verringert sich der mittlere Einzelspiel-Durchsatz bei 5,0 m/s Fahrwerksgeschwindigkeit um ca. 3,5 %, wenn anstatt der ABC-Zonierung

auf Basis der Zeit eine ABC-Zonierung auf Grundlage des Energiebedarfs angewendet wird. Der mittlere Energiebedarf pro Stunde sinkt jedoch bei einem RBG ohne RSE um ca. 15,4 % und bei einem RBG mit RSE um ca. 17,1 %. Der mittlere Energiebedarf pro Stunde kann ab einer bestimmten Geschwindigkeit bei der energetischen ABC-Zonierung über dem Energiebedarf der zeitlichen ABC-Zonierung liegen. Der Grund ist allerdings lediglich der höhere mittlere Durchsatz, denn der Energiebedarf pro Ladeinheit ist unter Anwendung der ABC-Zonierung auf energetischer Basis stets geringer als bei der ABC-Zonierung auf Grundlage der Zeit.

Tabelle 8. Änderungen der mittleren Durchsatzleistungen und mittleren Energiebedarfe pro Stunde zwischen energetischer und zeitlicher ABC-Zonierung für Einzel- und Doppelspiele

V _{FW} [m/s]	ES ABC-t vs. ABC-E			DS ABC-t vs. ABC-E		
	ΔQ [%]	ΔE _{oRSE} [%]	ΔE _{mRSE} [%]	ΔQ [%]	ΔE _{oRSE} [%]	ΔE _{mRSE} [%]
5,0	-3,5	-15,4	-17,1	-2,8	-12,4	-13,5
4,5	-3,1	-13,5	-15,5	-2,5	-11,0	-12,3
4,0	-2,4	-11,6	-13,8	-2,1	-9,4	-11,0
3,5	-1,5	-9,5	-11,9	-1,4	-7,6	-9,5
3,0	-0,2	-7,1	-9,9	-0,5	-5,8	-8,0
2,5	+1,7	-4,6	-7,7	+0,7	-3,7	-6,2
2,0	+4,4	-1,7	-5,3	+2,6	-1,5	-4,4
1,5	+7,7	+1,4	-2,7	+5,1	+0,9	-2,4
1,0	+12,0	+4,2	-0,3	+8,4	+3,4	-0,5

Werden die ABC-Zonierungen der unterschiedlichen Hubgeschwindigkeiten miteinander verglichen, kann festgestellt werden, dass sich die beschriebenen Effekte verstärken, je mehr sich die Fächerlagen der einzelnen Zonen zwischen der ABC-Zonierung auf Basis der Zeit von den Fächerlagen der energetischen ABC-Zonierung unterscheiden. Wie groß die Unterschiede bzgl. der mittleren erzielbaren Durchsatzleistungen und des mittleren Energiebedarfs pro Stunde sind, ist allerdings im Einzelfall zu überprüfen. Die Betreiber eines automatisierten Lagers mit RBG müssen dann entscheiden, ob die höhere Durchsatzleistung einer zeitlichen ABC-Zonierung zwingend notwendig ist oder ob sie einen leicht geringeren mittleren Durchsatz für eine relativ hohe Einsparung des mittleren Energiebedarfs pro Stunde bei einer ABC-Zonierung auf Grundlage des Energiebedarfs in Kauf nehmen.

8.2 DIE NIEDRIGSTE-ENERGIEBEDARFS-REGEL

Eine zweite überprüfte Strategie zur Reduzierung des Energiebedarfs eines automatisierten Regallagers, das mit RBGs betrieben wird, ist die Niedrigste-Energiebedarfs-Regel (NER). Sie wurde in Anlehnung an die Kürzeste-Fahrzeit-Regel (KFR) entwickelt. Kommt die KFR zum Einsatz, erfolgt die Einlagerung einer Ladeinheit (LE) in das Lagerfach, das mit der geringsten Bewegungs- bzw. Arbeitsspielzeit erreichbar ist. Die Strategie ist mit allen

anderen bisher gängigen Lagerbetriebsstrategien kombinierbar (vgl. [tHS10, S. 32]). Eine Kombination mit Lagerbetriebsstrategien, die auf dem Energiebedarf basieren, z. B. die energetische ABC-Zonierung, wäre jedoch nicht zielführend. Die NER dagegen ist mit solchen Strategien kompatibel. Bei der NER wird eine LE in das Lagerfach eingelagert, das mit dem niedrigsten Energiebedarf angefahren werden kann. Dabei wird die Entscheidung nicht nur auf Grundlage des Einlagerungsvorgangs sondern auch auf Grundlage des Auslagerungsvorgangs getroffen. Angenommen wird dabei, dass jeweils ein Einzelspiel ausgeführt wird.

