

J. Fottner · A. Rücker

Entwicklung einer Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten

Forschungsbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Entwicklung einer Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten

der Forschungsstelle

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München

Das IGF-Vorhaben Nr. 18839N der Forschungsvereinigung
Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Ge-
meinschaftsforschung (IGF) vom

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags
gefördert.

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München

Verfasser:
Andreas Rücker, M.Sc.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Printed in Germany 2018

ISBN: 978-3-941702-96-7

fml – Lehrstuhl für
Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München
Boltzmannstr. 15
85748 Garching
Tel.: + 49.89.289.15921
Fax: + 49.89.289.15922
www.fml.mw.tum.de

Kurzfassung

In den letzten Jahren rückt die Energieeffizienz im Bereich der Intralogistik immer stärker in den Fokus. Dieser Umstand wird durch verschiedene äußere und unternehmensinterne Faktoren beeinflusst. Zu den äußeren Faktoren zählen beispielsweise steigende Energiekosten und gesetzliche Rahmenbedingungen. Die inneren Faktoren beinhalten unter anderem Marketingaspekte oder andere unternehmensinterne Vorgaben. Aus diesen Gründen wird Energieeffizienz in der Planungs- und Betriebsphase von Intralogistiksystemen immer wichtiger. Automatisch bediente Hochregallager mit Regalbediengeräten erfüllen dabei eine wichtige Funktion in modernen Intralogistiksystemen. Regalbediengeräte werden in Hochregallagern zum Umschlag von Kleinteilebehältern und Tablaren über Paletten bis hin zu großen Sonderladungsträgern benutzt. Die Zielsetzung im Rahmen des Projekts war die Entwicklung einer Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten. Die Methodik soll eine umfassende Bewertung des kompletten Betriebs von Regalbediengeräten ermöglichen. Am Anfang des Projekts wurden über umfangreiche Recherchen und Expertengespräche Einflussfaktoren auf die Energieeffizienz und Anforderungen an eine Bewertungsmethodik erarbeitet. Anschließend wurde ein Simulationsmodell zur Untersuchung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten entwickelt. Dieses Modell basiert auf einem einfachen und rechenzeiteffizienten Ansatz und wurde für die Untersuchung einer großen Anzahl von verschiedenen Regalbediengeräten konzipiert. Es wurden unter anderem Geräte für Kleinteilebehälter und Paletten, mit unterschiedlichen Lagertiefen, Lastaufnahmemitteln und Bremsenergienutzungen untersucht. Zusätzlich zur simulativen Untersuchung wurden Messungen am lehrstuhleigenen Regalbediengerät und an weiteren Geräten in Realanlagen durchgeführt. Diese Messergebnisse wurden zur Parametrierung des Simulationsmodells und zur Entwicklung und Validierung der Bewertungsmethodik verwendet. Mit Hilfe des Modells wurde eine Simulationsstudie zur Ermittlung von Referenzspielen für einen repräsentativen Betrieb von Regalbediengeräten durchgeführt. Mit Hilfe der Ergebnisse konnten Referenzspiele für den mittleren Energiebedarf beim Betrieb unterschiedlicher RBG ermittelt werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden Berechnungsmethoden für spezifische Wirkungsgrade zentraler Komponenten entwickelt. Abschließend wurde eine Bewertung der Gesamtleistung eines Regalbediengeräts erstellt. Die daraus resultierende Bewertungsmethodik wurde anhand von Messdaten validiert und in einem Softwaredemonstrator für die einfache Anwendung umgesetzt. Die entwickelte Methodik stellt für Hersteller, Planer und Betreiber eine einfache Möglichkeit dar, um ihre Regalbediengeräte zu bewerten.

Das angestrebte Forschungsziel wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Vorgehensweise und Lösungsweg	3
2 Stand der Technik und der Forschung	5
2.1 Beschreibung des Systems Hochregallager	5
2.2 Beschreibung des Systems Regalbediengerät	6
2.3 Analyse des Standes der Forschung	9
3 Einflussfaktoren auf Energiebedarf und Nutzen	13
3.1 Einflussfaktoren auf den Energiebedarf	13
3.1.1 Strategische Einflüsse	15
3.1.2 Physikalische Einflüsse	16
3.1.3 Thermische Bilanz an einem RBG	18
3.1.4 Verlustquellen an einem RBG	20
3.2 Einflussfaktoren auf den logistischen Nutzen	25
4 Entwicklung eines Bewertungsszenarios	27
4.1 Projektspezifische Bewertung	29
4.2 Referenzzyklus	30
4.3 Messwoche	31
4.4 Allgemeiner Bewertungskatalog und Wirkungsgradkatalog	32
4.5 Wirkungsgradkatalog	33
4.6 Referenzgerät	34
4.7 Zusammenfassung	34
5 Entwicklung eines Referenzzyklus für die Bewertung der logistischen Leistung	35
5.1 Simulationsstudie	36
5.2 Auswertung der Ergebnisse	41
5.3 Bildung von Referenzspielen	43

