

Entwicklung einer mehrkomponentigen Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten

Development of a multi-component evaluation method for the energy efficiency of rack feeders

Andreas Rücker
Johannes Fottner

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Fakultät für Maschinenwesen
Technische Universität München

Im folgenden Beitrag wird eine auf Basis von Messergebnissen und Simulationen entwickelte Methode vorgestellt, mit der sich die Energieeffizienz eines Regalbediengerätes charakterisieren lässt. Die Methode basiert auf einer Bewertung, die sich aus verschiedenen Komponenten zusammensetzt. Die Bewertung umfasst sowohl die einzelnen Funktionen eines Regalbediengeräts als auch seine gesamte logistische Leistung.

[Hochregallager, Regalbediengerät, Energieeffizienz, Bewertungsmethodik]

The following article presents a method developed on the basis of measurement results and simulations, which enables the rating of the energy efficiency of a rack feeder. The method is based on a rating that is composed of individual components. The assessment covers both the individual functions of an rack feeder and its overall logistical performance.

[High-bay warehouse, Rack feeder, Energy efficiency, rating method]

1 EINLEITUNG

Aktuelle Intralogistiksysteme weisen auf Grund der hohen Durchsatzleistungen und des hohen Automatisierungsgrades einen hohen Energieverbrauch auf. Gleichzeitig gibt es auf gesetzlicher Ebene und auch unternehmensseitig Bestrebungen den Energieverbrauch von intralogistischen Anlagen zu senken und dabei gleichzeitig deren Leistung zu steigern. Neben den gesetzlichen Anforderungen und Kundenforderungen steigt auch der Strompreis seit einigen Jahren kontinuierlich. Diese Rahmenbedingungen erfordern eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz (EE). Die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen (EEM) gestaltet sich im industriellen Umfeld jedoch oft schwierig. Um die Investitionskosten für die Umsetzung von EEM rechtfertigen zu können, muss

der Nutzen von EEM gegenüber den Kostenrechnungsabteilungen oder einem Kunden gut argumentiert werden. Eine mögliche Vorgehensweise für die kontinuierliche Umsetzung von EEM ist der in der Abbildung 1 dargestellte Umsetzungskreislauf für Verbesserungsmaßnahmen. Ausgehend von einer Beurteilung des Status Quo werden zuerst sinnvolle EEM identifiziert. Danach können diese umgesetzt und im Anschluss wieder bewertet werden. Nach einem gewissen Zeitraum kann eine erneute Bewertung erfolgen. Um den beschriebenen Kreislauf in Gang zu setzen ist aber zunächst eine fundierte und methodische Bewertung der Ausgangssituation erforderlich. Entsprechende Bewertungsmethodiken existieren aktuell jedoch noch nicht.

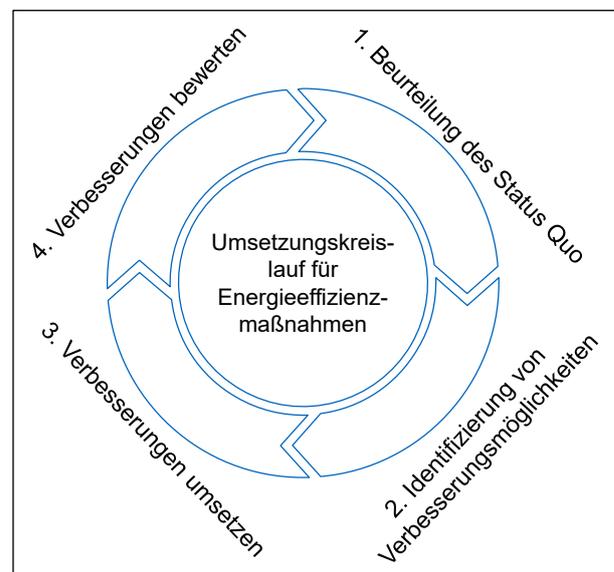


Abbildung 1. Umsetzungskreislauf für Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz

2 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Regalbediengeräte (RBG) sind in unterschiedlichsten Ausführungen im Einsatz und können grundsätzlich in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden. Die erste Hauptgruppe umfasst die automatischen Keinteilelager (AKL), in denen RBG mit üblicherweise kleinen Nutzlastlasten und hohen Bewegungsgeschwindigkeiten arbeiten. In der zweiten Hauptgruppe, den automatischen Palettenlagern (APL) mit üblicherweise größeren Regalhöhen und Regallängen, arbeiten RBG mit größerer Nutzlast und langsameren Bewegungsgeschwindigkeiten. Die Geräte aus den beiden Hauptgruppen sind trotz ihrer ähnlichen Gestalt in technischen Details stark unterschiedlich. Palettengeräte weisen auf Grund der höheren Nutzlast und der größeren Regalhöhen massivere Mastkonstruktionen auf. Zusätzlich werden die Hubwerke von Palettengeräten meistens als Seilhubwerk ausgeführt. Die Nutzlasten reichen von 25 kg im AKL-Bereich bis zu mehreren Tonnen im APL- und Schwerlastbereich. Es gibt viele verschiedene Lager- und Lastaufnahmemittelkonfigurationen die aktuell eingesetzt werden. Neben den grundlegenden Bauformunterschieden, wie Ein- oder Zweimastgeräte, mit einfach- oder mehrfachtiefen Lastaufnahmemitteln, sind auch auf der Antriebsseite verschiedene Konfigurationen, wie Reibrad- oder Riemenantriebe im Einsatz. Dementsprechend ist die gesamte technische Umsetzung dieser Geräte sehr vielfältig und eine Bewertung hinsichtlich ihrer EE komplex. Die Ausgangsproblematik dieser vielfältigen Bauformen und der sich daraus ergebenden großen Anzahl an Einflussgrößen auf den Energiebedarf sind bereits in [RF17] beschrieben worden. Die einzelnen Einflüsse auf den Energiebedarf eines RBG stehen mitunter in Wechselwirkung zueinander. Auf Grund dieser komplexen Zusammenhänge ist eine differenzierte Bewertung, die die einzelnen konstruktiven Aspekte gesondert berücksichtigt, nötig. Die Einflüsse auf den Energiebedarf lassen sich in die in Abbildung 2 dargestellten zwei Hauptgruppen, die physikalischen und die strategischen Einflüsse, mit insgesamt sechs Untergruppen gliedern. Die Bewertungsmethodik befasst sich hauptsächlich mit der Bewertung der physikalischen Einflüsse auf den Energiebedarf. Einzelne strategische Einflüsse wie die Fahrstrategie werden aber zusätzlich mitbewertet. Dementsprechend umfasst die Systemgrenze trotzdem hauptsächlich die Geräteebene. Diese Systemgrenze hat sich im Rahmen von Expertengesprächen und im Zuge der Untersuchungen als sinnvoll herausgestellt.