Wird die NER direkt mit der KFR verglichen, ohne dass eine Kombination mit einer anderen Lagerbetriebsstrategie erfolgt, zeigen die Simulationsergebnisse keine Unterschiede, weil beide Strategien im Mittel auf die gleichen Lagerfächer zurückgreifen - ähnlich dem Vergleich der zeitlichen und energetischen ABC-Zonierung bei 4,0 m/s Hubgeschwindigkeit in Abschnitt 8.1 (vgl. Abbildung 13). Werden die NER bzw. KFR mit den entsprechenden ABC-Zonierungen kombiniert, werden die Unterschiede sichtbar. Abbildung 17 stellt die mittleren Durchsatzleistungen und mittleren Energiebedarfswerte pro Stunde der zeitlichen und energetischen ABC-Zonierung in Kombination mit der KFR bzw. NER bei einer Hubgeschwindigkeit von 1,5 m/s für die ausschließliche Ausführung von Doppelspielen gegenüber. Die Verläufe sind für Einzelspiele identisch.

Im Vergleich zu den ABC-Zonierungen ohne KFR bzw. NER ist der Verlauf der mittleren erzielbaren Durchsatzleistungen der Zonierungen mit KFR bzw. NER ähnlich. Der mittlere erzielbare Durchsatz der energetischen ABC-Zonierung mit NER übersteigt die Durchsatzleistung der zeitlichen ABC-Zonierung mit KFR allerdings erst bei 2,5 m/s Fahrgeschwindigkeit. Weiterhin liegt der mittlere Energiebedarf pro Stunde der ABC-Zonierung auf Grundlage des Energiebedarfs in Kombination mit der NER bei jeder Fahrgeschwindigkeit unter den Werten der zeitlichen ABC-Zonierung mit KFR. Das Verhalten bzgl. den mittleren erzielbaren Durchsatzleistungen und mittleren Energiebedarfen pro Stunde ähnelt daher den ABC-Zonierungen ohne KFR bzw. NER. (siehe Tabelle 9).

Werden die KFR bzw. NER zusätzlich zu einer ABC-Zonierung angewendet, werden die Unterschiede zwischen einer energetischen ABC-Zonierung und einer ABC-Zonierung auf Basis der Zeit noch deutlicher. Beispielsweise verringert sich bei 5,0 m/s Fahrwerks-geschwindigkeit und Einzelspielen die mittlere erzielbare Durchsatzleistung der energetischen ABC-Zonierung mit NER im Vergleich zur ABC-Zonierung auf Basis der Zeit in Kombination mit der KFR nur um ca. 4,8 %, während sich der mittlere Energiebedarf pro Stunde um ca. 18,7 % (ohne RSE) bzw. 20,1 % (mit RSE) reduziert.