5.3.1 AKL Konfigurationen	44
5.3.2 APL Konfigurationen	48
6 Untersuchung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten	51
6.1 Grundlagen zur Leistungsmessung an RBG	51
6.2 Grundlagen der Beschleunigungsmessung	54
6.3 Untersuchte Geräte	59
6.4 Messungen an RBG-1	62
6.5 Messungen an RBG-2	75
6.6 Messungen an RBG-3	85
6.7 Messungen an RBG-4	92
7 Entwicklung der Bewertungsmethodik	95
7.1 Bewertung der Hauptantriebe	95
7.1.1 Bewertung von Fahr- und Hubbewegung	97
7.1.2 Bewertung der Senkbewegung	100
7.1.3 Bewertung der Antriebskopplung	101
7.1.4 Beispielhafte Auswertung der Wirkungsgrade	101
7.2 Bewertung des Leichtbaus	103
7.3 Bewertung des Lastwechsels	106
7.4 Bewertung der Grundlast	108
7.5 Auswertung der Einzelkennzahlen	109
7.6 Bewertung der logistischen Leistung	111
8 Implementierung eines Softwaredemonstrators	117
8.1 Eingabe der Parameter	117
8.2 Darstellung der Ergebnisse	122
9 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	125
9.1 Zusammenfassung	125
9.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	126
9.3 Ausblick	127
10 Verzeichnis der Veröffentlichungen	129
11 Verzeichnis der studentischen Arbeiten	131
Literaturverzeichnis	133

Abbildungsverzeichnis	139
Tabellenverzeichnis	145
Anhang A Zusammenstellung der Einflussfaktoren	A-1
Anhang B Parameter des Simulationsmodells	B-2
Anhang C Annahmen des Simulationsmodells	C-4
Anhang D Simulationsergebnisse	D-6
Anhang E Kalibrierdokumente Fluke 1735	E-7
Anhang F Messergebnisse RBG-3	F-14

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AKL	Automatisches Kleinteilelager
APL	Automatisches Palettenlager
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (Carbon fiber reinforced plastic)
EE	Energieeffizienz
HRL	Hochregallager
KLT	Kleinladungsträger
PA	Projektbegleitender Ausschuss
RBG	Regalbediengerät

Formelzeichenverzeichnis

Lateinische Formel- zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche
a	m/s^2	Beschleunigung
B	m	Breite
E	J	Energie
\bar{E}	J	Mittlerer Energiebedarf
H	m	Höhe
h	1	Zeitlicher Anteil
JR	s^{-1}	Ruckverhältnis (Jerk Ratio)
K_{EE}	$mWh \cdot s/kg \cdot m^2$	Energieeffizienzkennzahl
L	m	Länge
LL	$kg \cdot m^2/s$	Logistische Leistung
m	kg	Masse
\bar{m}	kg	Mittlere Transportmasse
N	1	Anzahl
\dot{n}	s^{-1}	Durchsatz
RWF	1	Regalwandfaktor
v	m/s	Geschwindigkeit

Griechische Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
η	1	Wirkungsgrad

Index	Bedeutung
<i>Col</i>	Spalten (Columns)
<i>el</i>	elektrisch
<i>ges</i>	Gesamt
<i>GGW</i>	Gegengewicht
<i>GL</i>	Grundlast
<i>HS</i>	Hubschlitten
<i>i</i>	laufender Index
<i>id</i>	ideal
<i>kin</i>	kinetisch
<i>L</i>	Luft
<i>Lev</i>	Ebenen (Level)
<i>NL</i>	Nutzlast
<i>pot</i>	potentiell

Index	Bedeutung
<i>R</i>	Reibung
<i>RBG</i>	Regalbediengerät
<i>re</i>	real
<i>Ref</i>	Referenz
<i>rel</i>	relativ
<i>RW</i>	Regalwandfläche
<i>S</i>	Spiel
<i>T</i>	Transport
<i>W</i>	Widerstand
<i>x</i>	Fahrbewegung
<i>xy</i>	kombinierte Fahr- und Hubbewegung
<i>-y</i>	Senkbewegung
<i>+y</i>	Hubbewegung

1 Einleitung

In Zeiten zunehmender Ressourcenproblematik zeichnet sich ein Trend zur Steigerung der Energieeffizienz (EE) im Bereich der Intralogistik ab. Dieser Trend wird durch mehrere Faktoren ausgelöst. Auf der einen Seite stehen äußere Faktoren, wie steigende Energiekosten, Kundenforderungen und gesetzliche Rahmenbedingungen, auf der anderen Seite begünstigen innere Faktoren, wie Marketingaspekte, diesen Trend. Automatische Hochregallager (HRL) stellen dabei einen wichtigen Bestandteil von modernen Intralogistiksystemen dar. Durch den hohen Energiebedarf dieser Systeme stellen Maßnahmen zur Verbesserung ihrer EE ein wirksames Mittel zur Energieeinsparung dar. EE stellt ein Verhältnis aus eingesetzter Energie und dem damit erzielten Nutzen dar. Nutzen kann im intralogistischen Sinne als Nutzen des RBG für den Betreiber verstanden werden. Um die EE in Anlagen zu steigern, ist meist ein Prozess zur Umsetzung von EE Maßnahmen vonnöten. Ein Beispiel für solch einen Prozess ist der in Abbildung 1-1 dargestellte Umsetzungskreislauf für EE Maßnahmen. In einem ersten Schritt wird der Status Quo einer Anlage bewertet. Mit Hilfe der Bewertung lassen sich Verbesserungspotenziale identifizieren. Anschließend können die identifizierten Potenziale umgesetzt werden. Mit Hilfe einer abschließenden Bewertung werden die umgesetzten Maßnahmen evaluiert.