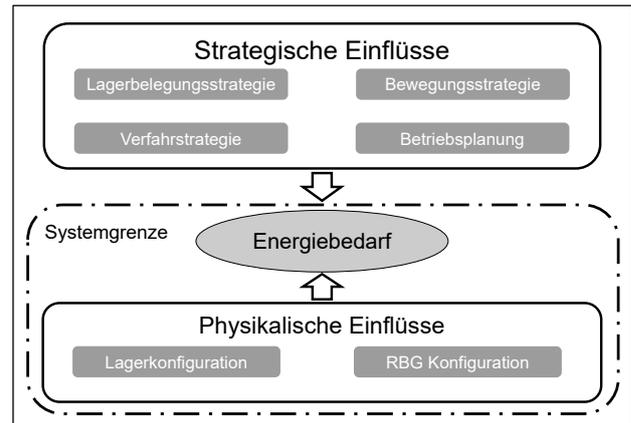


Abbildung 2. Einflussfelder des Energiebedarfs von Regalbediengeräten

Auf Geräteebene befinden sich bei einem RBG die Hauptantriebe für die Fahr- und Hubbewegung, das Lastaufnahmemittel und weitere Komponenten. Die in diesem Beitrag vorgestellte Bewertungsmethodik soll eine Bewertung der Komponenten des Systems RBG ermöglichen. Zusätzlich soll eine erste Möglichkeit gezeigt werden, mit der sich die Gesamtleistung des Systems RBG im AKL oder APL bewerten lässt.

3 STAND DER FORSCHUNG

Es existieren bereits vielfältige Untersuchungen zum Energiebedarf von RBG. *Schulz et al.* haben bereits 2012 in [SMZ12a] erste Ergebnisse zum Einfluss von kinematischen Parametern auf den Energiebedarf von RBG vorgestellt. Des Weiteren haben sie in [SMZ12b] die energetische Zonierung von Lagerfronten untersucht. Damit wurden erste Grundlagen zur methodischen Untersuchung des Energiebedarfs von RBG und automatischen Lagern auf Basis von Versuchen und Simulationsmodellen gelegt. *Meneghetti und Monti* haben in [MM11] und [MM13] ihre Untersuchungen zu energieeffizienten Steuerungsstrategien auf Basis von Simulationsstudien für RBG veröffentlicht. *Lerher et al.* haben 2013 in [LER13] einen ersten Ansatz zur Bestimmung der Energieeffizienz von AKL vorgestellt. In dieser Arbeit erfolgt eine Gegenüberstellung von Durchsatz und Energiebedarf. *Zadek et al.* haben sich in [ZSM14][Zad-2014] mit energieeffizienten Steuerungsstrategien für fördertechnische Systeme, insbesondere auch am Beispiel von RBG, befasst. *Braun* hat 2016 in ihrer Dissertation [Bra16] umfangreiche Untersuchungen zum Energiebedarf von RBG vorgestellt. In ihrer Arbeit werden diverse messtechnische Aspekte zur Bestimmung des Energiebedarfs beleuchtet. Parallel hat *Ertl* in seiner Dissertation [Ert16] ein umfangreiches Konzept zur simulativen Untersuchung von RBG erarbeitet. In seiner Arbeit wird auch ein Konzept zur Energieeffizienzbewertung und zur Bewertung der logistischen Leistung eines AKL vorgestellt. Diese Arbeit dient auch als Ausgangsbasis für die folgenden Untersuchungen und Betrachtungen.

Auf der konstruktiven Seite haben sich zuletzt *Zhakov et al.* in [ZSD16] mit dem Einsatz von Faserverbundwerkstoffen zur Schwingungsdämpfung in Regalbediengeräten befasst. Schwingungen an Regalbediengeräten sind ein entscheidender Faktor, da sie sowohl die Struktur belasten, als auch die Spielzeit vergrößern und damit den Durchsatz senken. Schwingungen im Mast können außerdem zu einem höheren Energiebedarf führen, da sich die Schwingung bis in das Antriebsmoment hinein fortsetzt und entsprechend durch die Regelung des Antriebs ausgeglichen werden muss.

Schadler et al. konnten in [SSH17] eine Methode vorstellen, mit der sich die EE unterschiedlicher automatischer Lagersysteme vergleichen lässt. Im Beitrag werden AKL, Shuttlelager und Karusselllager untersucht. Der Vergleich der Energieeffizienz erfolgt auf Basis eines Referenz-Doppelspiels. Das Referenz-Doppelspiel basiert auf dem Norm-Doppelspiel für die Durchsatzermittlung aus der [FEM9851]. Die Anwendung des Norm-Doppelspiels ist für die Bewertung der Energieeffizienz von sehr großem Vorteil, da dieses ja auch schon für die Abnahme der mittleren Spielzeit verwendet wird.

Die 2017 erschienene [FEM9865] stellt eine neue Methode vor, mit der sich der Energiebedarf unterschiedlicher Lösungen für eine Logistikaufgabe vergleichbar berechnen lässt. Dazu wird ein Referenzszenario definiert. In diesem Referenzszenario werden grundlegende Aufgaben und Materialströme des Logistiksystems definiert. Auf Basis dieses Szenarios kann dann der Energiebedarf für verschiedene Lösungen vergleichbar berechnet werden.

Damit existieren im Bereich Energiebedarf von RBG bereits vielfältige Ansätze und detaillierte Untersuchungen. Für die EE von RBG wurden auch bereits erste Ansätze veröffentlicht, diese sind aber noch nicht weit genug detailliert um sämtliche Aspekte, die zur vollständigen Bewertung eines RBG nötig sind, zu berücksichtigen.

4 BEWERTUNGSMETHODIK

In den nachfolgenden Abschnitten werden zuerst die technischen und physikalischen Grundlagen zur Bewertung der EE von RBG vorgestellt. Danach erfolgt eine Einführung der sogenannten Einzelkennzahlen, die daraufhin zusammengefasst werden. Abschließend wird die Bewertung der gesamten logistischen Leistung vorgestellt. Alle Bausteine gemeinsam stellen die gesamte Bewertungsmethodik dar.

4.1 GRUNDLAGEN

Die Grundlage zur Berechnung der EE der Komponenten ist ein auf Vergleichsenergiebedarfen basierendes Wirkungsgradkonzept. Wirkungsgrade bilden einen Vergleich zwischen Aufwand und Nutzen ab. Als Aufwand

wird für die Bewertung der EE der elektrische Energiebedarf verwendet. Der Nutzen wird im Rahmen des sogenannten mehrkomponentigen Konzepts für verschiedene Funktionen des RBG unterschiedlich definiert. Trotz der verschiedenen Ausführungen von RBG sind die Grundfunktionen, die RBG in Lagern erfüllen, bei allen Bauarten gleich. Es werden Güter in Horizontal- und Vertikalrichtung entlang der Lagerfront transportiert und quer zur Lagerfront ein- und ausgelagert. Abbildung 3 zeigt ein Schema eines RBG mit seinen Hauptverbrauchern. Gleichzeitig sind die drei Bewegungskordinaten im Lager dargestellt. Die x- und y- Richtung stehen für die Horizontal- und Vertikalbewegung parallel zur Lagerfront und die z- Richtung steht für die Ein- und Auslagerbewegung quer zur Lagerfront. Auf der Verbraucherseite sind die Hauptantriebe und die Verbraucher der Grundlast zu sehen.