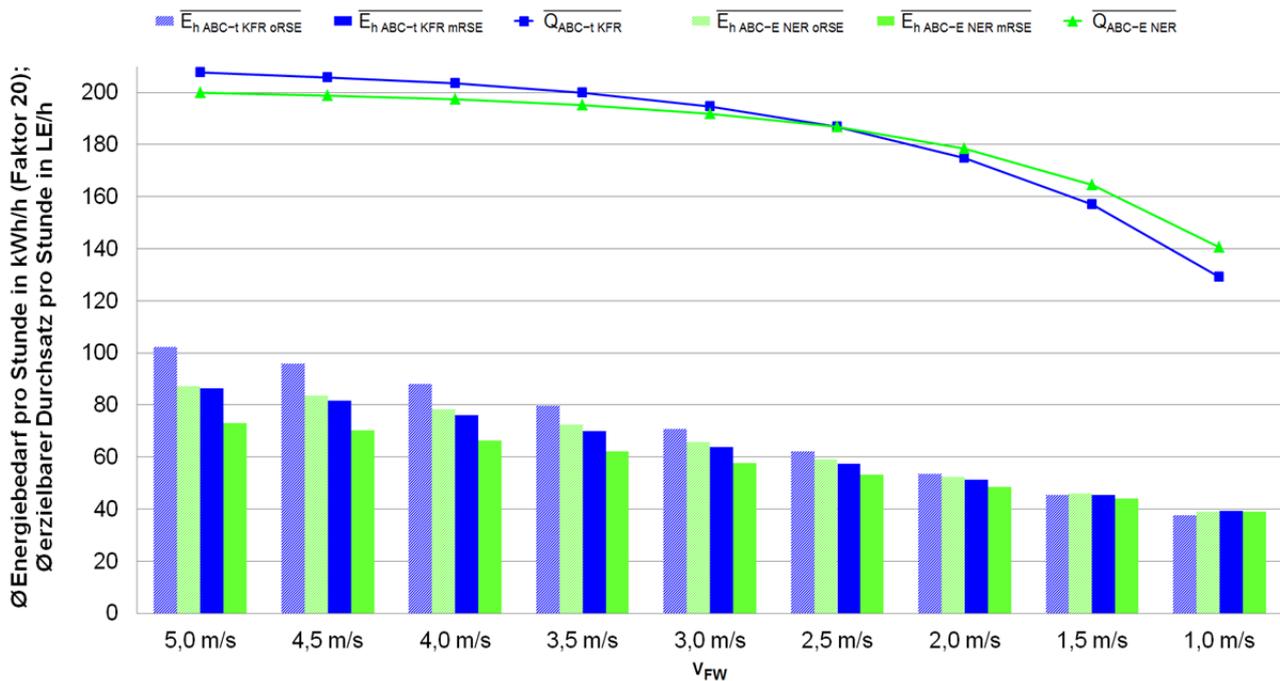


Abbildung 17. Mittlerer Energiebedarf pro Stunde eines Regalbediengerätes ohne und mit Rückspeiseeinheit und mittlerer erzielbarer Durchsatz pro Stunde einer ABC-Zonierung auf zeitlicher vs. energetischer Basis bei Einzelspielen

Klassischerweise wird die KFR eingesetzt, um die maximal erzielbare Durchsatzleistung eines automatischen Regallagers zu erhöhen. Die Wirkung der NER ist die gleiche. Durch Anwendung der KFR oder NER wird aufgrund der kürzeren mittleren Fahrwege gleichzeitig der mittlere Energiebedarf pro LE reduziert, wobei die NER in Kombination mit der energetischen ABC-Zonierung eine größere Reduzierung zur Folge hat als die KFR in Kombination mit der ABC-Zonierung auf Basis der Zeit (ca. 6-10 % NER; ca. 6-8 % KFR), andererseits aber geringere Auswirkungen auf die mittlere erzielbare Durchsatzleistung ausweist (ca. 1-2 % NER; ca. 2-3 % KFR).

Tabelle 9. Änderungen der mittleren Durchsatzleistungen und Energiebedarfe pro Stunde zwischen energetischer ABC-Zonierung mit NER-Regel und zeitlicher ABC-Zonierung mit Kürzester-Fahrzeit-Regel für Einzel- und Doppelspiele

V _{FW} [m/s]	ES ABC-t + KFR vs. ABC-E + NER			DS ABC-t + KFR vs. ABC-E + NER		
	ΔQ [%]	ΔE _{oRSE} [%]	ΔE _{mRSE} [%]	ΔQ [%]	ΔE _{oRSE} [%]	ΔE _{mRSE} [%]
5,0	-4,8	-18,7	-20,1	-3,8	-14,8	-15,5
4,5	-4,2	-16,1	-18,0	-3,4	-13,0	-14,2
4,0	-3,5	-13,7	-16,0	-3,0	-11,1	-12,7
3,5	-2,6	-11,1	-13,9	-2,3	-9,1	-11,1
3,0	-1,1	-8,4	-11,6	-1,4	-7,0	-9,4
2,5	+0,9	-5,4	-9,1	0,0	-4,7	-7,5
2,0	+3,8	-2,1	-6,4	-2,0	-2,0	-5,4
1,5	+7,6	+1,6	-3,3	+4,9	+0,9	-3,1
1,0	+12,8	+5,1	-0,3	+8,8	+3,8	-0,7

Kommt bei einer ABC-Zonierung auf Grundlage der Zeit bisher keine KFR zum Einsatz und soll auf eine energetische ABC-Zonierung umgestellt werden, wäre es auch möglich die leichte Reduzierung der mittleren erzielbaren Durchsatzleistung durch zusätzliche Anwendung der NER teilweise zu kompensieren.

8.3 ANPASSUNG DER FAHRWERKSGESCHWINDIGKEIT AN DIE HUBZEIT

Als Lagerbetriebsstrategie, die mit allen anderen Strategien kombinierbar ist und keine Verringerung der mittleren erzielbaren Durchsatzleistung zur Folge hat, wird für Einzelbewegungen des RBG eine Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an die Hubzeit vorgeschlagen. Ist die Hubzeit bei einer Einzelbewegung des RBG höher als die Fahrzeit, wird die Fahrwerksgeschwindigkeit so weit reduziert, dass Hub- und Fahrwerk gleichzeitig an den Zielkoordinaten ankommen (siehe Abbildung 18), wodurch die Arbeitsspielzeit nicht beeinflusst wird (vgl. [SMZ12b, S. 76 f.]).