Abbildung 1-1: Umsetzungskreislauf für EE Maßnahmen [Rüc-2018b]

Innerhalb dieses Verbesserungsprozesses ist zweimal der Einsatz einer Methodik für die Bewertung der EE vonnöten. Auch im Rahmen des Anschaffungsprozesses von Intralogistikanlagen ist die Bewertung der EE von Interesse. Hersteller können die EE ihrer Geräte transparent darstellen und Kunden können gezielt die EE eines Gerätes in ihre Investitionsentscheidung einfließen lassen. [Rüc-2018a; Rüc-2018b]

1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Steigende Energiepreise und die zunehmende Verschärfung von umweltpolitischen Reglementierungen führen zu einer verstärkten Relevanz der EE in Unternehmen. Mit der sogenannten „Ökodesign Richtlinie“ (EU-Richtlinie 2009/125/EG, siehe [Eur-2009b]) ist für Haushalts- und Konsumgüter eine erste Vorschrift zur Bewertung und Klassifizierung der EE entwickelt worden. Im Bereich der industriellen Anlagen existieren bis jetzt nur wenige solcher Vorschriften. Diese beziehen sich oft nur auf einzelne Komponenten wie Wasserpumpen, Elektromotoren oder Luftfilter (siehe [ECC-RS4] und [DIN-779]). Die EU Verordnung 640/2009 (siehe [Eur-2009a]) zur Festlegung von Anforderungen an die Gestaltung von Elektromotoren schreibt die Verwendung von Motoren mit gewissen Mindestwirkungsgraden vor. Die Richtlinie bezieht sich bis jetzt aber hauptsächlich auf Motoren, die im Dauerbetrieb eingesetzt werden. Fahr- und Hubantrieb eines RBG fallen nicht unter diese Richtlinie. Ein erstes Beispiel für eine Richtlinie zur Bewertung einer Anlage ist die VDI-4707 Richtlinie zur quantifizierten Bewertung von Aufzügen (siehe [VDI-4707a] und [VDI-4707b]).

Auf Grund der oben genannten Gründe besteht der Wunsch von Betreibern und Planern von Materialflusssystemen, die EE bereits in der Planungsphase einer Intralogistikanlage zu berücksichtigen. Die Bewertung eines Regalbediengerätes (RBG) gestaltet sich auf Grund der Vielzahl an Einflussfaktoren auf Energiebedarf und Nutzen als schwierig. Die Einflussfaktoren auf den Energiebedarf stehen mitunter in komplexer Wechselwirkung zueinander. Dieser Umstand erschwert eine Bewertung zusätzlich. Maßnahmen zur Verbesserung der EE gehen häufig nicht über imagefördernde Maßnahmen hinaus. Aktuell besteht auch keine transparente Möglichkeit, um die Wirkung einer Verbesserungsmaßnahme als konkreten Mehrwert für den Betreiber auszuweisen. Die Verbesserung, die sich durch teure Maßnahmen wie Leichtbau, wirkungsgradverbesserte Antriebe oder den Einsatz teurer Energiespeichermaßnahmen ergibt, kann bis jetzt für einen Anwendungsfall nicht genau prognostiziert und bewertet werden. Durch eine transparente und vergleichbare Bewertung der EE mittels Kennzahlen

bestünde somit für die Hersteller eine Möglichkeit die Wirkung von Verbesserungsmaßnahmen transparent darzustellen.

1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung des Projekts ist die Entwicklung eines kennzahlbasierten Ansatzes zur Bewertung der EE von RBG. Diese Methodik soll für im Behälterbereich eingesetzte automatische Kleinteilelager (AKL) und für im Palettenbereich eingesetzte automatische Palettenlager (APL) anwendbar sein. Dazu sollen gezielt Berechnungsvorschriften entwickelt werden, die sowohl einzelne technische Aspekte als auch die gesamte logistische Leistung eines RBG bewerten können. Die wesentliche Herausforderung besteht in der Berücksichtigung der Vielzahl an Einflussgrößen. Die Bewertung soll über einen Vergleich des Energiebedarfs mit dem daraus resultierenden Nutzen erfolgen. Die Leitfrage, die im Rahmen des Forschungsprojekts beantwortet werden soll, lautet demnach:

„Wie kann die Energieeffizienz unterschiedlicher Regalbediengeräte vergleichend bewertet werden?“

Dazu sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- a. Wie wirken sich unterschiedliche physikalische Einflussgrößen auf die EE eines RBG aus?
- b. Welche Einflussgrößen beschreiben den logistischen Nutzen beim Betrieb eines Regalbediengerätes?
- c. Wie lassen sich Geräte bei verschiedenen Laststufen untersuchen?
- d. Wie sieht eine geeignete Bewertungsmethodik für die EE von Regalbediengeräten aus?