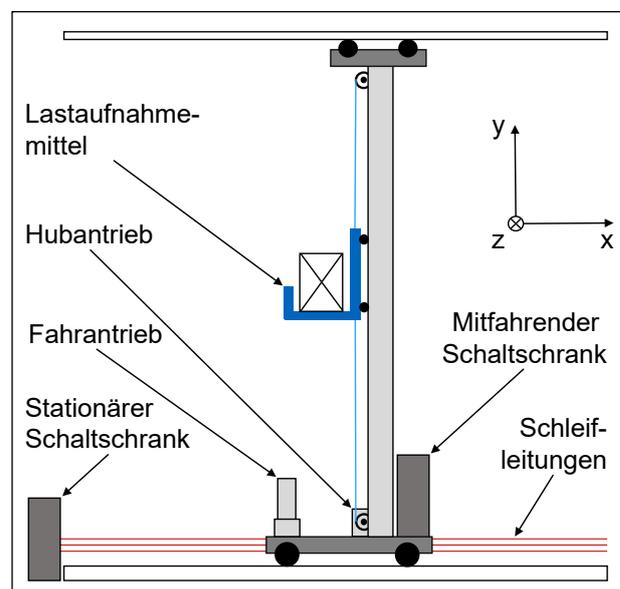


Abbildung 3. Schema der Hauptverbraucher an einem Regalbediengerät (vgl. [RF-2018])

Die Grundlast fällt hauptsächlich im stationären und im mitfahrenden Schaltschrank an. Diese beinhalten verschiedene elektrische Verbraucher, die in Abbildung 4 gezeigt werden. Die Grundlast trägt zu einem erheblichen Teil zum Gesamtverbrauch des Systems RBG bei und wird deswegen in einer eigenen Komponente der Bewertung berücksichtigt.

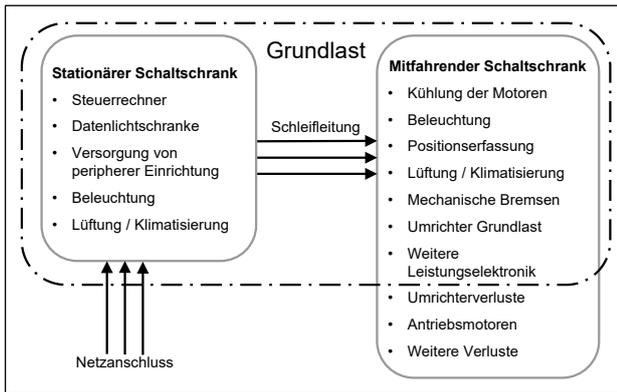


Abbildung 4. Grundlastverbraucher an einem Regalbediengerät (vgl. [RF18])

Die Berechnungsmodelle wurden auf Basis von Messungen an verschiedenen RBG entwickelt und verifiziert. Drei davon werden in diesem Beitrag adressiert:

- RBG 1
 - RBG im lehrstuhleigenem Forschungs-AKL
 - Zwischenkreiskopplung
 - Maximale Nutzlast 100 kg
 - Gassenlänge 21 m, Regalhöhe 7 m
- RBG 2
 - RBG in einem APL
 - Rückspeisung
 - Maximale Nutzlast 1000 kg
 - Gassenlänge 105 m, Regalhöhe 19 m
- RBG 3
 - RBG in einem AKL
 - Rückspeisung
 - Maximale Nutzlast 60 kg
 - Gassenlänge 76 m, Regalhöhe 12 m

4.2 BEWERTUNG DER HAUPTANTRIEBE

Die Bewertung des Fahr- und des Hubantriebes wurden in ihren Grundsätzen bereits in [RF18] vorgestellt. In diesem Beitrag wurde auch die Problematik von statistischen Einflüssen bei der Ermittlung des realen Energiebedarfs erläutert, weswegen hierauf nicht näher eingegangen wird. Zur Verifizierung der Wirkungsgradberechnungen wurden umfangreiche Messungen an RBG 1 durchgeführt und damit Wirkungsgradkennfelder der Antriebe bestimmt. Aufbauend auf den in [RF18] vorgestellten Grundlagen wird das Wirkungsgradkonzept im vorliegenden Beitrag erweitert und präzisiert. Die Bewertung der beiden

Hauptantriebe erfolgt mittels des Vergleichs des realen Energiebedarfs $E_{re,x}$, $E_{re,y}$ mit einem idealen Vergleichsenergiebedarf $E_{id,x}$, $E_{id,y}$. Um Effekte der Grundlast aus diesen Betrachtungen herauszuhalten, wird der Energiebedarf der Grundlast E_{GL} vom realen Energiebedarf abgezogen. Damit lassen sich die idealen Wirkungsgrade $\eta_{id,x}$, $\eta_{id,y}$ für die beiden Hauptantriebe nach folgenden Gleichungen berechnen:

$$\eta_{id,x} = \frac{E_{id,x}}{E_{re,x} - E_{GL}}$$

$$\eta_{id,y} = \frac{E_{id,y}}{E_{re,y} - E_{GL}}$$

Die Massen des RBG und seiner Komponenten werden wie folgt bezeichnet:

- m_{RBG} ... Masse des gesamten RBG
- m_{HS} ... Masse des Hubschlittens
- m_{NL} ... Nutzlastmasse

Für die Bewertung der Hauptantriebe wird die maximale Nutzlast verwendet, da diese ein Auslegungskriterium darstellt.

4.2.1 BEWERTUNG DES FAHRANTRIEBS

Die kinetische Energie dient als Vergleichsbedarf für den Fahrtrieb. Diese stellt das physikalische Minimum an aufzuwendender Energie für das Beschleunigen einer Last auf eine fixe Geschwindigkeit v_x dar

$$E_{id,x} = \frac{1}{2} \cdot (m_{RBG} + m_{NL}) \cdot v_x^2$$

Der Nachteil dieses Vergleichsbedarfs ist seine Unabhängigkeit von der zurückgelegten Strecke, weswegen für den Vergleich unterschiedlicher Geräte eine festgelegte Fahrstrecke verwendet werden muss. Die Fahrstrecke muss dabei so gewählt werden, dass das RBG seine volle Geschwindigkeit erreichen kann und dann nach einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit wieder auf $v_x = 0$ abbremsen kann. Es muss also eine volle siebenphasige Bewegung, eine sogenannte Normalfahrt, wie sie in Abbildung 5 dargestellt ist, durchlaufen werden können. Die Normalfahrt setzt sich aus den Komponenten Beschleunigung, Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit und anschließender Verzögerung zusammen. Die sieben Phasen beziehen sich auf die Ruckzustände auf die hier nicht näher eingegangen wird. Dieser Verlauf ist typisch für die heutigen frequenzgeregelten Antriebe von RBG.

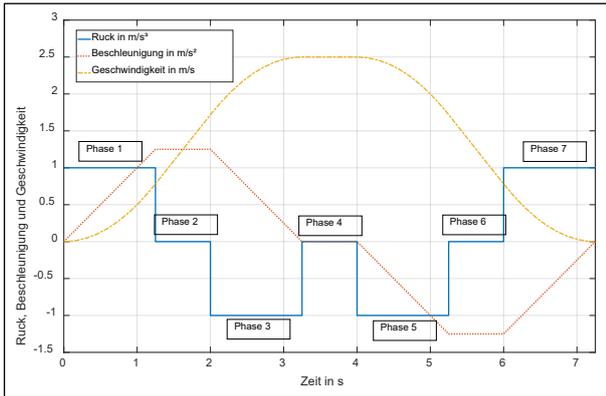


Abbildung 5. Verlauf der kinematischen Parameter eines RBG-Antriebs [RF18]

Um eine solche Bewegung sicherzustellen, kann als Anhaltswert für die Fahrstrecke s_x die halbe Lagerlänge L verwendet werden. Mit dieser Fahrstrecke wird in Lagern mit gängigen Abmessungen eine Normalfahrt ermöglicht. Damit ergibt sich die Fahrstrecke s_x zu:

$$s_x \approx \frac{1}{2} \cdot L$$

Die Fahrbewegung, die eine Last in diesem Fall durchführt, ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt.