Die Reduzierung des Energiebedarfs sowohl pro LE als auch pro Stunde ist umso kleiner, je geringer die vorgegebene Fahrgeschwindigkeit ist und umso höher je niedriger die vorgegebene Hubgeschwindigkeit ist. Da die Verringerung des Energiebedarfs weiterhin von der jeweiligen angewendeten Lagerbetriebsstrategie abhängig ist, soll an dieser Stelle keine detaillierte Betrachtung des Potentials dieser Lagerbetriebsstrategie erfolgen, sondern nur die möglichen Potentiale einzelner Konfigurationen aufgeführt werden. Wenn z. B. bei einer chaotischen Lagerung nur Einzelspiele gefahren werden, kann der Ener-

giebedarf sowohl pro LE als auch pro Stunde zwischen ca. 11 % (5,0 m/s Fahrgeschwindigkeit) und ca. 2 % (1,0 m/s Fahrgeschwindigkeit) reduziert werden, ohne dass die Durchsatzleistung beeinflusst wird. Wird stattdessen z. B. die ABC-Zonierung auf Basis der Zeit bei 1,5 m/s Hubgeschwindigkeit kombiniert mit der KFR und werden ausschließlich Doppelspiele ausgeführt, beträgt das Potential zur Reduzierung des Energiebedarfs dagegen nur zwischen ca. 4 % (5,0 m/s Fahrgeschwindigkeit) und ca. 0,5 % (1,0 m/s Fahrgeschwindigkeit).

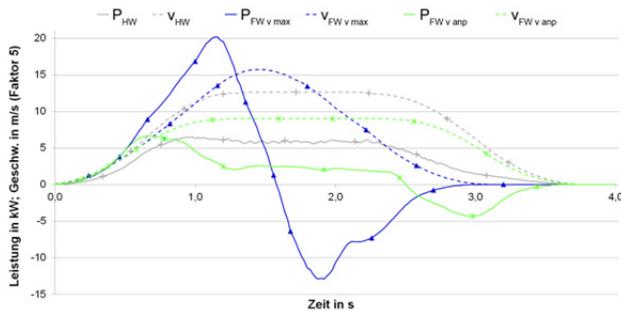


Abbildung 18. Geschwindigkeits- und Leistungsverläufe einer Bewegung des Regalbediengerätes mit und ohne Geschwindigkeitsanpassung an die Hubzeit (in Anlehnung an [SMZ12b, S. 77])

Der Energiebedarf eines RBG kann mit einer Anpassung der Fahrgeschwindigkeit an die Hubzeit unabhängig davon reduziert werden, ob das RBG über eine RSE verfügt oder nicht, denn es wird vorrangig der Energiebedarf des Fahrwerks reduziert ohne die Arbeitsspielzeit zu erhöhen. Somit hat eine Verringerung des mittleren Energiebedarfs pro LE einen proportionalen Einfluss auf den mittleren Energiebedarf pro Stunde.

8.4 ANPASSUNG DER FAHRWERKSGESCHWINDIGKEIT AN DIE GEFORDERTE DURCHSATZLEISTUNG

Für die bisher vorgestellten Lagerbetriebsstrategien wurde überprüft, welche Durchsatzleistungen bei einer bestimmten Parameterkonfiguration erreichbar sind. In den Simulationsläufen wurde das betrachtete System daher jeweils voll ausgelastet. In realen Anwendungen wird die maximale Durchsatzleistung aber nur selten benötigt. Daher wurde eine Lagerbetriebsstrategie definiert, bei der die Fahrgeschwindigkeit dem in der jeweiligen Stunde benötigten Durchsatz angepasst wird. Da die Durchsatzleistungen jeder betrachteten Lagerbetriebsstrategie für die verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten ermittelt wurden, kann eine Anpassung an den erforderlichen Durchsatz in Schritten von 0,5 m/s erfolgen.

Um die Potentiale einer Anpassung der Fahrgeschwindigkeit eines RBG an den jeweils in einer Stunde erforderlichen Durchsatz aufzeigen zu können, wurden fünf Szenarien definiert. In allen Szenarien wird von einem 24/7-Betrieb ausgegangen und das betrachtete AKL wird 14 Tage simuliert. Dabei werden nachts weniger

Ein- und Auslagerungen ausgeführt als tagsüber. Weiterhin wird angenommen, dass die Auftragslast auch am Wochenende geringer ausfällt als in der restlichen Woche. Im Szenario 1 wird davon ausgegangen, dass die in einer Stunde erforderliche Durchsatzleistung nicht geringer ist als 90 % der maximal vom System erzielbaren Durchsatzleistung, d. h. dies ist ein sehr hoch ausgelastetes Lager. Im zweiten Szenario sinkt die Durchsatzleistung nicht unter 80 % des Maximalwertes, sodass es sich um ein hoch ausgelastetes Lager handelt. Die erforderliche Durchsatzleistung sinkt im nächsten Szenario minimal auf 70 % des maximal erzielbaren Durchsatzes, sodass es sich in diesem Fall um ein mittelmäßig ausgelastetes Lager handelt. 60 % der maximal möglichen Durchsatzleistung pro Stunde werden im vierten Szenario nicht unterschritten. Damit wird ein eher gering ausgelastetes Lager abgebildet. Im letzten Szenario sinkt die erforderliche Durchsatzleistung im Minimum auf 50 % der maximal erzielbaren stündlichen Durchsatzleistung ab. Dieser Durchsatz sollte bei den meisten Lagerbetriebsstrategien mit der geringsten Fahrgeschwindigkeit bearbeitbar sein.