1.3 Vorgehensweise und Lösungsweg

Die Vorgehensweise zur Erreichung des Forschungsziels orientiert sich an den im Antrag festgeschriebenen Arbeitspaketen des Projekts. Das Forschungsprojekt ist in sechs Arbeitspakete aufgeteilt. Die Arbeitspakete sind mit ihrer zeitlichen Abfolge in Abbildung 1-2 dargestellt. Im ersten Arbeitspaket wurde eine umfassende Analyse der Literatur durchgeführt. Während der gesamten Projektlaufzeit wurden die zu diesem

Thema erscheinenden relevanten Veröffentlichungen analysiert. Die Ergebnisse sind in Kapitel 2 zusammengefasst.

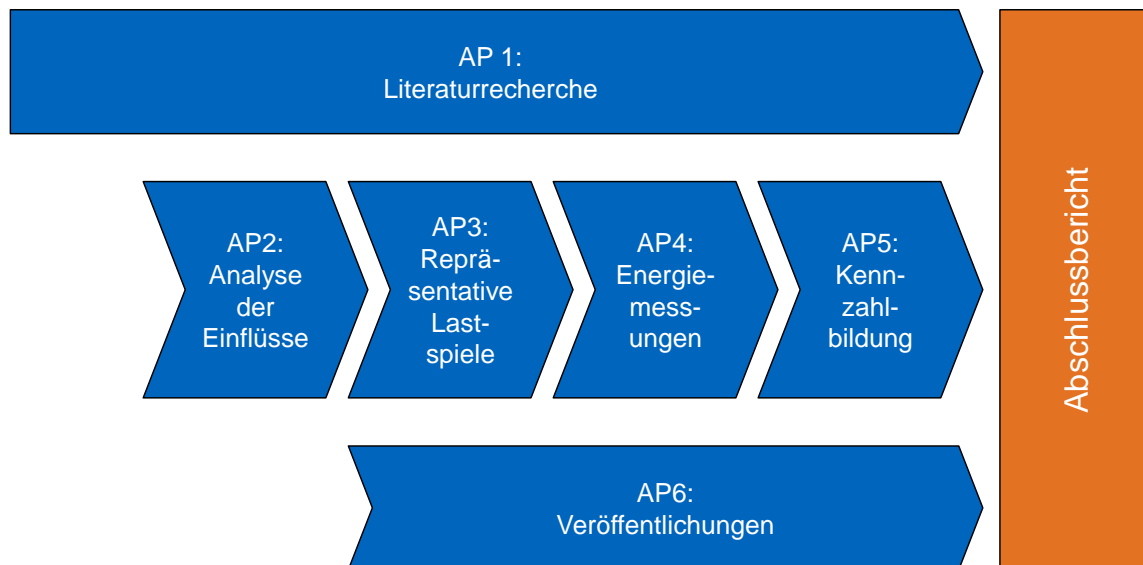


Abbildung 1-2: Arbeitspakete des Forschungsprojekts

Nach der Analyse der Literatur wurden im nächsten Arbeitspaket die relevanten Einflussfaktoren auf die EE eines RBG untersucht. Dabei wurden insbesondere der Energiebedarf und der logistische Nutzen eines RBG betrachtet. Diese Untersuchungen sind in Kapitel 3 dokumentiert. Zusätzlich werden in Kapitel 4 verschiedene Bewertungsszenarien für die EE-Bewertung vorgestellt. Arbeitspaket 3 beinhaltet eine Untersuchung zum mittleren Energiebedarf und die Entwicklung repräsentativer Fachanfahrten von RBG. Dabei wurde auf Basis eines Simulationsmodells nach Fachanfahrten gesucht, die den repräsentativen Betrieb eines RBG abbilden. Mit Hilfe dieser Fachanfahrten sollen Referenzspiele für den Vergleich unterschiedlicher Geräte entwickelt werden. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5 dokumentiert. Um RBG nicht nur simulativ zu untersuchen, wurden im Arbeitspaket 4 umfassende Leistungsmessungen an verschiedenen RBG durchgeführt. Diese Messungen und ihre Ergebnisse sind in Kapitel 6 dokumentiert. Die aus den vorhergehenden Arbeitspaketen gewonnenen Erkenntnisse werden genutzt, um im Arbeitspaket 5 die Bewertungsmethodik zu entwickeln (Kapitel 7). Kapitel 8 beschreibt den im Rahmen von Arbeitspaket 5 entwickelten Softwaredemonstrator. In Kapitel 9 werden die gewonnenen Forschungserkenntnisse noch einmal kurz zusammengefasst und abschließend wird ein Ausblick auf die weitere Forschungsarbeit gegeben.