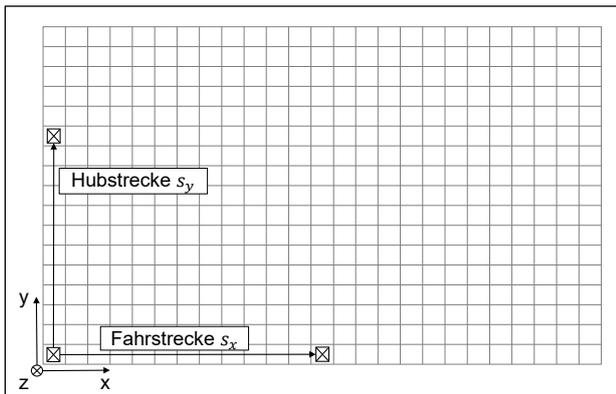


Abbildung 6. Fahrstrecke für die Bewertung des Fahr- und Hubantriebs

Mit der benötigten Fahrzeit t_x für die Strecke s_x lässt sich der ideale Fahrwirkungsgrad wie folgt berechnen:

$$\eta_{id,x} = \frac{(m_{RBG} + m_{NL}) \cdot v_x^2}{2 \cdot (E_{re,x} - P_{GL} \cdot t_x)}$$

4.2.2 BEWERTUNG DES HUBANTRIEBS

Die zwei Bewegungen des Hubantriebs müssen auf Grund der physikalischen Zusammenhänge in Hub- und Senkbewegung aufgeteilt werden. Bei der Hubbewegung wird die Effizienz des Hubantriebes und bei der Senkbewegung die Effizienz einer eventuell verbauten Rückspeisung bewertet. Bei der Hubbewegung wird potentielle Energie

aufgewendet, die sich mit der Erdbeschleunigung g und der Hubhöhe s_y wie folgt berechnen lässt

$$E_{id,+y} = (m_{HS} + m_{NL}) \cdot g \cdot s_y$$

Für die Hubbewegung lässt sich eine sinnvolle Teststrecke mit dem Regalwandfaktor a nach [FEM9851] abschätzen. Dieser setzt die Antriebsgeschwindigkeiten ins Verhältnis

$$a = \frac{v_x}{v_y} \cdot \frac{H}{L}$$

Um die Fahrzeiten bei Fahr- und Hubbewegung ähnlich zu gestalten, kann mit folgender Gleichung gearbeitet werden:

$$s_y = \frac{s_x}{a}$$

Dann ergibt sich für einen Regalwandfaktor von $a = 0,75$ die in Abbildung 6 dargestellte Hubstrecke von

$$s_y \approx \frac{2}{3} \cdot H$$

Der ideale Hubwirkungsgrad berechnet sich dann unter Einbeziehung der obigen Zusammenhänge und der Hubzeit t_{+y} nach folgender Gleichung:

$$\eta_{id,+y} = \frac{(m_{HS} + m_{NL}) \cdot g \cdot s_y}{E_{re,+y} - P_{GL} \cdot t_{+y}}$$

4.2.3 BEWERTUNG DER ANTRIEBSKOPPLUNG

Nachdem der Zwischenkreis bei einer reinen Bewertung des Senkvorgangs keine ausreichende Berücksichtigung findet, wird eine kombinierte Bewegung bei der Bewertung der Antriebskopplung untersucht. Dabei wird zugleich die in Abbildung 2 dargestellte Verfahstrategie bewertet. Die Verfahstrategie beinhaltet die zeitliche Kopplung der beiden Hauptantriebe. Um eine sinnvolle Bewertung zur Untersuchung der Kopplung zu erreichen, werden Horizontal- und Vertikalfahrt kombiniert und es wird der Vergleichsenergiebedarf für die beiden Einzelfahrten genutzt. Die kombinierte Bewegung ist schematisch in Abbildung 7 dargestellt.

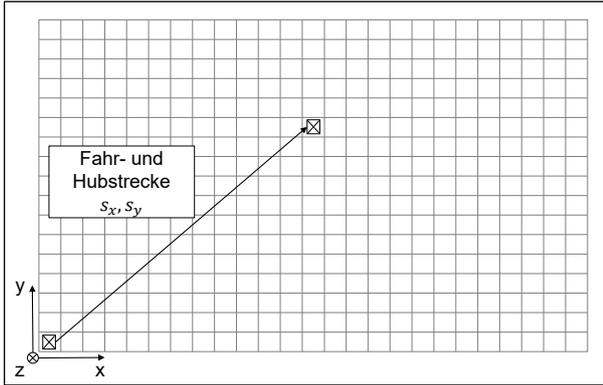


Abbildung 7. Fahrstrecke für die Bewertung der Antriebskopplung

Mit der Fahrzeit der kombinierten Bewegung t_{xy} berechnet sich der kombinierte Wirkungsgrad $\eta_{id,xy}$ mittels folgender Gleichung:

$$\eta_{id,xy} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (m_{RBG} + m_{NL}) \cdot v_x^2 + (m_{HS} + m_{NL}) \cdot g \cdot s_y}{E_{re,xy} - P_{GL} \cdot t_{xy}}$$

Auf die Bewertung der Antriebskopplung kann bei RBG mit Energierückspeisung verzichtet werden, weil der Energieverbrauch der gesamten Bewegung bewertet wird und man nicht unterscheiden kann, ob die Bremsenergie im Zwischenkreis genutzt, oder direkt rückgespeist wird. Damit verliert die Bewertung des Kopplungsaspekts ihre Bedeutung.

4.2.4 BEWERTUNG DER RÜCKSPEISUNG

Die Bewertung des Senkvorgangs dient der Bewertung der Nutzung der Bremsenergie beim Einsatz einer Energierückspeisung. Diese fällt bei Bremsvorgängen des Fahrertriebs und beim Absenken der Last an. Für die Nutzung dieser Energie stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Im Rahmen der Zwischenkreiskopplung kann diese Bremsenergie nur genutzt werden, wenn zeitgleich der jeweils andere Antrieb Energie verbraucht. Die Zwischenkreiskopplung wird bei der Bewertung der gekoppelten Bewegung bewertet. Bei einer Energierückspeisung kann die zurückgewonnene Energie in das Netz eingespeist werden und senkt damit aktiv den Energiebedarf. Die Vergleichsgröße ist damit die beim Senken maximal zurückgewinnbare potentielle Energie:

$$E_{id,-y} = (m_{HS} + m_{NL}) \cdot g \cdot s_y$$

Allerdings muss die Berechnung des Wirkungsgrades an dieser Stelle verändert werden, um damit sinnvolle Werte kleiner 1,0 zu berechnen. Die zurückgewonnene Energie $E_{re,-y}$ wird bei Messungen oft als negativer Wert ausgegeben und muss deswegen in Betrag gesetzt werden. Der Energiebedarf der Grundlast wird über die Rückspeisung zusätzlich aus der Bremsenergie gewonnen. Dieser

