

## **Bestimmung spezifischer Wirkungsgrade von Hub- und Fahrtrieb eines Regalbediengerätes**

Andreas Rücker, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Technische Universität München

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

*In diesem Beitrag wird eine Methode zur Bestimmung von Antriebs- und Transportwirkungsgraden von Hub- und Fahrtrieb eines Regalbediengerätes vorgestellt. Diese Methode basiert auf dem Vergleich des realen Energiebedarfs eines Antriebs mit einem berechneten idealen Energiebedarf. Durch die Quantifizierung des Wirkungsgrades eines Antriebes ist es möglich Verbesserungspotentiale aufzudecken, diese zu nutzen und damit die Energieeffizienz des Antriebes zu erhöhen.*

### **1 Einleitung**

Der Trend zur Steigerung der Energieeffizienz wird durch verschiedene äußere Umstände, wie gesetzliche Regelungen und steigende Energiekosten im Bereich der Intralogistik (innerbetriebliche Logistik) immer wichtiger. Ein wichtiger Bestandteil von Intralogistiksystemen sind die Hochregallager (HRL). HRL sind in den meisten Distributions- und Logistikzentren verbaut. HRL mit Regalbediengeräten stellen einen wichtigen Anteil in der Gruppe der automatisch bedienten HRL dar. Regalbediengeräte (RBG) sind nach der FEM 9.101 [FEM-9101] als gleisgebundene Flurförderzeuge, die in automatischen Hochregallagern für die Ein- und Auslagerung von Waren zuständig sind, definiert. Dabei müssen sie auch die Tätigkeiten des Lasthebens und des Lastbewegens ausführen. Dieser Beitrag zielt auf die Verbesserung der Energieeffizienz (EE) der Antriebe eines RBG durch die Entwicklung einer Berechnungsvorschrift zur Quantifizierung ihrer bisherigen EE ab. Mit dieser kann, an Stelle der Bewertung einzelner Komponenten, die EE eines kompletten Antriebes bewertet werden. Im kompletten Antrieb sind in dieser Betrachtung der Motor samt Umrichter, Getriebe und alle weiteren Antriebskomponenten, die für die Bewegung in einer Richtung notwendig sind, enthalten. Durch die Quantifizierung der EE ist es möglich, unterschiedliche RBG miteinander zu vergleichen. Der Berechnungsansatz ermöglicht eine Wirkungsgradbestimmung über einen Vergleich des tatsächlich gemessenen oder berechneten Energiebedarfs mit einem als ideal angesehenen theoretischen Bedarf. Dieser ideale Bedarf basiert auf der rein physikalischen Berechnung der potentiellen und kinetischen Energie. Dieses Konzept wird mit Messungen und Auswertungen an zwei Geräten angewandt.

### **2 Stand der Forschung**

Die Berechnung der Effizienz über den klassischen Ansatz eines Vergleichs von Nutzen und Aufwand findet auch bei RBG ihre Anwendung. Für den Fall der EE muss der elektrische Energiebedarf einem Nutzen gegenübergestellt werden. Bis jetzt existieren nur wenige Ansätze, um die EE eines RBG zu quantifizieren. Ein erster Ansatz wurde von *Lerher* [Ler-2013]

entwickelt. Darin wird zur Berechnung der EE der Durchsatz als Nutzen eines RBG verwendet. *Ertl* hat in [Ert-2013; Ert-2014] ein erweitertes Konzept zur Berechnung der EE eines automatischen Kleinteilelagers vorgestellt. In seiner Arbeit werden neben dem Durchsatz, auch die Lagergröße und die bewegte Nutzlast zur Berechnung des Nutzens verwendet. Des Weiteren haben *Schadler et al.* [Sch-2017] ein neues Konzept vorgestellt, das es auch erlaubt die EE von RBG mit Shuttle- und Karusselllagern zu vergleichen. Die vorhandenen Konzepte betrachten jeweils ein komplettes RBG. Das im Beitrag entwickelte Konzept setzt eine Systemebene tiefer, bei den einzelnen Antrieben an. Untersuchungen des Energiebedarfs von RBG mit Hilfe von Messungen sind auch von *Schulz* [Sch-2012] durchgeführt worden. Im Rahmen seiner Arbeit sind Messreihen mit der Variation kinematischer Parameter entstanden. *Braun* hat in ihrer Arbeit [Bra-2016] Simulationsmodelle für den Energiebedarf eines RBG entwickelt und deren Validierung bearbeitet. Zusätzlich ist die Berechnung des Energiebedarfs mit Hilfe von analytischen Berechnung in der neuen FEM 9.865 [FEM-9865] beschrieben. Zusätzlich wurde von *Ertl* in [Ert-2016] eine Methode zur Bestimmung des mittleren Energiebedarfs eines RBG mit Hilfe empirischer Gleichungen vorgestellt. Die Bestimmung der EE der einzelnen Antriebe eines Regalbediengerätes mit Hilfe von Messungen und theoretischen Berechnungsansätzen ist in dieser Form noch nicht bearbeitet worden.

### 3 Theoretische Grundlagen

Man kann RBG hinsichtlich ihrer Nutzlast in zwei Gerätetypen einteilen. Einerseits die Geräte für automatische Kleinteilelager (AKL) und andererseits die Geräte für Palettenhochregallager bzw. Hochregallager für Sonderladungsträger. AKL-RBG transportieren Nutzlasten bis 300kg, während Paletten-RBG für Nutzlasten bis zu mehreren Tonnen ausgelegt werden. Im Rahmen der Untersuchung wurden ein AKL-RBG und ein Paletten-RBG untersucht. An jedem RBG sind zwei Hauptantriebe – Hub- und Fahrtrieb verbaut. Zusätzlich zum Energiebedarf dieser Antriebe leistet auch die Grundlast des Gerätes einen Beitrag zum Energiebedarf eines RBG. Um den Wirkungsgrad dieser Antriebe zu bestimmen, wurden die Kinematik und der Energiebedarf der Antriebe im Betrieb untersucht. Der schematische Aufbau und die Bestandteile eines RBG mit einem Mast sind in Bild 1 dargestellt. Auf die Details der Kraftübertragung bei Fahr- und Hubtrieb wird in dieser Darstellung nicht eingegangen. Die beiden in dieser Arbeit untersuchten Geräte sind RBG mit einem einfachen Mast und entsprechen in ihrem Aufbau dem gezeigten Schema.

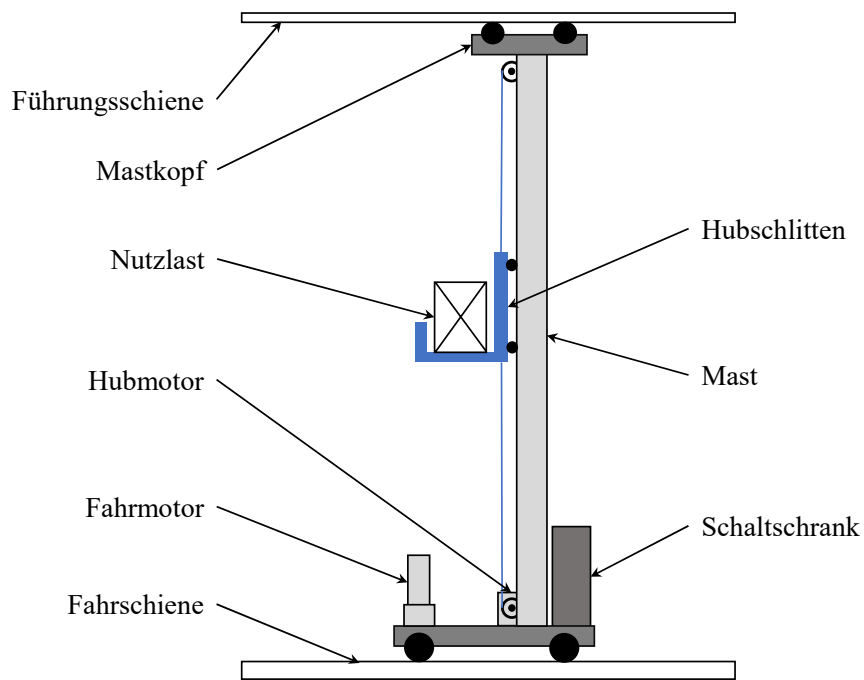


Bild 1 Aufbau und Komponenten eines Ein-Mast-Regalbediengerätes

Die Verläufe der kinematischen Parameter der beiden Antriebe werden jeweils durch eine siebenphasige Bewegung repräsentiert. Die sieben Phasen entsprechen den Zuständen des Rucks am Gerät, wobei der Ruck hier als die Ableitung der Beschleunigung zu verstehen ist. In Bild 2 ist der Verlauf von Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit bei einer Siebenphasen-Bewegung dargestellt. Es wird dabei eine Strecke von 10 m, mit einer maximalen Geschwindigkeit von 2,5 m/s, einer maximalen Beschleunigung von 1,25 m/s<sup>2</sup> und einem maximalen Ruck von 1,0 m/s<sup>3</sup> zurückgelegt.