2 Stand der Technik und der Forschung

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über den aktuellen Stand der Technik automatischer Lagersysteme und RBG gegeben. Am Schluss des Kapitels folgt eine Analyse des Standes der Forschung zu Energiebedarf und EE von RBG.

2.1 Beschreibung des Systems Hochregallager

Automatische HRL stellen heute einen wichtigen Bestandteil moderner Intralogistiksysteme dar. Ihre Hauptfunktionen sind das Ein-, Auslagern und das Speichern von Lagergütern. Zusätzlich finden innerhalb eines HRL Umlagervorgänge statt. In der VDI Richtlinie 2690 werden einem HRL und seinem zugehörigen Fördertechnikbereich insgesamt fünf Funktionen zugeordnet. Dazu zählen neben der Ein-, Um- und Auslagerung noch die Direktförderung und das Kommissionieren [VDI-2690, S. 4f.]. Diese beiden Nebenfunktionen spielen aber für die RBG im HRL nur eine untergeordnete Rolle. HRL werden in der gesamten Produktionskette von Waren eingesetzt. Der Einsatzbereich ist nicht auf Warengruppen, Fertigungsbereiche oder einzelne Branchen beschränkt, sie werden sowohl im Rohstoff-, im Zwischenprodukt- und auch im Fertigproduktbereich eingesetzt. [VDI-2690, S. 2]. Ein HRL besteht aus seiner Regalkonstruktion mit den dazugehörigen Bedien- und Fördergeräten. Das HRL mit RBG kann als abgeschlossener Bereich gesehen werden. In diesem befinden sich die Lagergassen mit jeweils zwei gegenüberstehenden Regalwänden. Automatisch bediente HRL zeichnen sich durch hohe Lagerkapazitäten bei gleichzeitig guter Raumnutzung und einem hohen Automatisierungsgrad aus. [Atz-2016, S. 7ff.]

Eine schematische Darstellung eines HRL ist in Abbildung 2-1 zu sehen. Darin wird auch die grundlegende Nomenklatur beschrieben. Die RBG fahren zwischen Regalwänden in Lagergassen und lagern aus Regalfächern Ladeeinheiten ein und aus. Diese werden an Übergabepunkten zum Weitertransport im Logistikzentrum an die periphere Fördertechnik übergeben.

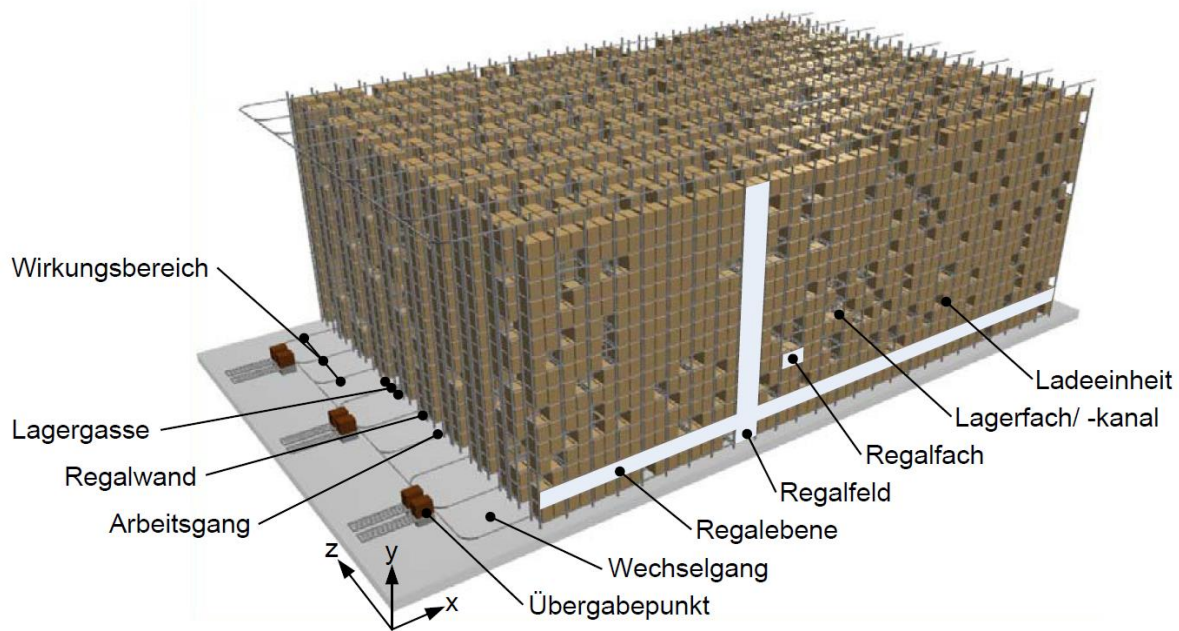


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines HRL [Atz-2016, S. 9]