Energiebedarf taucht aber in einem gemessenen Energiebedarf nicht auf und muss deswegen hinzugerechnet werden. Sollte die zurückgewonnene Energie über ein Simulationsmodell ermittelt werden, ist dieser Umstand entsprechend zu berücksichtigen. Damit ergibt sich für den Rückspeisungswirkungsgrad $\eta_{id,-y}$ mit der Zeit für die Senkbewegung t_{-y} folgende Gleichung:

$$\eta_{id,-y} = \frac{|E_{re,-y}| + P_{GL} \cdot t_{-y}}{E_{id,y}}$$

Bei einem Gerät ohne Rückspeisung liegt dieser Wert nahe Null. Ein Teil der verbrauchten Energie im mitfahrenden Schaltschrank wird aber bei Senkbewegungen aus dem Zwischenkreis gedeckt, weshalb der Rückspeisungswirkungsgrad theoretisch nicht Null ist. Auf die Bewertung der Rückspeisung kann bei RBG mit Zwischenkreis trotzdem verzichtet werden, da der berechnete Wirkungsgrad keine sinnvolle Bedeutung hat. Bei Verwendung eines Energiespeichers am Gerät ist dessen Wirkungsgradbestimmung komplex. Eine Möglichkeit bestünde zum Beispiel darin, in zwei aufeinanderfolgenden Hub- und Senkbewegungen die eingesparte Menge an Energie im Verhältnis zur Ladung des Kondensators zu bewerten. Dies ist aber nur mit aufwändigen Messungen möglich. Deswegen wird auf eine Bewertung eines Superkondensators in diesem Baustein verzichtet und ein eventueller Einsatz wird bei der Bewertung der gesamten logistischen Leistung mitberücksichtigt.

4.3 BEWERTUNG DES LEICHTBAUS

Die Antriebsbewertung berücksichtigt noch keine Maßnahmen zur Reduktion der Masse. Die Bewertung der einzelnen Massen am Gerät findet in der Bewertung der logistischen Leistung statt. Sollen diese Aspekte noch zusätzlich zur Antriebsbewertung betrachtet werden, können die in [RF18] eingeführten Transportwirkungsgrade eingesetzt werden. Diese werden analog zu den idealen Wirkungsgraden berechnet, berücksichtigen aber nur noch die transportierte Nutzlastmasse. Für den Transportwirkungsgrad des Fahrertriebs ergibt sich damit folgender Zusammenhang:

$$\eta_{T,x} = \frac{m_{NL} \cdot v_x^2}{2 \cdot (E_{re,x} - P_{GL} \cdot t_x)}$$

Und analog gilt für den Hubantrieb:

$$\eta_{id,+y} = \frac{m_{NL} \cdot g \cdot s_y}{E_{re,+y} - P_{GL} \cdot t_{+y}}$$

Die Transportwirkungsgrade sind bei RBG auf Grund des schlechten Verhältnisses von Nutzlast zu Gesamtmasse relativ klein. So ergeben sich für den Transportwirkungsgrad des Fahrertriebs üblicherweise Werte im einstelligen Prozentbereich und für den des Hubantriebs Werte im niedrigen zweistelligen Prozentbereich.

4.4 BEWERTUNG DES LASTWECHSELS

Es gibt unterschiedliche Bauarten von Lastaufnahmemitteln (LAM) an RBG. Im AKL-Bereich werden ziehende und hebende LAM eingesetzt. Im APL-Bereich werden v. a. hebende LAM verwendet. Alle LAM erfüllen letztlich die gleiche Funktion, zumal sie für die Aufnahme oder Abgabe von Ladungsträgern wie Behälter oder Paletten zuständig sind. Im Rahmen der Untersuchungen wurden ein hebendes LAM für Behälter am RBG 1 und ein hebendes LAM für Paletten am RBG 2 vermessen. Am RBG 1 wurden einfach- und zweifachtiefe Ein- und Auslagervorgänge bei unterschiedlicher Nutzlast untersucht. Der mittlere Energieverbrauch $\bar{E}_{z,i}$ für einen Lastwechsel (Ein- oder Auslagervorgang) in Abhängigkeit der Nutzlast und Einlagertiefe ist in Abbildung 8 dargestellt. Für die Messung wurden pro Kombination aus Nutzlast und Einlagertiefe 40 Lastwechsel vermessen. Aus diesen 20 Ein- und 20 Auslagervorgängen wurden die Mittelwerte $\bar{E}_{z,i}$ gebildet.

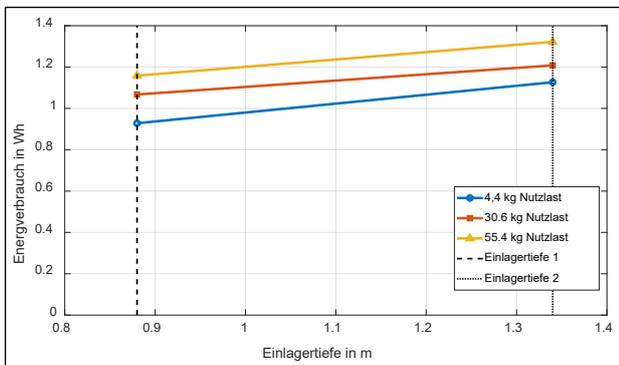


Abbildung 8. Energieverbrauch pro Lastwechsel bei unterschiedlicher Nutzlast und Einlagertiefe

Die gewählten Nutzlasten entsprechen der Fahrt mit leerem Behälter (4,4 kg Nutzlast), der maximalen Zuladung (55,4 kg Nutzlast) und einer Zwischenstufe (30,6 kg Nutzlast). Der Energieverbrauch ist bei diesem LAM nur schwach von Nutzlast und Einlagertiefe abhängig. Dies hängt mit dem verhältnismäßig hohen Gewicht des Schlittens im Vergleich zur Nutzlast zusammen. An der Bildung einer geeigneten Vergleichsgröße für den Energiebedarf eines LAM wird aktuell noch gearbeitet. Für einen einfachen Vergleich zwischen mehreren Geräten eignet sich ein Vorgehen wie es auch für die Grundlast Anwendung findet. Dabei wird ein Referenzwert für den mittleren Energiebedarf eines Lastwechsels $\bar{E}_{z,Ref}$ verwendet und der Lastwechselfaktor n_{LW} wie folgt berechnet:

$$n_{LW} = 1 - \frac{\bar{E}_z}{\bar{E}_{z,Ref}}$$

Dadurch dass ein LAM üblicherweise bei unterschiedlichen Nutzlasten und unterschiedlichen Einlagertiefen operiert, muss ein geeigneter Mittelwert für den durchschnittlichen Energiebedarf definiert werden. Dazu müssen

die Energiebedarfe von einzelnen Lastwechseln bei unterschiedlicher Nutzlast und Einlagertiefe mit der relativen Häufigkeit ihres Auftretens $h_{n,i}$ verknüpft werden:

$$\bar{E}_z = \sum_{i=1}^n \bar{E}_{z,i} \cdot h_{n,i}$$

Wenn keine Kenntnisse über das Lastkollektiv, die Einlagertiefen und die relativen Häufigkeiten ihres Auftretens vorliegen, kann als Annahme eine Gleichverteilung der verschiedenen Zustände angenommen werden. Jeder Zustand ist eine Kombination aus Nutzlast und Einlagertiefe. Damit ergeben sich für das vermessene LAM von RBG 1 mit den Werten aus Abbildung 8 insgesamt sechs Zustände ($N_z = 6$). Diese sechs Zustände stellen nicht alle möglichen Zustände des Lastaufnahmemittels dar. Sie bilden aber die minimale Zuladung und die maximale Zuladung ab. Der mittlere Energiebedarf bei Gleichverteilung ist dann nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$\bar{E}_z = \frac{1}{N_z} \cdot \sum_{i=1}^6 \bar{E}_{z,i}$$