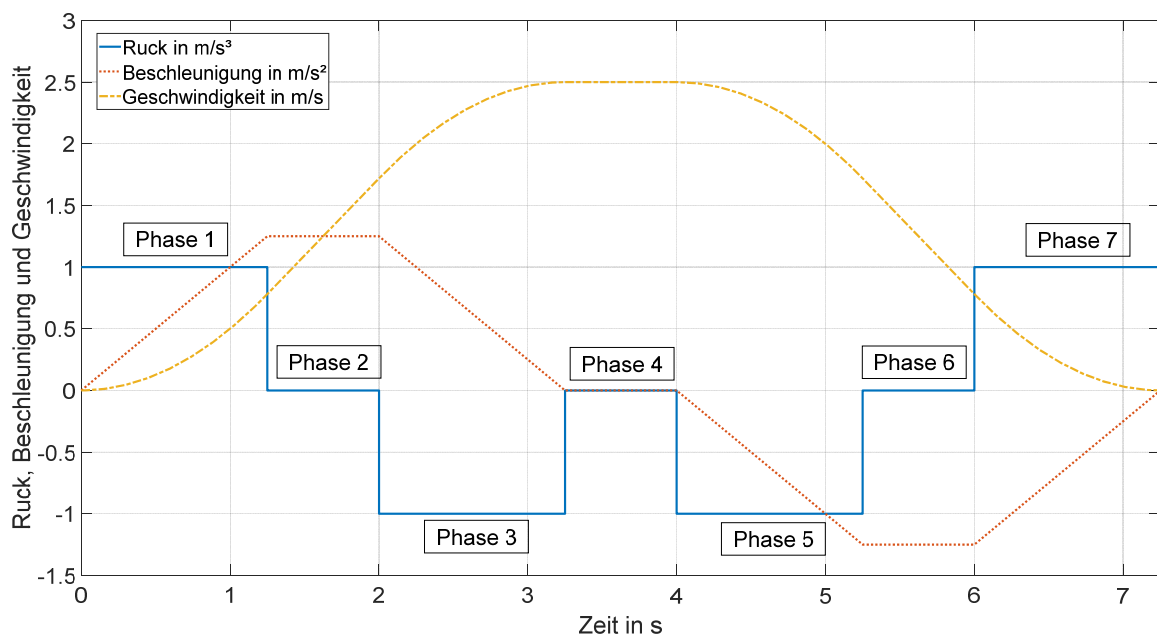


Bild 2 Verlauf der kinematischen Parameter bei einer Normalfahrt

Die Werte für Beschleunigung und Verzögerung sind gleich groß. Die Phasen auf die Beschleunigung bezogen lauten:

1. Konstant zunehmende Beschleunigung
2. Konstante Beschleunigung
3. Konstant abnehmende Beschleunigung
4. Keine Beschleunigung
5. Konstant zunehmende Verzögerung
6. Konstante Verzögerung
7. Konstant abnehmende Verzögerung

Diese Verläufe gelten analog für die Fahr- und Hubantriebe verschiedener RBG. Es ändern sich einzig die kinematischen Parameter. Für die Berechnung des Vergleichsenergiebedarfs ist die maximale Geschwindigkeit relevant.

Der Energiebedarf eines RBG hängt von sehr vielen Faktoren, die mitunter auch in Wechselwirkung stehen, ab. Generell kann man zwischen den physikalischen und den strategischen Einflussgrößen unterscheiden. Zu den strategischen Einflussgrößen zählen unter anderem die Lagerbelegungsstrategie, die Verfahstrategie und die Betriebsplanung im HRL. Ein Großteil der strategischen Einflussgrößen findet bei der detaillierten Untersuchung von Hub- und Fahrtrieb keinen Eingang, da sie sich hauptsächlich auf den Realbetrieb eines Gerätes auswirken. Die in der Arbeit verwendete Wirkungsgradbetrachtung ist also hauptsächlich für die physikalischen Einflussgrößen hilfreich. In Voruntersuchungen wurden die wichtigsten Einflussgrößen auf den Energiebedarf der einzelnen Antriebe herausgearbeitet. Für die Fahrbewegung wurden:

- Gesamtmasse des Gerätes
- Nutzlast
- Fahrgeschwindigkeit
- Fahrstrecke
- Einzelwirkungsgrade der elektrischen und mechanischen Komponenten
- Nutzung der Bremsenergie

und für die Hubbewegung:

- Masse des Hubschlittens
- Nutzlast
- Hubhöhe
- Einzelwirkungsgrade der elektrischen und mechanischen Komponenten
- Nutzung der Senkenergie

als die wichtigsten Einflussgrößen identifiziert. Für die Kalkulation der Antriebswirkungsgrade ( $\eta_A$ ) von Hub- und Fahrtrieb wurden geeignete Vergleichsenergiebedarfe ( $E_{ideal}$ ) entwickelt. Der Vergleichsenergiebedarf stellt die Bezugsgröße für den Wirkungsgrad dar. Beispielsweise ist die Vergleichsenergie für den einfachen Fall der Hubbewegung, die potentielle Energie von Nutzlast und Hubschlitten. Um den Einfluss der Grundlast des RBG aus dem Wirkungsgrad der einzelnen Antriebe herauszurechnen, wird dessen Energieverbrauch ( $E_{GL}$ ) in der Berechnung des Wirkungsgrades vom gemessenen Energieverbrauch ( $E_{real}$ ) abgezogen. Der Wirkungsgrad eines Antriebes berechnet sich damit nach Gleichung (1).

$$\eta_A = \frac{E_{ideal}}{E_{real} - E_{GL}} \quad (1)$$

Die Grundlast ergibt sich aus dem Leistungsverbrauch der elektrischen Komponenten im Leerlauf. Zu diesen Komponenten zählen unter anderem:

- Steuerrechner
- Leistungselektronik
- Lüftermotoren
- Beleuchtung
- Positionserfassung

Um den Einfluss dieser Komponenten aus der Betrachtung der Antriebswirkungsgrade fernzuhalten wird ihre Leistung ( $P_{GL}$ ) im Vorfeld gemessen und ihr Energiebedarf ( $E_{GL}$ ), wie in Gleichung (2) dargestellt, über die Fahrzeit ( $t_F$ ) berechnet.

$$E_{GL} = P_{GL} \cdot t_F \quad (2)$$

Die Vergleichsenergiebedarfe basieren auf den physikalischen Größen der potentiellen und der kinetischen Energie. Der ideale Energiebedarf der Fahrbewegung ( $E_{ideal,Fahr}$ ) bestimmt sich nach Gleichung (3).

$$E_{ideal,Fahr} = \frac{1}{2} \cdot (m_{RBG} + m_{NL}) \cdot v_{x,max}^2 \quad (3)$$

Hier spielen die Masse des gesamten RBG ( $m_{RBG}$ ) und die maximale Geschwindigkeit des Fahantriebs ( $v_{x,max}$ ) die maßgebliche Rolle. Die Berechnung des idealen Energiebedarfs der Hubbewegung ( $E_{ideal,Hub}$ ) erfolgt dann mittels der Gleichung (4). Diese beinhaltet neben der Erdbeschleunigung ( $g$ ) und der Hubhöhe ( $s_y$ ), noch die Masse des Hubschlittens ( $m_{HS}$ ) und die der Nutzlast ( $m_{NL}$ ).

$$E_{ideal,Hub} = (m_{HS} + m_{NL}) \cdot g \cdot s_y \quad (4)$$

Der ideale Wirkungsgrad der Fahrbewegung ( $\eta_{ideal,Fahr}$ ) lässt sich über Gleichung (5) und der der Hubbewegung über Gleichung (6) berechnen.

$$\eta_{ideal,Fahr} = \frac{(m_{RBG} + m_{NL}) \cdot v_{x,max}^2}{2 \cdot (E_{real} - P_{GL} \cdot t_F)} \quad (5)$$

$$\eta_{ideal,Hub} = \frac{(m_{HS} + m_{Last}) \cdot g \cdot s_y}{E_{real} - P_{GL} \cdot t_F} \quad (6)$$

Ein schwerer gebautes RBG hat im idealen Wirkungsgrad keine Nachteile, weil der Vergleichsenergiebedarf mit der Masse des RBG bzw. des Hubschlittens skaliert. Deswegen ist für eine komplette Bewertung von Gerät und Antrieb zusätzlich der Transportwirkungsgrad ( $\eta_{T,Fahr}$  und  $\eta_{T,Hub}$ ) entwickelt worden. Dieser beinhaltet nur noch die Nutzlastmasse statt der gesamten bewegten Masse. Damit berechnet sich der Transportwirkungsgrad des Fahrwerks mit dem entsprechenden Vergleichsenergiebedarf  $E_{T,Fahr}$  nach Gleichung (7).

$$\eta_{T,Fahr} = \frac{E_{T,Fahr}}{E_{real} - E_{GL}} = \frac{m_{NL} \cdot v_{x,max}^2}{2 \cdot (E_{real} - P_{GL} \cdot t_F)} \quad (7)$$

Für die Hubbewegung gilt analog zu den obigen Gleichungen dann Gleichung (8). Der Vergleichsenergiebedarf für den Transportwirkungsgrad des Hubwerks wird von  $E_{T,Hub}$  repräsentiert.