Als Besonderheit ist in dieser Darstellung ein HRL zu sehen, dessen RBG zwischen den Gassen hin und her wechseln können. Dies wird durch ein Schienensystem im sogenannten Wechselgang ermöglicht. Das gezeigte Koordinatensystem wird analog auch in dieser Arbeit verwendet. Eine Regalebene erstreckt sich dabei horizontal in x-Richtung durch das Lager, während sich ein Regalfeld vertikal in y-Richtung im Lager befindet. Quer zur Lagergasse liegen die in z-Richtung die Lagerfächer. Diese sind entweder einzeln, oder bei mehrfachtiefer Lagerung in Kanälen angeordnet. HRL können natürlich nicht nur über RBG bedient werden, sondern auch über Kanalfahrzeugsysteme oder Schmalgangstapler. Nachdem diese aber im Forschungsprojekt nicht näher untersucht werden, erfolgt hier keine detaillierte Beschreibung. In der Praxis kommt meist ein anderes Koordinatensystem zum Einsatz. In diesem erstreckt sich ein Regalfeld vertikal in z-Richtung und die y-Richtung läuft quer zur Lagerwand.

2.2 Beschreibung des Systems Regalbediengerät

Bevor das RBG näher beschrieben wird, soll zunächst genauer erläutert werden, was ein RBG überhaupt ist / welche Merkmale ein RBG aufweist. In der Literatur sind mehrere Definitionen / Merkmale für ein RBG zu finden:

- Regalbediengeräte sind schienengeführte Fördereinrichtungen, die für das Umschlagen von Einheitsladungen in Regallagern benutzt werden [Gri-2015, S. 141f.; Mar-2009, S. 380ff.]
- Regalbediengeräte dienen zur störungsfreien manuellen oder automatischen Ein- und Auslagerung von Ladeeinheiten in und aus frei zu wählenden Lagerfächern [FEM-9831; Mar-2009, S. 380ff.]
- Sie kommen insbesondere auch bei sehr großen Regalhöhen zum Einsatz [Gri-2015, S. 141f.; Pfe-1977, S. 138ff.]
- Regalbediengeräte bilden mit den übrigen Komponenten des Hochregallagers eine Funktionseinheit [FEM-9831]
- Systematische Einordnung des Fördermittels im Lager: Fördermittel zum Ein- und Auslagern → unstetig → Regalbediengerät [Hom-2007, S. 58]

Fasst man die Kernpunkte zusammen so ergeben sich folgende Gemeinsamkeiten, die ein RBG ausmachen:

- Schienengeführt
- Umschlagen von Einheitsladungen (Paletten, Behälter oder Sonderladungsträger)
- Ein- und Auslagerung
- Automatisch oder manuell bedient
- Große Regalhöhen

Große Regalhöhen sind in diesem Zusammenhang relativ zu sehen. Es gibt eine Grenze bis zu der ein Schubmaststapler ein Regal noch bedienen kann. Allerdings werden auch RBG / HRL gebaut, die diese Höhe unterschreiten. Deswegen ist die Bauhöhe kein Kriterium zur Identifikation eines RBG. Vereinzelt schlagen RBG keine Einheitsladungen um, zum Beispiel gibt es auch Geräte, die komplette Kraftfahrzeuge ohne zusätzliches Ladehilfsmittel bewegen.

Der gängige Aufbau eines RBG ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Ein RBG verfügt über zwei Hauptantriebe – Fahr- und Hubantrieb – die das RBG entlang der Hauptrichtungen durch das Lager bewegen. Die Versorgung mit elektrischer Energie erfolgt, ausgehend vom stationären Schaltschrank, über Schleifleitungen. Das RBG fährt mit seinem Fahrwerk auf der Fahrschiene und stützt sich mit seinem Mastkopf an der Führungsschiene ab. Einzelne Hersteller realisieren auch Bauweisen, bei denen am Mastkopf ein zusätzlicher Antrieb sitzt. Damit lässt sich eine aktive Mastpendeldämpfung realisieren.