Da beim Vergleich der Energiebedarfe ohne und mit Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an die aktuell erforderliche Durchsatzleistung auch Stillstandzeiten entstehen können, ist es erforderlich, den Energiebedarf während dieser Zeit mit einzubeziehen (siehe Formel (15) und (16) in Abschnitt 7). Abbildung 19 zeigt den Verlauf des stündlichen Energiebedarfs und der Durchsatzleistungen für einen kompletten Simulationslauf des Szenarios 3 über 14 Tage (336 Stunden). Für den Vergleich der Strategie ohne Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit und mit Anpassung der Geschwindigkeit an die je Stunde erforderliche Durchsatzleistung wird die chaotische Lagerung zu Grunde gelegt und die Energiebedarfswerte für ein RBG ohne und mit RSE bestimmt.

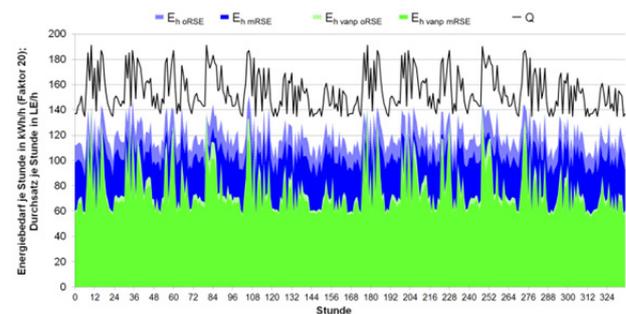


Abbildung 19. Durchsatzleistungen und Energiebedarfe je Stunde mit und ohne Geschwindigkeitsanpassung an die erforderliche Durchsatzleistung bei chaotischer Lagerung und Doppelspielen

Aus Abbildung 19 ist ersichtlich, dass der Energiebedarf mit Anpassung der Fahrgeschwindigkeit an die erforderliche Durchsatzleistung unter dem Energiebedarf ohne Anpassung der Fahrgeschwindigkeit an den Durchsatz liegt, solange die maximale Durchsatzleistung nicht benötigt wird. Somit kann nachgewiesen werden, dass es be-

zogen auf den Energiebedarf eines RBG besser ist, die Fahrgeschwindigkeit der erforderlichen Durchsatzleistung anzupassen, anstatt die maximale Fahrgeschwindigkeit beizubehalten und Stillstandzeiten zu verursachen. Durch die Anpassung der Fahrwerks-geschwindigkeit an die erforderliche Durchsatzleistung sinkt das Potential einer Energiebedarfssenkung des Einsatzes einer Rückspeiseeinheit (Differenz zwischen gestrichelten und nicht-gestrichelten Bereichen in Abbildung 19). Je ungünstiger das Verhältnis zwischen maximal erzielbarer und tatsächlich benötigter Durchsatzleistung ist, d. h. je geringer die Fahrgeschwindigkeit zur Erfüllung der Durchsatzleistung eingestellt werden kann, desto weniger Energie kann durch eine RSE im Vergleich zu einem RBG ohne RSE eingespart werden (siehe auch Abbildung 20).

Auf der anderen Seite kann der mittlere Energiebedarf pro Stunde umso mehr reduziert werden, je weiter die stündlich erforderliche Durchsatzleistung unter der maximal erzielbaren Durchsatzleistung liegt (siehe Abbildung 20). Weil der mittlere Energiebedarf pro LE zwischen den einzelnen Szenarien ohne Anpassung der Fahrgeschwindigkeit an die erforderliche Durchsatzleistung gleich ist, sinkt der mittlere Energiebedarf pro Stunde mit abnehmendem mittlerem Durchsatz. Wird die Fahrgeschwindigkeit der erforderlichen Durchsatzleistung angepasst, sinkt zusätzlich der mittlere Energiebedarf pro LE und der mittlere Energiebedarf pro Stunde reduziert sich umso mehr. Außerdem entstehen so weniger (im Optimalfall keine) Stillstandzeiten des RBG. Auf diese Weise kann z. B. im Szenario 1, das im Mittel eine verhältnismäßig hohe Durchsatzleistung erfordert, der mittlere Energiebedarf pro Stunde bei chaotischer Lagerung, Doppelspielen und einem RBG ohne RSE um ca. 17 % und mit RSE um ca. 15 % verringert werden. Szenario 5 erfordert dagegen

im Durchschnitt eine relativ geringe Durchsatzleistung. So steigen die Reduzierungspotentiale auf ca. 37 % für ein RBG ohne RSE und ca. 31 % für ein RBG mit RSE. 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 ABC-Zonierung auf Grundlage des Energiebedarfs 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.