Für das Beispiel ergibt sich ein Wert von $\bar{E}_z = 1,14 \text{ Wh}$ für den mittleren Energiebedarf eines Lastwechsels. Nachdem die Abhängigkeit des Energiebedarfs von Nutzlast und Einlagertiefe klein ist, stellt die Gleichverteilung eine vertretbare Näherung für die praktische Anwendung dar. Vereinfacht kann der Lastwechselfaktor auch für die maximale Zuladung bei der größten Einlagertiefe bestimmt werden.

4.5 BEWERTUNG DER GRUNDLAST

Nachdem sich in den Untersuchungen gezeigt hat, dass die Grundlast P_{GL} von RBG nicht mit Auslegungsaspekten wie der Nennleistung der Motoren oder der maximalen Zuladung skaliert, wird als Vergleichsgröße für die Grundlast ein fixer Leistungswert P_{Ref} verwendet. Dieser Referenzwert ist für einen Vergleich zwischen verschiedenen RBG zunächst beliebig wählbar, sollte aber größer als die maximal auftretende Grundlast sein. Somit ergeben sich Grundlastfaktoren kleiner als 1,0. Im Rahmen der Betrachtungen in dieser Arbeit wurde der Referenzwert $P_{Ref} = 1500 \text{ W}$ gewählt. Die Grundlast ist aber bei vielen Geräten nicht konstant. Gerade bei Geräten, die die meiste Zeit auf Aufträge warten und im Verhältnis zu ihrer Betriebszeit nur wenig in Bewegung sind, ist die Grundlast im Stillstand oft kleiner, weil die Lüftermotoren nicht laufen. Zusätzlich realisieren einzelne Hersteller bereits Abschalt-einrichtungen, die außerhalb der Betriebszeiten einen großen Teil der Verbraucher abschalten und das Gerät in einen Ruhemodus versetzen. Um solche Abschalt-einrichtungen berücksichtigen zu können, werden diese in unterschiedlichen Betriebszuständen abgebildet. Der Grundlastfaktor

$n_{GF,i}$ für einen Betriebszustand i mit der Grundlast $P_{GL,i}$ berechnet sich dann nach folgender Gleichung:

$$n_{GF,i} = 1 - \frac{P_{GL,i}}{P_{Ref}}$$

Als repräsentativer Zeitraum t_{ges} für den Betrieb eines Gerätes bietet sich der Zeitraum von einer Woche an, da hier auch das Wochenende, an dem viele Geräte stehen, mitberücksichtigt wird. Die einzelnen Betriebszustände sind dann jeweils einer Laufzeit t_i zugeordnet. Für den gesamten Grundlastfaktor $n_{GF,ges}$ wird eine zeitliche Mittelung verwendet, sodass sich der Grundlastfaktor wie folgt berechnet:

$$n_{GF,ges} = \sum_{i=1}^n \frac{n_{GF,i} \cdot t_i}{t_{ges}}$$

Um die Wichtigkeit der Grundlast für den gesamten Energieverbrauch eines RBG darzustellen, sind in Abbildung 9 die Ergebnisse einer Langzeitmessung eines untersuchten APL dargestellt. Wird die verbrauchte elektrische Leistung über den Zeitraum einer Woche gemittelt, dann ergibt sich eine mittlere Leistung von 1321 W, wohingegen die Grundlast $P_{GL} \approx 500$ W beträgt. Die Leistungsspitzenwerte liegen zwischen 20 und 30 kW. Bei diesem Gerät ist eine Energierückspeisung verbaut, die den mittleren Leistungsbedarf des Geräts zusätzlich senkt. Da die Energierückspeisung zusätzliche leistungselektronische Komponenten benötigt, wird durch ihren Einsatz die Grundlast erhöht. Somit werden in diesem Beispiel ca. 38% des gesamten Energieverbrauchs durch die Grundlast verursacht. Der 150 s Mittelwert der Leistungskurve hängt mit dem verwendeten Messgerät zusammen. Dieses ist, über den Messzeitraum von einer Woche, nur in der Lage alle 150 s einen Mittelwert, einen Minimal- und einen Maximalwert aufzuzeichnen.

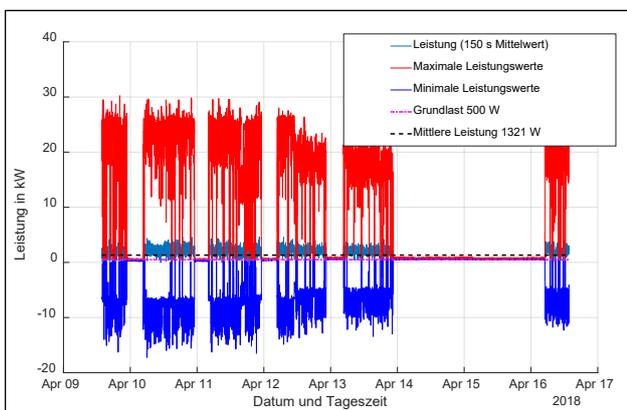


Abbildung 9. Langzeitmessung eines RBG in einem APL über den Zeitraum einer Woche

4.6 ZUSAMMENFASSUNG DER EINZELNEN KENNZAHLEN

Die aus den Messwerten ausgewerteten Kennzahlen für die drei Geräte werden in dem in Abbildung 10 gezeigten Spinnendiagramm dargestellt. Wie beschrieben, wurde der Rückspeisewirkungsgrad für RBG 1 nicht ausgewertet und zu 0 gesetzt. Die Kombinationsfaktoren von RBG 2 und RBG 3 wurden auf Grund der Rückspeisung nicht ausgewertet.