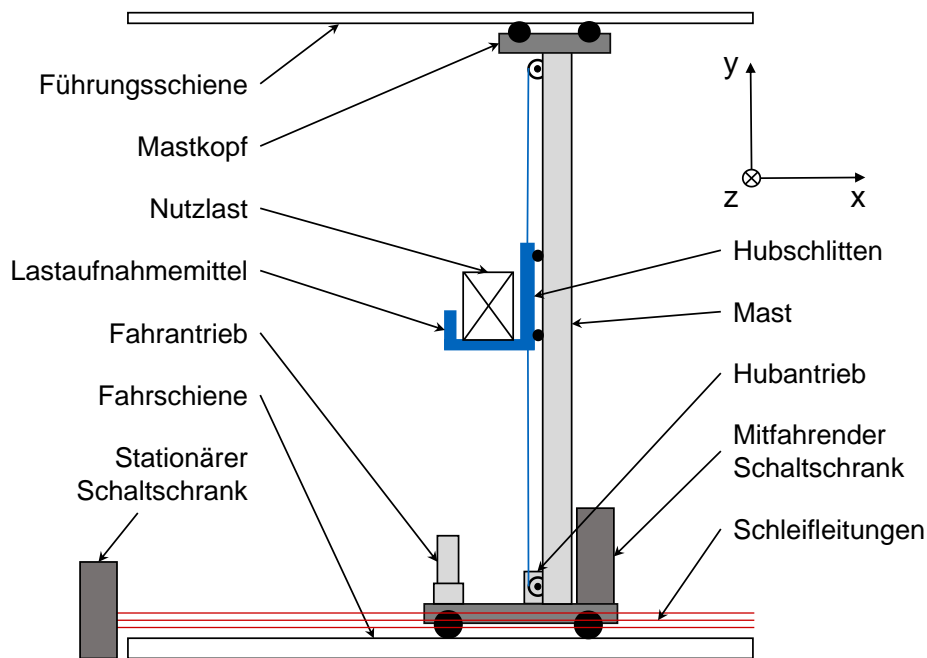


Abbildung 2-2: Schematischer Aufbau eines RBG (vgl. [Rüc-2018a; Rüc-2018b])

Die Terminologie von RBG und ihrer Peripherie ist in [FEM-9101] festgehalten. RBG werden unter anderem nach Berechnungsgrundlagen aus folgenden FEM Richtlinien ausgelegt [FEM-9311; FEM-9832; FEM-9512; FEM-9831]. Bei der Abnahme eines Gerätes durch den Betreiber wird auch heute meist noch ein Leistungstest zur Ermittlung der Spielzeit nach [FEM-9851] durchgeführt. In ihr wird ein standardisierter Leistungstest beschrieben, der beim Abnahmeprozess eines RBG durch den Betreiber erfolgen kann. Dieser Leistungstest findet auch in der älteren VDI Richtlinie [VDI-3561] bereits Erwähnung.

Automatische HRL, die mit RBG betrieben werden, weisen eine große Bauformvarianz auf. Diese ist in Abbildung 2-3 illustriert. Hier werden einerseits die Eigenschaften eines Lagers auf der x-Achse und andererseits die Eigenschaften eines RBG auf der y-Achse dargestellt. In der Abbildung sind verschiedene Eigenschaften und ihre Ausprägungen auf Unterachsen dargestellt.