$$\eta_{T,Hub} = \frac{E_{T,Hub}}{E_{real} - E_{GL}} = \frac{m_{NL} \cdot g \cdot s_y}{E_{real} - P_{GL} \cdot t_F} \quad (8)$$

Damit lassen sich zusätzlich Aussagen zur Effizienz der Konstruktion des RBG treffen. Hier findet im Gegensatz zur reinen Bewertung des Antriebsstranges, auf Basis seines Wirkungs-

grads, auch noch das Gewicht der Komponenten Eingang. Um die kombinierte Effizienz für das Zusammenspiel beider Antriebe zu bewerten wurden ein kombinierter Wirkungsgrad ( $\eta_{ideal,komb}$ ) und ein kombinierter Transportwirkungsgrad ( $\eta_{T,komb}$ ) eingeführt, der die beiden Ansätze für Fahr- und Hubbewegung vereinigt. Damit lassen sich Systeme zur energetischen Kopplung beider Antriebe mitbewerten. Die letzten beiden Formeln (9) und (10) zeigen die Berechnungsvorschriften für die kombinierten Wirkungsgrade.

$$\eta_{ideal,komb} = \frac{E_{ideal,Fahr} + E_{ideal,Hub}}{E_{real} - E_{GL}} \quad (9)$$

$$\eta_{T,komb} = \frac{m_{NL} \cdot v_{x,max}^2 + 2 \cdot g \cdot s_y}{2 \cdot (E_{real} - P_{GL} \cdot t_F)} \quad (10)$$

#### 4 Durchführung der Messungen

Im nachfolgenden Teil werden die durchgeführten Messungen an den beiden Regalbediengeräten näher erläutert. Die meisten Messungen wurden am Forschungs-RBG des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik durchgeführt. Es handelt sich um ein RBG mit CFK Mast und einem Hubschlitten in CFK-Alu Hybridbauweise. Fahr- und Hubantrieb arbeiten beide mittels Zahnriemen. Das Gerät verfügt über eine elektrische Kopplung beider Antriebe durch einen Zwischenkreis. Dieses Gerät soll im nachfolgenden RBG-1 heißen. Zusätzlich wurde ein RBG in einem Palettenhochregallager vermessen, welches fortan RBG-2 heißen soll. Das RBG-2 ist aus Stahl und besitzt neben einem Zwischenkreis zusätzlich eine Energierückspeisung. Der Fahrtrieb ist als Reibradantrieb und der Hubantrieb als Seilhubwerk realisiert. Die Basisdaten von RBG-1 und RBG-2 sind in Tabelle 1 aufgeschlüsselt.

Tabelle 1 Basisdaten von RBG-1 und RBG-2

Gerät	Typ	Nutzlast	Gesamtgewicht ohne Nutzlast	Lagerlänge	Gerätehöhe	Geschwindigkeit Fahrwerk	Geschwindigkeit Hubwerk
<b>RBG-1</b>	AKL	100 kg	2230 kg	21 m	8 m	6 m/s	3 m/s
<b>RBG-2</b>	Palette	1000 kg	8620 kg	105 m	19 m	2,3 m/s	0,7 m/s

Im weiteren Verlauf des Beitrags werden Fachpositionen in Koordinatenschreibweise x,y geschrieben. Dabei steht x für die Fachposition in Horizontalrichtung und y für die Fachposition in Vertikalrichtung. Eine Fahrbewegung beinhaltet die Hin- oder die Rückfahrt, da diese in etwa den gleichen Energiebedarf aufweisen. Eine Hubbewegung beinhaltet die Hub- und die Senkbewegung, da diese einen unterschiedlichen Energiebedarf aufweisen. Aus dem gleichen Grund beinhaltet auch die kombinierte Bewegung die Hin- und die Rückfahrt.

##### Messungen am AKL-RBG

Die Schemata in Bild 3 illustrieren die Bewegung die bei den Messfahrten durchgeführt wurden.

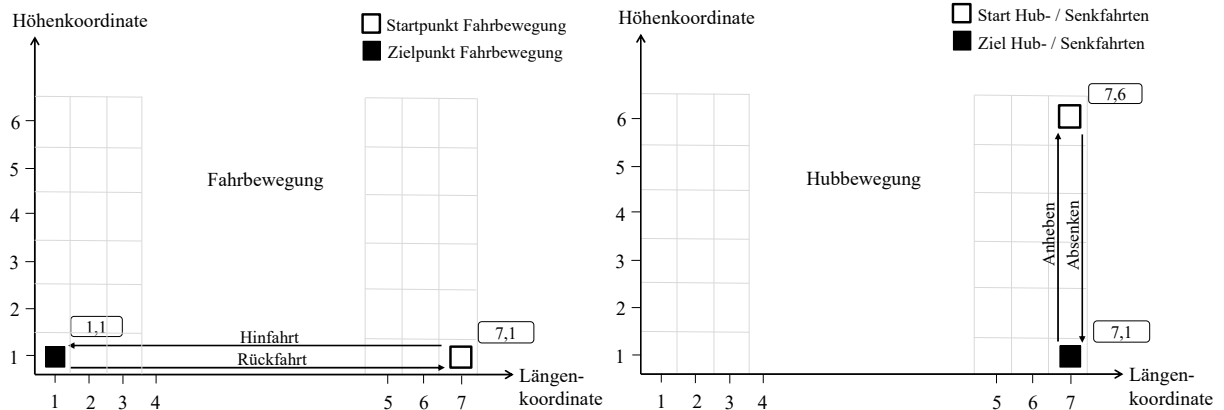


Bild 3 Fahr- und Hubbewegung in der Lagerfront

Die absoluten Positionen der in Bild 3 gezeigten Koordinaten dieser beiden Bewegungen sind in Tabelle 2 vermerkt. Die in der Tabelle enthaltenen Fahrstrecken werden auch zur Berechnung der Vergleichsenergiebedarfe verwendet.

Tabelle 2 Absolute Positionen der Koordinaten von RBG-1

Koordinaten	1,1	7,1	7,6	Fahrstrecke
x-Position in mm	2000	22978	22978	20,98 m
y-Position in mm	1000	1000	7255	6,26 m

Wenn im nachfolgenden von Fahrbewegung oder Hubbewegung des RBG-1 gesprochen wird, sind immer die Bewegungen aus Bild 3 gemeint. Für das Fahr- und Hubwerk des RBG-1 wurden die in Tabelle 3 beschriebenen Last-/ Geschwindigkeitskombinationen untersucht. Die Beladung erfolgte mit einer Nutzlast von 0 bis 100 kg in 25 kg Schritten mit einzelnen Zusatzgewichten. Dadurch ergeben sich leicht unterschiedliche Zuladungen bei Fahr- und Hubwerk.

Tabelle 3 Last-, Geschwindigkeitskombinationen an Fahr- und Hubwerk

Fahrwerk						Hubwerk					
Last in kg	0	24	55	76	100	Last in kg	0	26	50	74	100
6.0 m/s	•	•	•	•	•	3.0 m/s	•	•	•	•	•
5.0 m/s	•	•	•	•	•	2.5 m/s	•	•	•	•	•
4.0 m/s	•	•	•	•	•	2.0 m/s	•	•	•	•	•
3.0 m/s	•	•	•	•	•	1.5 m/s	•	•	•	•	•
						1.0 m/s	•	•	•	•	•

Um einen statistischen Mittelwert über die Messungen bilden zu können, wurden jeweils 20 Bewegungen pro Messung durchgeführt. Bei der Fahrbewegung waren das 10 Hin- und 10 Rückfahrten und bei der Hubbewegung 20 Hub- und 20 Senkbewegungen. Die Standardabweichung des Energiebedarfs einer Messung schwankte zwischen 0,5 und 3,0 %.

Beim RBG-1 wurde bei Probemessungen ein umfassendes Warmlaufverhalten festgestellt. Bei einem Betriebsstart aus dem kalten Zustand sinkt die aufgenommene Leistung durch Wirkungsgradverbesserungen beim Warmlauf der Getriebe und der Motoren. Um diesen Effekt zu quantifizieren, wurden Langzeitmessungen durchgeführt. Dabei wurde die Leistungsaufnahme bei kontinuierlicher Fahrbewegung über einen Betriebszeitraum von fünf Stunden vermessen. Die aufgenommene elektrische Leistung wurde dabei über ein Intervall von fünf Minuten gemittelt. In Bild 4 ist dieser Leistungsverlauf über der Zeit dargestellt. Es zeigt sich eine Abnahme der mittleren Leistung von ca. 5% innerhalb der ersten zwei Stunden.