9 FAZIT

In diesem Beitrag wurde ein parametrisches Berechnungsmodell zur Bestimmung des Leistungsbedarfs von RBG vorgestellt. Das Berechnungsmodell beruht zum einen auf der Nachbildung des dynamischen Bewegungsablaufs in einem 7-Phasen-Bewegungsmodell. Weiterhin wurde der Leistungsbedarf ab netzseitigem Anschluss in seinen einzelnen Komponenten detailliert aufgeschlüsselt. Das Berechnungsmodell beinhaltet neben der Fahrbewegung und deren Verlusten auch eine Komponente für den Grundbedarf durch Steuerung, Sensorik, Beleuchtung usw. sowie die Verluste im Frequenzumrichter. Das Modell wurde durch Messungen der Leistungsaufnahme an einem Versuchsgerät validiert. Der Wertevergleich konnte die Eignung des Modells anhand der guten strukturellen Übereinstimmung im Kurvenverlauf der Leistungsaufnahme bestätigen. Die Erweiterung des Modells um einen zusätzlichen Parameter ergab eine weitere Verbesserung der Modellwerte. Bleibende Wertedifferenzen in einzel-

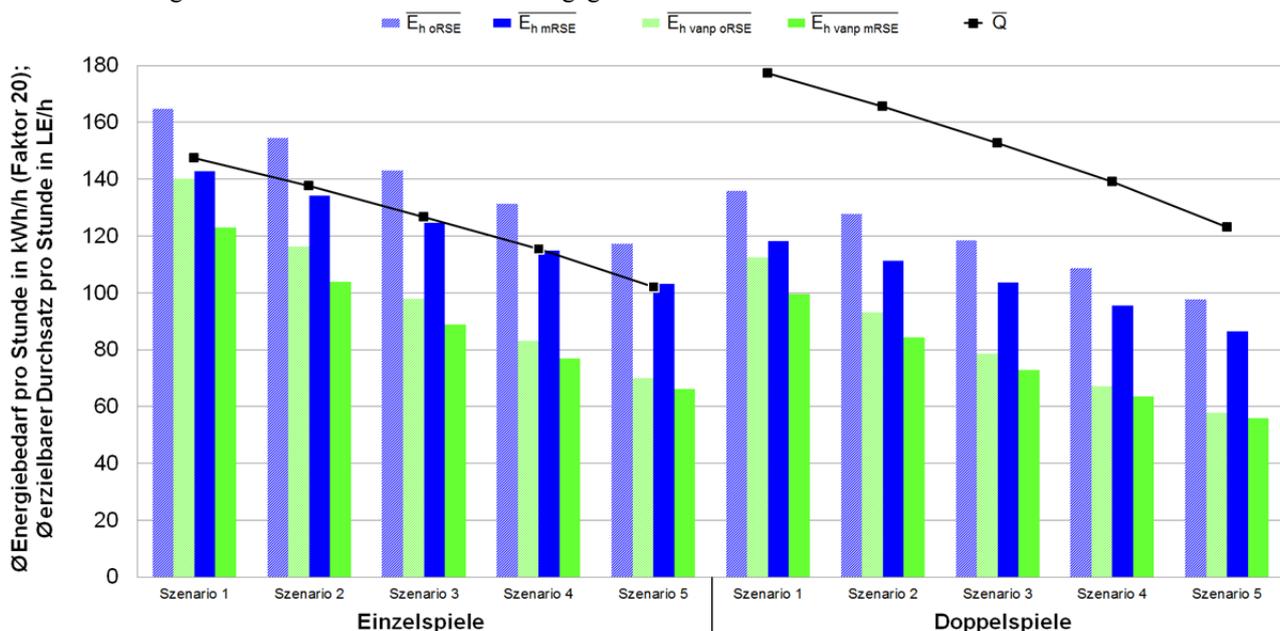


Abbildung 20. Mittlere Durchsatzleistungen und Energiebedarfe pro Stunde mit und ohne Geschwindigkeitsanpassung an die erforderliche Durchsatzleistung bei chaotischer Lagerung eines Regalbediengerätes ohne und mit Rückspeiseeinheit

nen Kurvenbereichen erforderten jedoch eine quantitative Anpassung der Modellparameter. Die Parameteranpassung erfolgte über die systematische Auswertung und Minimierung der Fehlermaße über alle Experimente. Als Fehlermaß diente der normierte quadratische Abstand zwischen Messwerten und Modellwerten. Über eine gleichzeitige Sensitivitätsanalyse gezielter Parameteränderungen wurde ein lokales Minimum im Fehlermaß erreicht. Im Ergebnis entstand ein Berechnungsmodell, welches für sämtliche Fahrten im betrachteten AKL den Leistungsverlauf des RBG mit hoher Übereinstimmung zu den Messwerten nachbilden und somit den Energiebedarf für ein beliebiges Lagerspiel berechnen kann. Es lieferte die Eingangsdaten für die anschließende Betrachtung der Lagerbetriebsstrategien unter energetischem Aspekt.