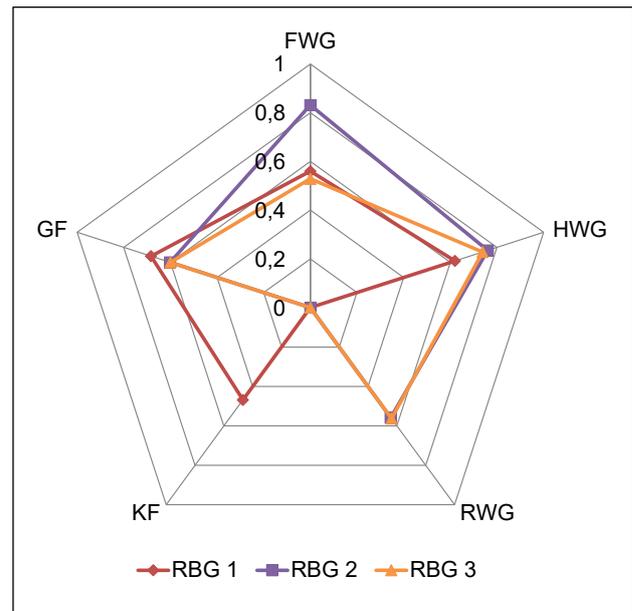


Abbildung 10. Zusammenfassung der Kennzahlen: idealer Fahrwirkungsgrad (FWG), idealer Hubwirkungsgrad (HWG), Rückspeisewirkungsgrad (RWG), Kombinationsfaktor (KF) und Grundlastfaktor (GF)

Die FWG von RBG 1 und 3 liegen bei ca. 55%, wohingegen der FWG von RBG 2 bei über 80% liegt. Das hängt mit der deutlich niedrigeren Dynamik des Gerätes zusammen. Kleinere maximale Beschleunigungen und Geschwindigkeiten senken den Energiebedarf. Gleichzeitig senken sie auch den Durchsatz, der aber in der reinen Antriebsbewertung keinen Eingang findet. Der Hubwirkungsgrad von RBG 2 und 3 liegt bei ca. 75%, der von RBG 1 nur bei 62%. Interessant ist zum Beispiel, dass der Rückspeisewirkungsgrad für RBG 2 und 3 nur bei in etwa 60 % liegt. Beim Senken treten auch Reibungsverluste auf, das heißt im Rückspeisewirkungsgrad ist nicht nur die Effizienz der leistungselektronischen Komponenten enthalten. Berücksichtigt man näherungsweise den Hubwirkungsgrad von ca. 75%, dann würden in etwa 80% der maximal rückgewinnbaren Energie auch tatsächlich zurückgewonnen werden. Der Grundlastfaktor liegt bei den drei Geräten im Bereich zwischen 60 und 70%. Ein Vergleich der drei Geräte ist auf Grund Ihrer stark unterschiedlichen Abmaße und Bauform nicht direkt sinnvoll. Die Zusammenstellung soll zeigen, dass die Kennzahlen einen solchen Vergleich trotzdem ermöglichen.

4.7 BEWERTUNG DER LOGISTISCHEN LEISTUNG

Die Bewertung der logistischen Leistung soll auf Basis eines standardisierten Testzyklus erfolgen. Die logistische Leistung stellt den Nutzen eines Regalbediengerätes bezogen auf seine Aufgabe im Lager dar. Dieser Zyklus soll auf Basis von einzelnen Fachanfahrten den mittleren Energiebedarf bei einer chaotischen Lagerplatzverteilung abbilden. Die Fachanfahrten, die dazu nötig sind, werden aktuell auf Basis eines Simulationsmodells untersucht. Dazu wird eine Monte Carlo Analyse des Energiebedarfs von zufällig generierten Fachanfahrten durchgeführt (im Bereich 10^7 Spiele). Diese Untersuchung wurde für verschiedene LAM- und Lagerkonfigurationen durchgeführt. Dabei wurde insbesondere der Einfluss von mehrfachtiefen Lagern und mehrfachtiefen LAM untersucht. Umlagervorgänge wurden nicht berücksichtigt. Bei mehrfachtiefen LAM und auch beim Einsatz von Doppel-LAM existiert neben Einzel- und Doppelspielen auch die Möglichkeit des Vierfachspiels. Abbildung 11 zeigt exemplarische Anfahrpositionen bei Einzel-, Doppel- und Vierfachspielen. Bei einem Vierfachspiel können verschiedenen Kombinationen von Ein- und Auslagerungen durchgeführt werden. Inwieweit der Einsatz solcher Vierfachspiele den mittleren Energiebedarf beeinflusst und ob die Berücksichtigung solcher Spiele für die Bildung einer Effizienzkenzahl nötig ist, wird aktuell noch untersucht.

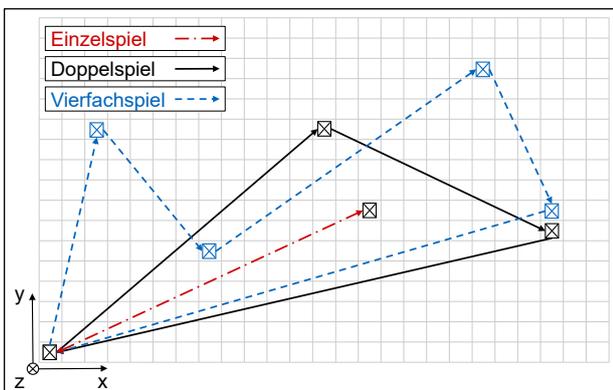


Abbildung 11. Exemplarisches Einzel-, Doppel- und Vierfachspiel

Die Untersuchungen werden mittels des eingangs beschriebenen Simulationsmodells durchgeführt. Dieses berechnet den Energiebedarf von Spielen mit zufällig generierten Fachpositionen. Der Energiebedarf aller Spiele wird gemittelt und dieser globale Mittelwert wird als Vergleichsgröße verwendet. Abschließend wird der Energiebedarf eines einzelnen Spiels mit dem globalen Mittelwert verglichen. Damit entstehen als Ergebnis der Simulation Häufigkeitsverteilungen von Ein- oder Auslagerpositionen über der Lagerfront. In Abbildung 12 ist ein exemplarisches Ergebnis der Einlagerfächer in einer Doppelspielsimulation mit einfachtiefem Lager und einfachtiefem LAM dargestellt. Das RBG ist mit einer Rückspeisung ausgestat-

tet und der Regalwandfaktor des untersuchten Lagers beträgt $a = 1,2$. Die Abbildung stellt die Lagerfront dar. Je dunkler der Bereich in der Abbildung, desto häufiger entspricht der Energiebedarf des gesamten Doppelspiels, mit dem gezeigten Einlagerfach, dem globalen Mittelwert in einem Intervall von $\pm 2,0\%$. Berücksichtigt man zusätzlich die Auslagerfächer der Spiele die den mittleren Energiebedarf am häufigsten getroffen haben, lassen sich repräsentative Spiele für den mittleren Energiebedarf finden. Auf diese Weise sollen einzelne Spiele identifiziert werden, die als Referenzspiele für den mittleren Energiebedarf dienen.

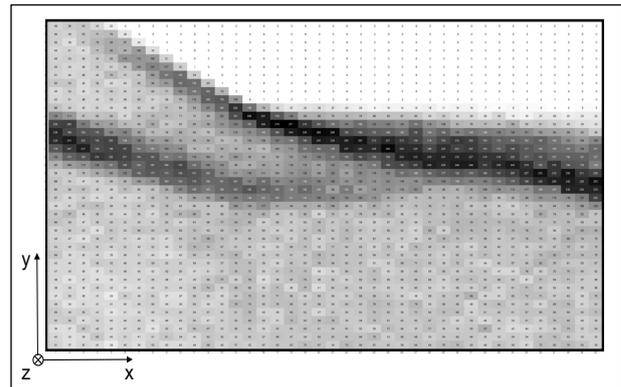


Abbildung 12. Exemplarisches Ergebnis für die Einlagerfächer bei einer Doppelspielsimulation