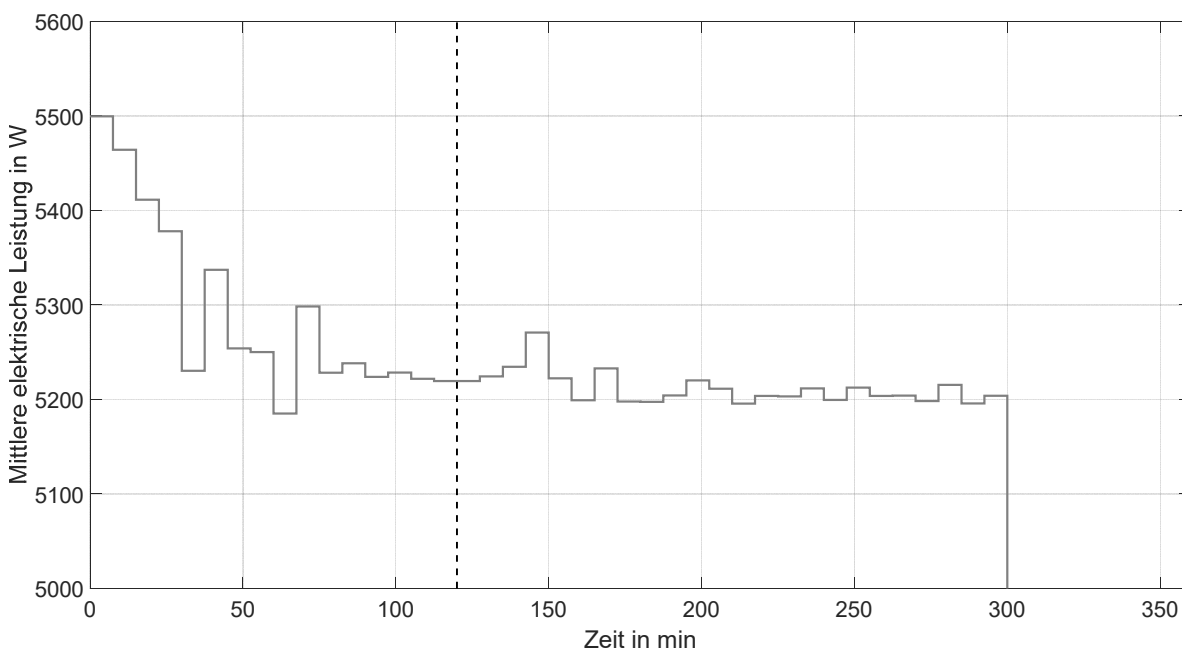


Bild 4 Mittlere Leistungsaufnahme des RBG-1 bei Dauerbetrieb des Fahrtriebs

Beim Hubantrieb konnte ein ähnliches Verhalten festgestellt werden. Das Aufwärmverhalten ist abhängig vom Gerät, weist aber einen signifikanten Einfluss auf. Die Messungen des RBG-1 wurden im warmgelaufenen Zustand durchgeführt.

#### Messungen am Paletten RBG

Da dieses Gerät in einen normalen Lagerbetrieb integriert ist, waren Messungen nur eingeschränkt möglich. Während einer Produktionsunterbrechung konnten trotzdem vergleichbare Fahrten, wie bei RBG-1 durchgeführt werden. Es wurden auch reine Fahr-, reine Hubbewegungen und zusätzlich eine kombinierte Bewegung vermessen. Allerdings war die Anzahl der Wiederholungen pro Bewegung deutlich reduziert. So wurden sechs Fahrbewegungen und drei Hub- und drei Senkbewegungen vermessen. Die beim RBG-2 untersuchten Bewegungen sind in der Tabelle 4 vermerkt. Das Palettenhochregallager in dem das RBG-2 betrieben wird ist 95 Fächer lang und 14 Fächer hoch.



Tabelle 4 Untersuchte Bewegung des RBG-2

Bezeichnung	Startkoordinate	Zielkoordinate	Fahrstrecke in m	Hubhöhe in m
<b>Fahrbewegung 1</b>	1,1	18,1	17,6	0
<b>Fahrbewegung 2</b>	1,1	30,1	30,0	0
<b>Hubbewegung 1</b>	1,1	1,5	0	4,8
<b>Hubbewegung 2</b>	2,1	2,14	0	15,9
<b>Kombinierte Bewegung</b>	1,1	18,5	17,6	4,8

Es wurden zwei unterschiedliche lange Fahrstrecken, zwei unterschiedliche lange Hubstrecken und eine kombinierte Bewegung untersucht. Die Bewegungen wurden jeweils ohne und mit 435 kg Nutzlast durchgeführt.

## 5 Messung der kinematischen Parameter

Die Beschleunigungsmessung mit Hilfe eines selbstentwickelten Beschleunigungsmesssystems (BMS) kam zum Einsatz, um die eingestellten kinematischen Parameter zu überprüfen oder um diese überhaupt erst zu bestimmen. Beim RBG-1 konnten die Werte für Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit direkt in der SPS des Geräts eingestellt werden. Mit Hilfe dieser Werte konnte das BMS validiert werden. Das BMS ist ein System auf Basis eines Arduino Micro PCs und eines 3-Achsen Beschleunigungssensors. Die Beschleunigungsdaten des Sensors werden bei der Auswertung der Messdaten weiterverarbeitet und anschließend werden aus diesen die Geschwindigkeits- und Positionsdaten berechnet. Anschließend wurde geprüft, ob die Zuladung einen Einfluss auf das Beschleunigungsverhalten des RBG-1 hat. Um zu überprüfen ob das Gerät auch bei unterschiedlicher Nutzlast dem simulierten Beschleunigungsverlauf folgt, wurden Messungen bei verschiedenen Nutzlasten durchgeführt. In Bild 5 ist ein Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Beschleunigungsdaten des Fahrantriebs zu sehen.

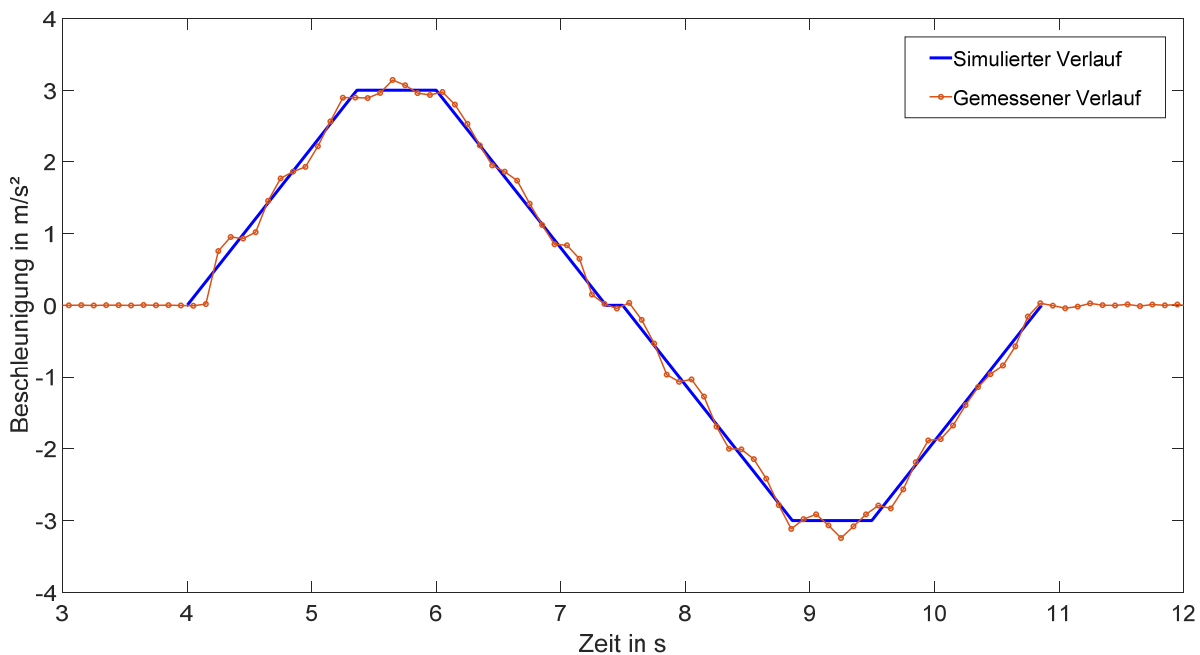


Bild 5 Vergleich von Simulations- und Messdaten

Die gemessenen Beschleunigungsdaten zeigen eine gute Übereinstimmung mit den simulierten Daten. Daraus wurde abgeleitet, dass die Beschleunigungsdaten mit dem verwendeten Messsystem realistisch abgebildet werden konnten. Das BMS wurde dann für die Vermessung des RBG-2 benutzt um dessen kinematisches Verhalten genauer zu bestimmen. Aus den Datenblättern von RBG-2 konnten nur die Geschwindigkeiten der Antriebe abgelesen werden.

## 6 Messung des Energiebedarfs

Bei der Messung des Energiebedarfs kam ein Drei-Phasen Leistungsmessgerät zum Einsatz. In Bild 6 ist ein vereinfachtes Schema des Messgerätanschlusses dargestellt. Die Bezeichnung LAM steht für das Lastaufnahmemittel am Hubschlitten. Das Messgerät ist bei RBG-1 und RBG-2 jeweils nach dem stationären Schaltschrank angeschlossen worden. Somit werden alle Verluste ab der Schleifleitung auf Geräteebene mitgemessen.