Es wurden vier Lagerbetriebsstrategien zur Reduzierung des Energiebedarfs eines RBG vorgestellt. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass alle vier Strategien den mittleren Energiebedarf pro Stunde reduzieren. Die ABC-Zonierung auf Basis des Energiebedarfs (und die Kombination mit der Niedrigsten-Energiebedarfs-Regel) gehen mit einer geringen Reduzierung des mittleren erzielbaren Durchsatzes im Vergleich zur ABC-Zonierung auf Grundlage der Zeit (und die Kombination mit der Kürzesten-Fahrzeit-Regel) einher. Der Betreiber eines automatischen Regallagers mit RBG muss daher im Einzelfall entscheiden, welche Strategie zum Einsatz kommen soll. Die dritte Strategie, die Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an die Hubzeit bei Einzelbewegungen, verursacht keine Verringerung des mittleren erzielbaren Durchsatzes. Gleichwohl besteht je nach eingesetzter Lagerbetriebsstrategie erhebliches Potential zur Reduzierung des mittleren Energiebedarfs eines RBG pro Stunde (in den Untersuchungen bis zu ca. 11 %). Das größte Potential wird jedoch in der Anpassung der Fahrwerksgeschwindigkeit an den erforderlichen Durchsatz je Stunde gesehen (bis zu 37 % in den Untersuchungen). Die Potentiale einer möglichen Energiebedarfsverringering sinken jedoch, je höher die mittlere Durchsatzauslastung eines automatischen Regallagers mit RBG ist und je optimierter die eingesetzte Lagerbetriebsstrategie bzgl. des Energiebedarfs bereits ist.

LITERATUR

- [BLS12] Braun, Meike; Linsel, Peter; Schönung, Frank und Furmans, Kai: Energiebetrachtung beim Lager- und Kommissioniervorgang. *Logistics Journal* 2012, Nr. 01 (11. Oktober 2012).
- [EG13] Ertl, Rainer; Günthner, Willibald A.: Energieeffiziente Bahnplanung von Regalbediengeräten - Zwischenkreis ermöglicht einen geringeren Gesamtverbrauch. In: Hebezeuge Fördermittel, Ausgabe 1-2/2013, S. 26-29, Verlag: Huss, Berlin, 2013, ISSN 0017-9442.
- [EM01] Erickson, Robert W.; Maksimovic, Dragan: *Fundamentals of Power Electronics*. Springer Science + Business, LCC, 2001.
- [Fis04] Fischer, Rolf: *Elektrische Maschinen*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004, ISBN 978-3-446-22693-7
- [Lun91] Lunze, Klaus: *Theorie der Wechselstromschaltungen*. Verlag Technik Berlin, 1991, ISBN 978-3-341-00984-0
- [Sch09] Schumacher, Meinhard: *Energiesparen mit System, ETZ Elektrotechnik + Automation Heft S2/2009*, VDE Verlag Berlin, S. 25-27.
- [Sch94] Scheffler, Martin: *Grundlagen der Fördertechnik - Elemente, Triebwerke*. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1994, ISBN 978-3-528-06558-3
- [SMZ12a] Schulz, Robert; Monecke, Jörg; Zadek, Hartmut: *Isoenergetische Fächer eines Automatischen Kleinteilelagers*. In: Wolf-Kluthausen, Hanne (Hrsg.): *Jahrbuch Logistik 2012*. S. 28-33, Verlag: free beratung GmbH, Korschenbroich, 2012, ISBN 978-3-9809412-8-0
- [SMZ12b] Schulz, Robert; Monecke, Jörg; Zadek, Hartmut: *Der Einfluss kinematischer Parameter auf den Energiebedarf eines Regalbediengerätes*. In: Zadek, Hartmut (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
- [SMZ13] Schulz, Robert; Mahrenholz, Karoline; Zadek, Hartmut: *Der Einfluss der Lagerbetriebsstrategie auf die Durchsatzleistung und den Energiebedarf von Regalbediengeräten*. In: Schenk, Michael (Hrsg.); Zadek, Hartmut (Hrsg.); Müller, Gerhard (Hrsg.); Richter, Klaus (Hrsg.); Seidel, Holger (Hrsg.): *18. Magdeburger Logistiktage - Sichere und Nachhaltige Logistik*. S. 171-180, Verlag: Fraunhofer, Stuttgart, 2013, ISSN 2196-7571

[tHS10] ten Hompel, Michael; Schmidt, Thorsten: Warehouse Management - Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen. Verlag: Springer, 4. Auflage, Berlin, Heidelberg, 2010, ISBN 978-3-642-03184-7

AUTOREN

Dipl.-Ing. Armin Siegel, M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Technische Logistik, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Technische Universität Dresden.