Wenn der Durchsatz und der zugehörige mittlere Energiebedarf des RBG bekannt sind, dann kann daraus eine Kennzahl zur Bewertung der logistischen Leistung gebildet werden. Um bei einem bekannten Lastkollektiv auch unterschiedliche Beladungszustände und damit Leistungszustände berücksichtigen zu können, wurde die Möglichkeit der Bildung einer Effizienzkenzahl nach [Ert16, S. 178ff] entsprechend um Häufigkeitsanteile erweitert. Die Effizienzkenzahl K_{EE} setzt grundsätzlich den Nutzen des RBG mit seinem mittleren Energiebedarf \bar{E}_i ins Verhältnis. Im Nutzen sind die transportierte Masse m_i , der Durchsatz \dot{n}_i und die Regalwandfläche A_{RW} enthalten. Dass diese Größen für einen Vergleich unterschiedlicher Geräte geeignet sind, ist in [Ert16, S. 178ff] bereits nachgewiesen worden. In der Berechnung findet der Durchsatz \dot{n}_i bei einer bestimmten Transportmasse m_i und dem zugehörigen mittleren Energiebedarf \bar{E}_i Eingang. Des Weiteren wird das Verhältnis der Einsatzdauer eines Beladungszustandes t_i zur Gesamtdauer T_{ges} berücksichtigt. Somit ergibt sich für die gesamte Energieeffizienz während der Betriebsphase:

$$K_{EE} = \frac{A_{RW}}{T_{ges}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\dot{n}_i \cdot m_i \cdot t_i}{\bar{E}_i}$$

Wenn die Effizienz nur mit der maximalen Nutzlast ermittelt werden soll, dann kann auf den Einsatz verschiedener Beladungszustände verzichtet werden. Mit diesem

Ansatz lässt sich die in der Zielsetzung beschriebene Gesamtleistung des Systems RBG im AKL oder APL bewerten.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wurden verschiedene Bewertungen für die einzelnen Antriebe und Verbraucher an einem RBG vorgestellt. Damit lassen sich in einem ersten Schritt die physikalischen Aspekte auf Geräteebene genauer bewerten. Zunächst wurden hierzu Details zur Bewertung der beiden Hauptantriebe eines RBG erläutert. Danach wurden Einzelheiten zur Bewertung des LAM und der Grundlastverbraucher eines RBG vorgestellt. Abschließend wurden die Einzelkennzahlen zusammengefasst und die Bewertung der logistischen Leistung vorgestellt. Die Einzelkennzahlen sind auch als Werkzeuge für die Forschung und Entwicklung zu verstehen, da sie Vergleiche zwischen verschiedenen Systemlösungen auf Geräteebene zulassen.

Für die Bewertung der logistischen Leistung werden die noch fehlenden Aspekte fertig ausgewertet und es wird versucht aus den Simulationsergebnissen Referenzzyklen für den repräsentativen Betrieb eines RBG zu entwickeln. Nachdem dieser Beitrag eine Möglichkeit zur Bewertung der physikalischen Einflüsse auf den Energiebedarf darstellt, sollen in der weiteren Forschungsarbeit der Einfluss der strategischen Einflussgrößen erforscht werden. Insbesondere die Lagerbelegungsstrategien haben einen großen Einfluss auf den erreichbaren Durchsatz bei einer gleichzeitigen Verringerung des mittleren Energiebedarfs. Besonders für Mehrfachtiefe Lager sollen zudem die Einflüsse auf Durchsatz und Energiebedarf, die durch Umlagerungen auftreten, untersucht werden.

Abschließend können auch Überlegungen angestellt werden, wie sich das hier vorgestellte Konzept auf andere Fördermittel der Intralogistik übertragen lässt. Hallen- und Portalkrane beispielsweise besitzen ähnliche Antriebskonfigurationen wie RBG und könnten analog zu diesen bewertet werden. Auch für Flurförderzeuge ist eine Bewertung in dieser Form denkbar, allerdings müssten die vorhandenen Komponenten dafür entsprechend überarbeitet und zusätzliche Komponenten entwickelt werden.

FÖRDERHINWEIS

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsprojekts „Entwicklung einer Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten. Gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (Forschungsvorhaben 18839N).

LITERATUR

- [Bra16] Braun, M.: Entwicklung, Analyse und Evaluation von Modellen zur Ermittlung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten. Dissertation. Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2016.
- [Ert16] Ertl, R.: Energiebedarfsermittlung und Energieeffizienzbewertung von Regalbediengeräten in automatischen Kleinteilelagern. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2016.
- [FEM9851] Federation Europeenne de la Maintenance: Leistungsnachweis für Regalbediengeräte - Spielzeiten. FEM Nr. 9851, 2003.
- [FEM9865] Federation Europeenne de la Maintenance: Energy consumption - determination methods (ECoDe-MISE). FEM Nr. 9865, 2017.
- [LER13] Lerher, T.; Edl, M.; Rosi, B.: Energy efficiency model for the mini-load automated storage and retrieval systems. In: *Advanced Manufacturing Technology* (2013)
- [MM11] Meneghetti, A.; Monti, L.: Energy Efficient Dual Command Cycles in Automated Storage and Retrieval Systems (2011)
- [MM13] Meneghetti, A.; Monti, L.: Sustainable storage assignment and dwell-point policies for automated storage and retrieval systems. In: *Production Planning & Control: The Management of Operations* (2013) Nr. Vol. 24, No. 6, S. 511–520.
- [RF17] Rücker, A.; Fottner, J.: Energiebedarf und Nutzen – Bewertungsmethodik für die Klassifizierung von Regalbediengeräten. In: *HF Hebezeuge und Fördermittel* (2017) Nr. 4, S. 48–50.
- [RF18] Rücker, A.; Fottner, J.: Bestimmung spezifischer Wirkungsgrade von Hub- und Fahrtrieb eines Regalbediengerätes. In: Schmidt, T. (Hrsg.): *26. Kranfachtung*. TU Dresden, 2018, S. 43–60.
- [SMZ12a] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Der Einfluss kinematischer Parameter auf

den Energiebedarf eines Regalbediengerätes. In: logistics journal (2012)

- [SMZ12b] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Isoenergetic Shelves of Automatic Small Parts Warehouses. In: logistics journal (2012)
- [SSH17] Schadler, M.; Stöhr, T.; Hafner, N.: Energy efficiency benchmarking concept for diverse automated storage and retrieval systems. In: Zrnic, N.; Bosnjak, S.; Kartnig, G. (Hrsg.): XXII International Conference on "Material Handling, Constructions and Logistics" - MHCL 2017, 2017, S. 133–138.
- [ZSM14] Zadek, H.; Schulz, R.; Monecke, J.: Eff Lager - Energieeffiziente Lagerstrategien und Lastverteilung – Schlussbericht zum IGF Vorhaben. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2014.
- [ZSD16] Zhakov, A.; Schmidt, T.; Dannemann, M.; Modler, N.: Einsatz faser- bzw. textilverstärkter Verbundwerkstoffe zur Schwingungsdämpfung bei Hubmasten von Regalbediengeräten, 2016.

Andreas Rücker, M.Sc., Research Assistant at the Chair for Materials Handling Material Flow Logistics at the Technical University of Munich.

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner, Professor and head of the Chair of Materials Handling Material Flow Logistics, Technical University of Munich.

Address: Technische Universität München, Lehrstuhl fml, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, Germany, Phone: +49 289 15919, Fax: +49 289 15922, E-Mail: andreas.ruecker@tum.de