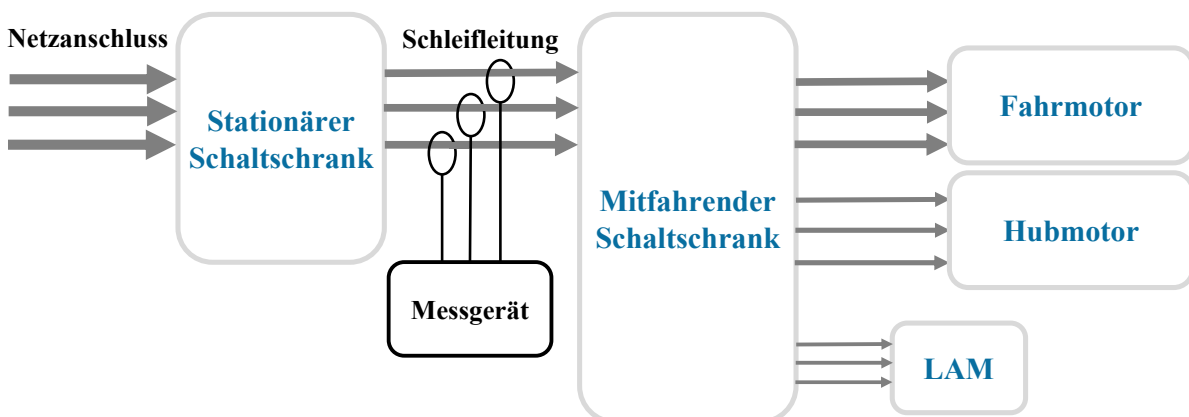


Bild 6 Anschluss des Leistungsmessgerätes

Bei der Leistungsmessung wurde ein Messintervall von 0,5 s verwendet. Die Messung zeichnet neben der Leistung auch den Energiebedarf, die Uhrzeit, die Spannungs- sowie Stromwerte und viele weitere Messgrößen auf. Für die Auswertung wurden aber nur die Zeit, die elektrische Leistung und der Energiebedarf benutzt. In Bild 7 ist exemplarisch ein gemessener Leistungsverlauf des RBG-1 dargestellt. Zu sehen sind hier die Ergebnisse der Leistungsmessung des Fahrwerks bei 0 kg Zuladung und unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Pro Geschwindigkeitsstufe sind 20 Fahrten durchgeführt worden, gut erkennbar an den 20 Spitzen in einem Block. Es sind vier Blöcke mit jeweils 20 Leistungsspitzen zu sehen. Die Blöcke repräsentieren die vier Fahrgeschwindigkeiten von 6,0 m/s bis 3,0 m/s (in 1 m/s Schritten).

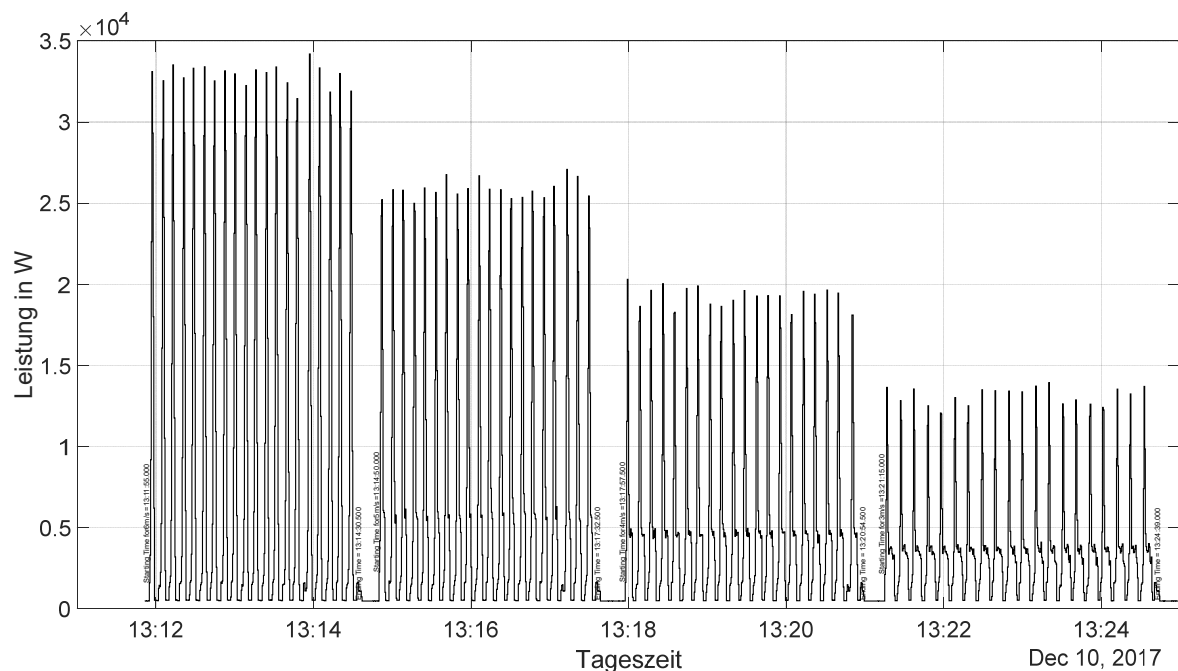


Bild 7 Exemplarische Ergebnisse der Leistungsmessung

Aus diesen Leistungsdaten wurde die Start- und Endzeit jeder einzelnen Fahrt ermittelt. Mit diesen Zeitpunkten wurde aus den gemessenen Energiebedarfswerten der Energiebedarf einer einzelnen Fahrt berechnet. Aus allen Fahrten eines Messzyklus wurden der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Die Grundlast wurde als Mittelwert der elektrischen Leistung im Leerlauf bestimmt. Die Grundlast von RBG-1 beträgt ca. 475 W und die von RBG-2 ca. 598 W.

## 7 Ergebnisse und Diskussion

Im nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen an RBG-1 und RBG-2 vorgestellt.

### Ergebnisse RBG-1

Die Mittelwerte und Standardabweichungen aus den Messzyklen wurden über der zugehörigen Antriebsgeschwindigkeit und nach Nutzlasten aufgeteilt, aufgetragen. Der gemessene

Energiebedarf beinhaltet den Energiebedarf des Gerätes ohne Grundlast. In Bild 8 sind die entsprechend dargestellten Ergebnisse für das Fahrwerk zu sehen.

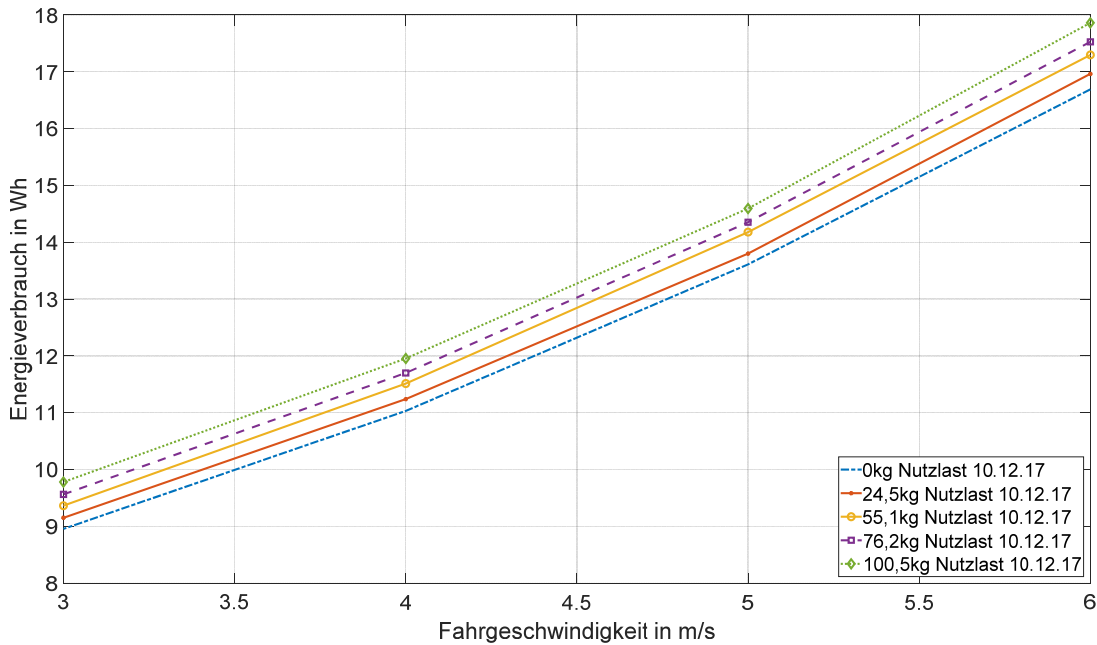


Bild 8 Energiebedarf des Fahrwerks bei unterschiedlicher Zuladung und Geschwindigkeit ohne Grundlast

Der Energiebedarf skaliert mit dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit und in etwa linear mit der Nutzlast. Diese Zusammenhänge sind soweit in der Literatur auch schon beschrieben. In Bild 9 wurden die entsprechenden Ergebnisse für das Hubwerk geplottet.