Armin Siegel studierte Mechatronik an der TU Dresden von 2003 bis 2009. Anschließend absolvierte er ein Masterstudium des Wirtschaftsingenieurwesens an der TU Dresden. Seit 2012 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Technische Logistik der TU Dresden. Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf dem Gebiet der Materialflusstechnik und innerbetrieblichen Logistik.

Adresse: Technische Universität Dresden, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Professur für Technische Logistik, 01062 Dresden,
Tel.: +49 (0)351/463-34176,
E-Mail: Armin.Siegel@tu-dresden.de

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Robert Schulz, M.Sc., Forschungsmitarbeiter am Lehrstuhl für Logistik, Institut für Logistik und Materialflusstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Robert Schulz wurde 1984 in Magdeburg geboren. Zwischen 2003 und 2009 studierte er an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OvGU) Wirtschaftsingenieurwesen Logistik. In den Jahren 2006 und 2007 studierte er Engineering Management am Rose-Hulman Institute of Technology in Terre Haute, Indiana, U.S.A. und schloss dieses Studium mit dem Master of Science ab. Seit 2009 ist er Forschungsmitarbeiter am Lehrstuhl für Logistik an der OvGU und forscht insbesondere in den Bereichen Nachhaltigkeit und Energieeffizienz in der (Intra-)Logistik.

Adresse: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik, Universitätsplatz 2, D-39106 Magdeburg
Tel.: +49 (0)391/67-18158, Fax: +49 (0)391/67-12646,
E-Mail: Robert.Schulz@ovgu.de

Dipl.-Ing. Karsten Turek, Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Technische Logistik, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Technische Universität Dresden.

Karsten Turek studierte Elektrotechnik an der TU Dresden von 1990 bis 1996. Seit 1997 ist er wissenschaftlicher

Mitarbeiter an der Professur für Technische Logistik der TU Dresden und bearbeitete hier zahlreiche Forschungsthemen. Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf dem Gebiet der Planung, Steuerung, Modellierung und Simulation von Materialflusssystemen.

Adresse: Technische Universität Dresden, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Professur für Technische Logistik, 01062 Dresden,
Tel.: +49 (0)351/463-32573,
E-Mail: Karsten.Turek@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt, Direktor des Instituts für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Inhaber der Professur für Technische Logistik an der Technischen Universität Dresden.

Professor Dr. Thorsten Schmidt führt seit 2008 die Professur für Technische Logistik an der Technischen Universität Dresden. Seine Tätigkeitsschwerpunkte liegen in der Entwicklung und Gestaltung innerbetrieblicher Produktions- und Logistiksysteme sowie der Entwicklung und Optimierung technischer Gewerke für die innerbetriebliche Materialfluss- und Handhabungstechnik. Aktuelle Forschungsthemen sind u. a. effiziente Steuerungsstrategien für den Materialfluss, Online-Materialflussanalyse, formale Verifikation von Steuerungslogik, Leistungsuntersuchungen dezentraler und selbstgesteuerter Systeme, Leichtbauansätze in der Bedientechnik und der Verschleiß von Zahnriemen.

Adresse: Technische Universität Dresden, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Professur für Technische Logistik, 01062 Dresden,
Tel.: +49 (0)351/463-32538,
E-Mail: Thorsten.Schmidt@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Zadek, Lehrstuhlleiter des Lehrstuhls für Logistik und Institutsleiter des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Hartmut Zadek wurde 1968 in Berlin geboren. 1987 bis 1993 studierte er Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Berlin und war dort von 1993 bis 1998 als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. 1999 schloss er seine Promotion zum Dr.-Ing. ab und wurde mit dem Konrad-Mellerowicz-Preis ausgezeichnet. Zwischen 1999 und 2007 war Hartmut Zadek im Projektmanagement der Beratungsunternehmen ZLU GmbH und der Visality Consulting GmbH, die von ihm mitbegründet wurde, tätig. Seit 2008 hat er den Lehrstuhl für Logistik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg inne.

Adresse: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik, Universitätsplatz 2, D-39106 Magdeburg,
Tel.: +49 (0)391/67-18604, Fax: +49 (0)391/67-12646,
E-Mail: Zadek@ovgu.de