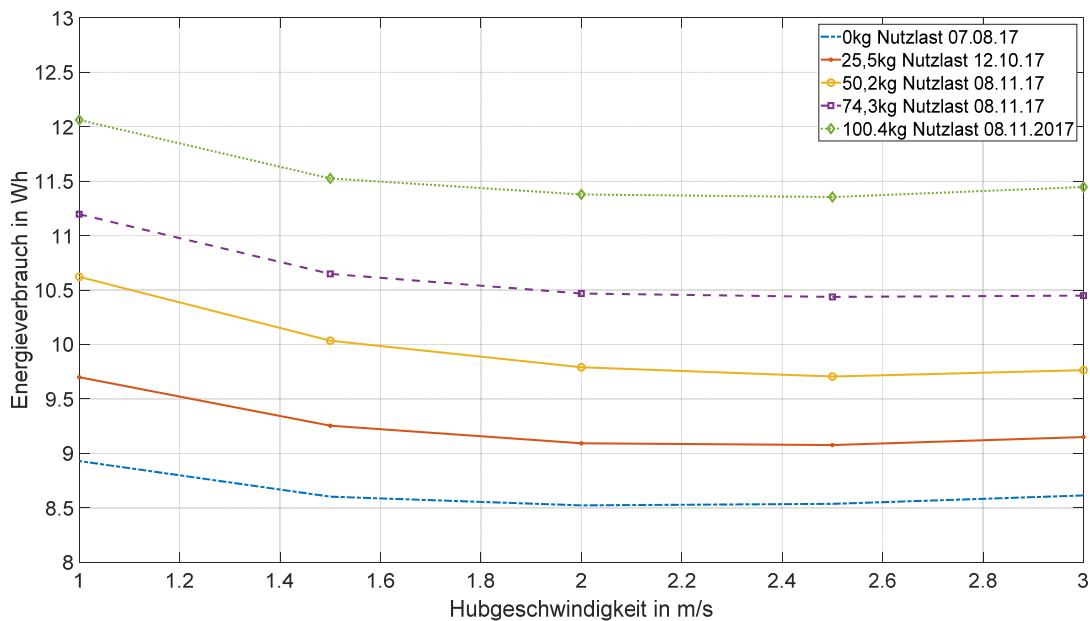


Bild 9 Energiebedarf des Hubwerks bei unterschiedlicher Zuladung und Geschwindigkeit ohne Grundlast

Hier besteht ein indirekt proportionales Verhältnis zwischen Hubgeschwindigkeit und Energiebedarf. Dies liegt daran, dass beim Hubvorgang hauptsächlich die Hubhöhe einen Einfluss auf den Energiebedarf hat. Der Energiebedarf steigt bei sinkender Hubgeschwindigkeit, weil die Hubzeit größer wird. Durch herausrechnen der Grundlast sinkt der Einfluss der Hubgeschwindigkeit auf den Energiebedarf. Mit der Grundlast steigt der Energiebedarf bei kleineren Hubgeschwindigkeiten noch stärker an.

Mit Hilfe dieser Daten und den entwickelten Berechnungsvorschriften wurden die Wirkungsgradkennfelder der Antriebe von RBG-1 erzeugt. Die Kennfelder beinhalten den Wirkungsgrad, der über Antriebsgeschwindigkeit und Nutzlast aufgetragen ist. In Bild 10 ist das Wirkungsgradkennfeld des Fahrtriebes dargestellt.

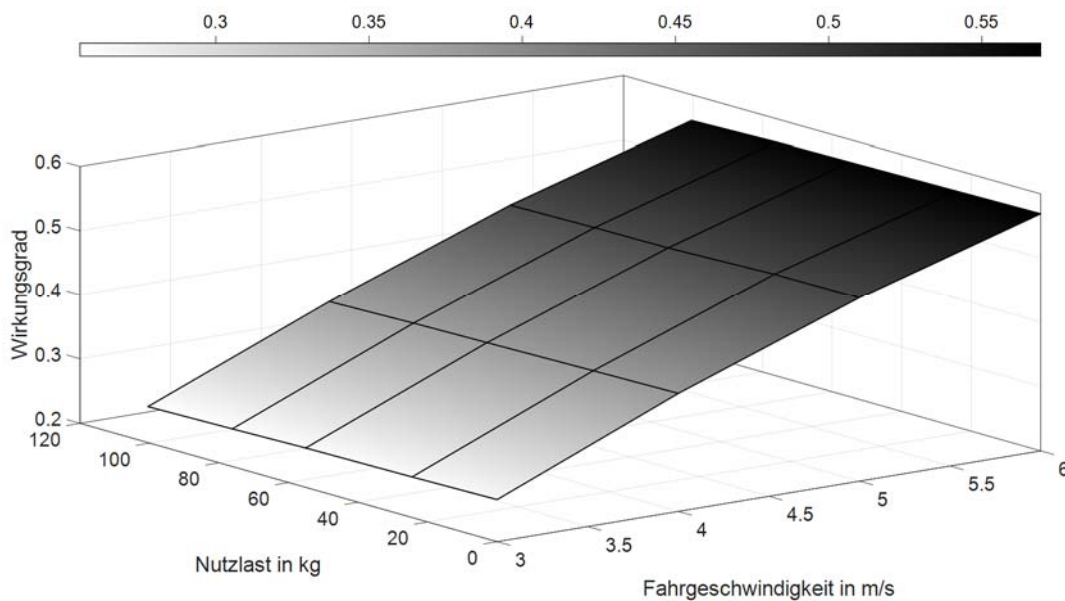


Bild 10 Wirkungsgradkennfeld des Fahrtriebes

Die Geschwindigkeit weist einen deutlichen Einfluss auf, wohingegen die Nutzlast nur einen geringen Einfluss hat. Dies liegt daran, dass die Nutzlast im Verhältnis zur Gesamtmasse eher klein ist. Das Wirkungsgradoptimum liegt bei der höchsten Fahrgeschwindigkeit und geringster Nutzlast. In Bild 11 ist das entsprechende Kennfeld für das Hubwerk aufgetragen. Zu beachten ist, dass der Wirkungsgrad nur in einem kleinen Intervall schwankt. Die Nutzlast und die Hubgeschwindigkeit haben beide nur schwachen Einfluss auf den Wirkungsgrad.

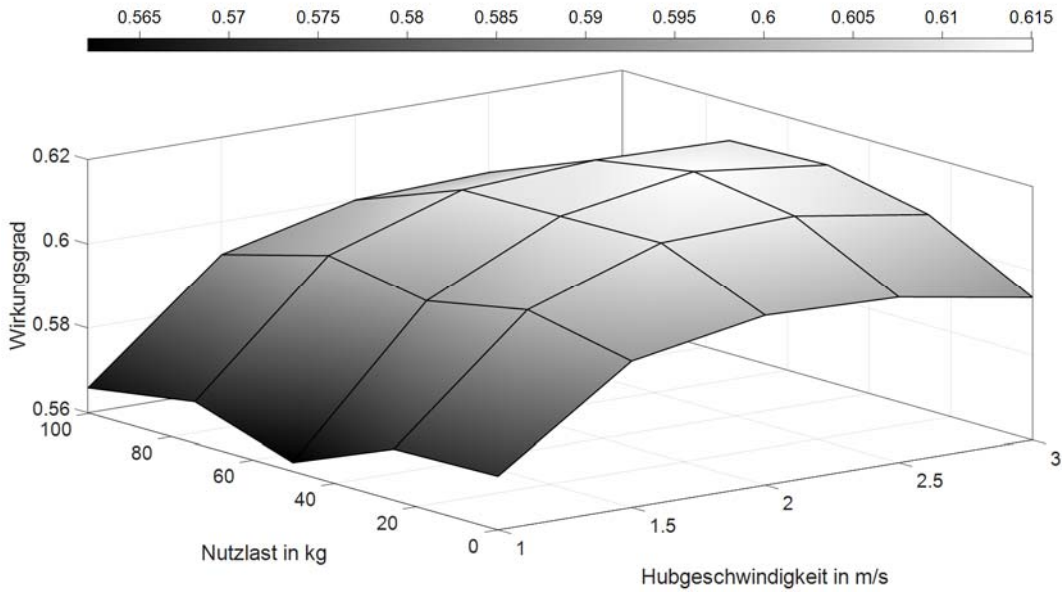


Bild 11 Wirkungsgradkennfeld des Hubantriebs

Der Vergleichsenergiebedarf und der reale Energiebedarf skalieren in etwa gleichem Maße mit der Nutzlast. Das Wirkungsgradoptimum liegt in etwa bei 50 kg Nutzlast und einer Fahrgeschwindigkeit von 2,5 m/s.

Im nächsten Schritt wurden noch die Transportwirkungsgradkennfelder für die beiden Antriebe berechnet. Diese beiden Kennfelder sind in Bild 12 und in Bild 13 dargestellt. Vergleicht man die Ergebnisse mit den normalen Wirkungsgradkennfeldern, so ergibt sich ein wichtiger Unterschied. Die Nutzlast übt jetzt in beiden Kennfeldern einen wichtigen Einfluss aus. Die Einflüsse der Geschwindigkeit bleiben analog erhalten.

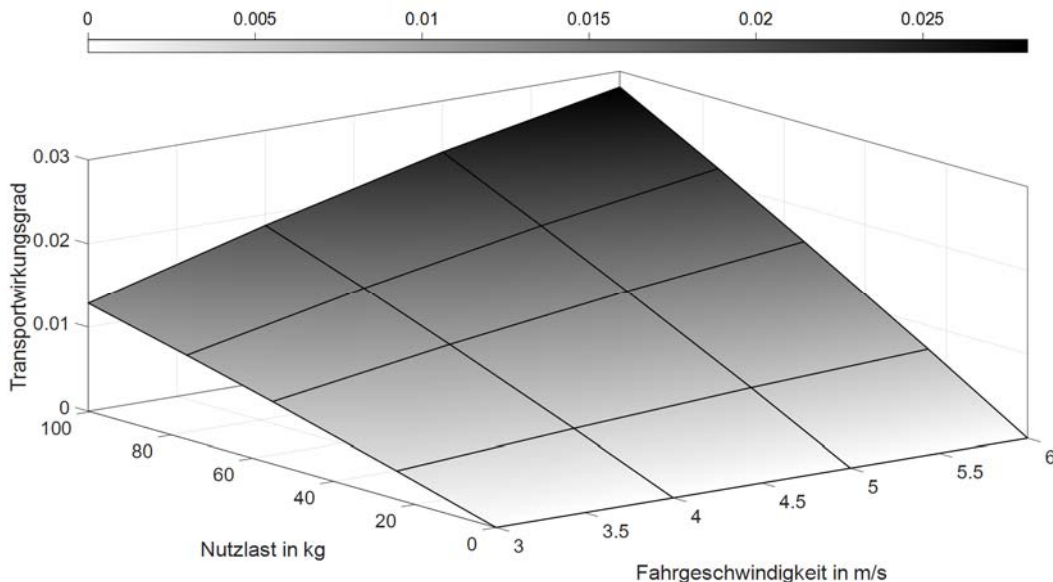


Bild 12 Transportwirkungsgrad des Fahrtriebs

Ohne Nutzlast ergibt sich ein Transportwirkungsgrad von 0, da auch der Vergleichsenergiebedarf auf 0 zurückgeht. Der Transportwirkungsgrad des Fahrwerks nimmt nur kleine Werte

an. Dies lässt sich mit dem hohen Verhältnis von Gesamtmasse und Nutzlast des RBG-1 begründen. Das Optimum liegt bei höchster Nutzlast und höchster Fahrgeschwindigkeit.

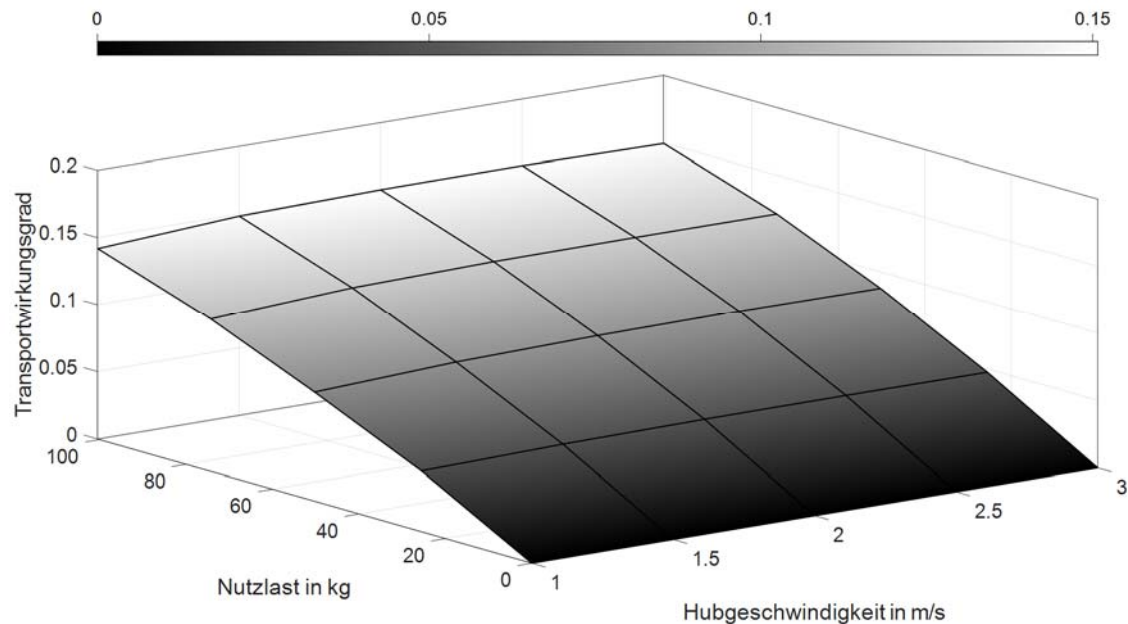


Bild 13 Transportwirkungsgradkarte des Hubantriebs

Der Transportwirkungsgrad des Hubwerks erreicht höhere Werte, da die maximale Nutzlast im Verhältnis zum Gewicht des Hubschlittens, das in etwa bei 300 kg liegt, relativ hoch ist. Das Optimum liegt bei einer Nutzlast von 100 kg und wiederum bei ca. 2,5 m/s Antriebsgeschwindigkeit.

### Ergebnisse RBG-2

Um die Ergebnisse der Messungen beim RBG-2 einfacher darstellen zu können, wurde eine Kartendarstellung gewählt bei der der Wirkungsgrad über der Fachposition dargestellt wird. Die Kennfelder für den Wirkungsgrad und den Transportwirkungsgrad sind in Bild 14 und Bild 15 dargestellt. Ein wichtiger Unterschied zum RBG-1 sind die Wirkungsgradkennwerte, die beim RBG-2 größer als 1,0 werden. Werte größer 1,0 werden durch die Energierückspeisung möglich, weil beim Bremsen des Fahrtantriebs und beim Absenken einer Last jetzt Energie zurückgespeist werden kann. Dadurch verringert sich der gemessene Energiebedarf. Die Bremsenergie kann beim RBG-1 nicht genutzt werden, sondern muss im Bremswiderstand in Wärme umgewandelt werden.

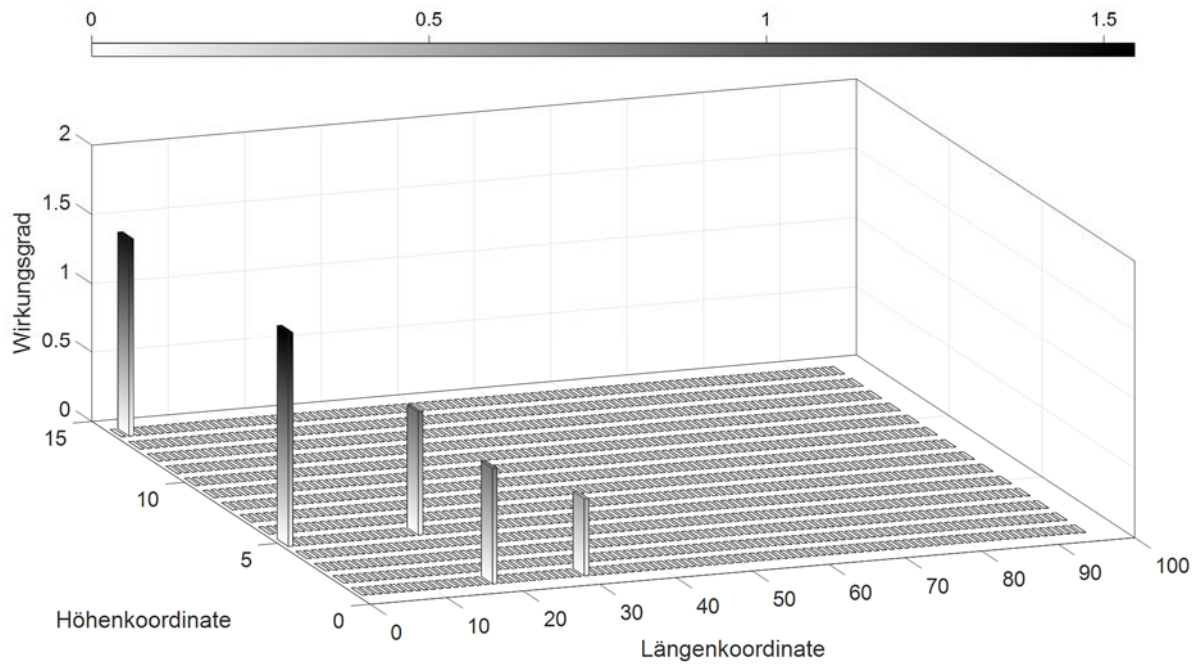


Bild 14 Wirkungsgrad aufgetragen über die angefahrene Fachposition

Für die Fahrbewegung können allerdings nur die Wirkungsgradwerte der Fahrbewegung 1 von RBG-2 mit den Werten von RBG-1 verglichen werden. Bei Fahrbewegung 1 ist die zurückgelegte Fahrstrecke in etwa gleich groß wie bei der Fahrbewegung des RBG-1. Die Transportwirkungsgrade sind auch deutlich größer als beim RBG-1. Insbesondere beim Hubwerk, da hier beim Senkvorgang viel Energie durch die Rückspeisung eingespart wird.

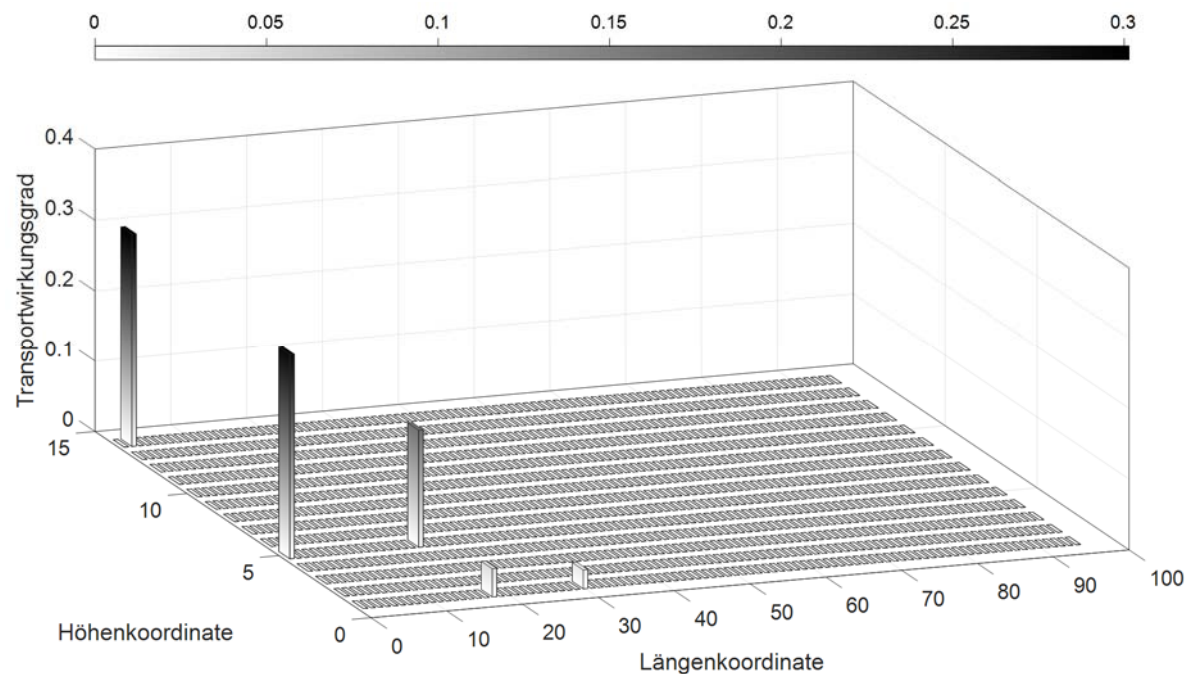


Bild 15 Transportwirkungsgrad aufgetragen über die angefahrene Fachposition

Die zugehörigen Wirkungsgradwerte aus den beiden vorherigen Abbildungen sind in Tabelle 5 noch einmal in Zahlen dargestellt.



Tabelle 5 Wirkungsgraddaten des RBG-2

Bezeichnung	Startkoordinate	Zielkoordinate	Wirkungsgrad	Transportwirkungsgrad
<b>Fahrbewegung 1</b>	1,1	18,1	0,831	0,040
<b>Fahrbewegung 2</b>	1,1	30,1	0,555	0,027
<b>Hubbewegung 1</b>	1,1	1,5	1,55	0,289
<b>Hubbewegung 2</b>	2,1	2,14	1,43	0,301
<b>Kombinierte Bewegung</b>	1,1	18,5	0,885	0,165

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Konzept zur Wirkungsgradberechnung von Hub- und Fahrtrieb eines RBG vorgestellt. In den ersten drei Kapiteln wurde eine kurze Einführung in das Thema, den aktuellen Stand der Forschung und die theoretischen Grundlagen gegeben. Dabei wurden die formelmäßigen Zusammenhänge für die Berechnung von Antriebs- und Transportwirkungsgrad erläutert.

Das entwickelte Konzept wurde zuerst an einem AKL-RBG mit Zwischenkreiskopplung angewandt. Der reale Energiebedarf wurde dabei mittels Messungen bestimmt. Um ein Wirkungsgradkennfeld zu bestimmen, wurden zwei Parameter variiert. Einerseits wurde die maximale Antriebsgeschwindigkeit und andererseits die Nutzlast am RBG variiert. Gemessen wurden der Energiebedarf der Antriebe mittels eines Leistungsmessgerätes und die kinematischen Parameter mittels eines selbst konzipierten Beschleunigungsmesssystems.

Für die Messungen an den Antrieben wurden die reine Fahrbewegung und die reine Hubbewegung des Gerätes vermessen. Um Unsicherheiten bei Einzelmessungen auszugleichen, wurden jeweils mehrere Bewegungen pro Last-Geschwindigkeitskombination gemessen. Bei der anschließenden Auswertung wurden statistische Mittelwerte aus den einzelnen Messreihen gebildet. Anschließend wurden diese Mittelwerte zur Wirkungsgradkalkulation nach den entwickelten Berechnungsvorschriften verwendet. Die entwickelten Ansätze wurden zum Abschluss noch auf ein Paletten-RBG mit Netzzurückspeisung angewandt. Die Ergebnisse zeigen deutlich die Unterschiede zwischen den beiden Geräten auf, erlauben aber gleichzeitig einen Vergleich der unterschiedlichen Fahr- und Hubantriebe. Dabei hat sich gezeigt, dass das entwickelte Konzept für die Berechnung von Antriebswirkungsgraden geeignet ist.

Gegenüber der Bewertung eines kompletten RBG mit einer einzigen Kennzahl ergibt sich der Vorteil, dass genauere Aussagen zu einzelnen Antrieben und Komponenten möglich sind. Dies ermöglicht die gezielte Verbesserung dieser Baugruppen.

Ein Problem liegt in der mangelnden Vergleichbarkeit der Wirkungsgradkennwerte des Fahrtriebs bei unterschiedlichen Fahrstrecken. Diese sind nur zwischen Geräten vergleichbar, wenn die gleiche Fahrstrecke zurückgelegt wird, da der Vergleichsenergiebedarf nicht mit der Fahrstrecke skaliert, der Energiebedarf aber schon. Des Weiteren leistet auch das Lastauf-

nahmemittel einen Beitrag zum gesamten Energiebedarf des Regalbediengeräts. Die Effizienz des Lastaufnahmemittels ist Gegenstand zukünftiger Untersuchungen. Auch die Grundlast ist noch Gegenstand laufender Untersuchungen. Die Übertragbarkeit des Konzepts auf die Antriebe anderer Geräte wie Krane oder anderer Fördertechnik ist vorstellbar.

Der Beitrag ist im Rahmen des Forschungsprojektes „Entwicklung einer Bewertungsmethodik für die Klassifizierung der Energieeffizienz von Regalbediengeräten“, das zurzeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) an der TU München bearbeitet wird, entstanden.

## 9 Förderhinweis

Gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

## 10 Literaturverzeichnis

- [Bra-2016] Braun, M.; Furmans, K.: Evaluation von Simulationsmodellen zur Prognose des Energiebedarfs von Regalbediengeräten mit empirisch erhobenen Messdaten. In: logistics journal proceedings (2016)
- [Ert-2013] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Energieeffizienzklassen für AKL-Regalbediengeräte - Teil 1/2. In: Fördern und Heben (2013) Nr. 12
- [Ert-2014] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Energieeffizienzklassen für AKL-Regalbediengeräte - Teil 2/2. In: Fördern und Heben (2014) Nr. 1-2
- [Ert-2016] Ertl, R.; Willibald A., G.: Meta-model for calculating the mean energy demand of automated storage and retrieval systems. In: logistics journal (2016)
- [FEM-9101] Federation Europeenne de la Manutention: Terminologie - Regalbediengeräte - Definitionen. FEM Nr. 9101, 1997.
- [FEM-9865] Federation Europeenne de la Manutention: Energy consumption - determination methods (ECoDeMISE). FEM Nr. 9865, 2017.
- [Ler-2013] Lerher, T.; Edl, M.; Rosi, B.: Energy efficiency model for the mini-load automated storage and retrieval systems. In: Advanced Manufacturing Technology (2013)
- [Sch-2012] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Der Einfluss kinematischer Parameter auf den Energiebedarf eines Regalbediengerätes. In: logistics journal (2012)
- [Sch-2017] Schadler, M.; Stöhr, T.; Hafner, N.: Energy efficiency benchmarking concept for diverse automated storage and retrieval systems. In: Zrnica, N.; Bosnjak, S.; Kartnig, G. (Hrsg.): XXII International Conference on "Material Handling, Constructions and Logistics" - MHCL 2017, 2017, S. 133–138.