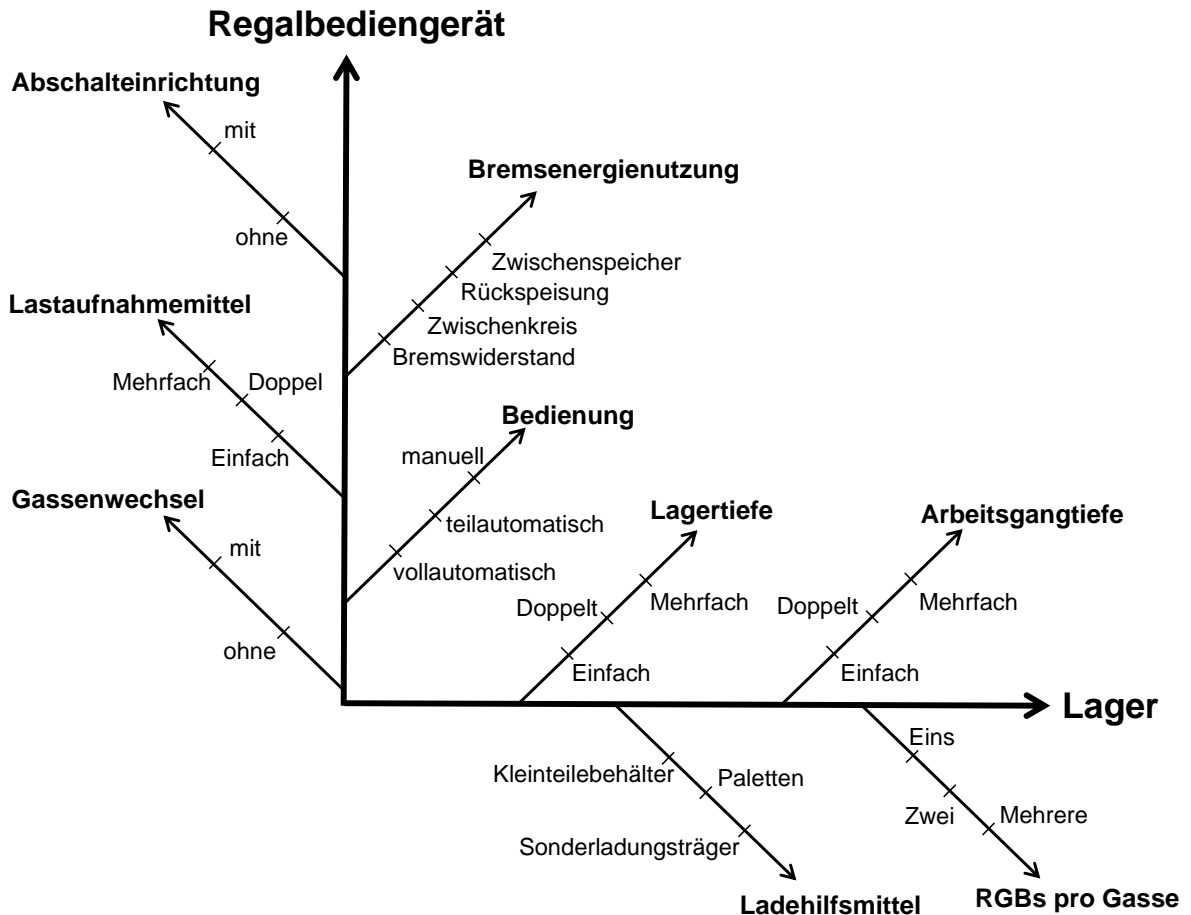


Abbildung 2-3: Bauformvariation von automatischen HRL mit RBG (vgl. [Boy-2016; Rüc-2017])

Anhand der Abbildung wird schnell deutlich, dass ein System HRL samt RBG durch die Auswahl jeweils einer Eigenschaftsausprägung von den Unterachsen erzeugt werden kann. Die tatsächliche Realisierung eines solchen Systems beinhaltet auf Grund der Auswahl auf der Komponentenebene noch deutlich mehr verschiedene Varianten. Die Problematik der Bauformvariation wurde bereits in [Rüc-2017] beschrieben und veröffentlicht.

2.3 Analyse des Standes der Forschung

Der Stand der Forschung ist an den in [Rüc-2018b] veröffentlichten Stand der Forschung angelehnt. Eine erste zentrale Veröffentlichung von *Bozer und White* stammt aus dem Jahr 1984. In [Boz-1984] wurden die Grundlagen zur Fahrzeitberechnung von RBG in HRL aufgezeigt. Eine umfangreiche Übersichtsarbeit zum Stand der Forschung wurde 2009 von *Roodbergen und Vis* in [Roo-2009] veröffentlicht. In dieser

Arbeit wurde Literatur der letzten 30 Jahre analysiert und die Erkenntnisse gebündelt dargestellt. Eine Analyse zum Durchsatz und der Fahrzeit bei doppelstiefiger Lagerung mit Doppellastaufnahmemitteln wurden von *Xu et al.* in [Xu-2014] veröffentlicht. Eine neuere Übersichtsarbeit zum Thema automatische HRL mit RBG, deren Fokus aber hauptsächlich auf Lagerplatzzuordnung liegt, wurde 2016 von *Boysen und Stephan* in [Boy-2016] veröffentlicht.

Der Fokus auf den Energiebedarf in der Forschung entwickelte sich erst in den letzten Jahren. Es entstanden zahlreiche Veröffentlichungen, die sich mit der systematischen Untersuchung des Energiebedarfs von automatischen HRL beschäftigt haben. Dabei hat insbesondere die Untersuchung von RBG eine große Rolle gespielt. Erste Ergebnisse zum Einfluss kinematischer Parameter, wie Beschleunigung und Geschwindigkeit, wurden 2012 von Schulz et al. veröffentlicht [Sch-2012a]. In der Arbeit wurde deren Einfluss auf Energiebedarf und Fahrzeit untersucht und eine Berechnungsmethode für die optimale Kopplung beider Antriebe vorgestellt. In einer nachfolgenden Arbeit wurde eine Untersuchung der energetischen Zonierung von Lagerfronten in einem HRL vorgestellt [Sch-2012b]. Diese Arbeiten stellen eine erste Grundlage zur methodischen Untersuchung des Energiebedarfs auf Basis von Messung und Simulationsmodellen dar. Zwei Arbeiten, die sich mit unterschiedlichen Steuerungsstrategien und ihrem Einfluss auf den Energiebedarf von RBG beschäftigen, wurden von *Meneghetti und Monti* veröffentlicht. Diese Arbeiten [Men-2011; Men-2013] basieren auf Simulationsstudien. Ein erster Ansatz zur Bestimmung der EE eines AKL wurde 2013 von *Lerher et al.* in [Ler-2013] präsentiert. Dieser Ansatz sieht eine Gegenüberstellung von Energiebedarf und Durchsatz vor. Zusätzlich haben die Autoren den CO₂-Ausstoß, der durch den Betrieb entsteht, mitberücksichtigt. Mit den Umweltaspekten in der Lagertechnik haben sich auch *Braun et al.* beschäftigt. Braun et al. veröffentlichte 2012 eine Untersuchung zu den verbrauchten Ressourcen während des kompletten Lebenszyklus eines automatischen HRL [Bra-2012]. 2014 haben sich *Zadek et al.* in [Zad-2014] mit energieeffizienten Steuerungsstrategien von fördertechnischen Systemen beschäftigt. In dieser Arbeit wurde insbesondere auch an Steuerungsstrategien zur Steigerung der EE von RBG gearbeitet. Zwei wichtige Dissertationen, die sich mit der Untersuchung von RBG befassen, sind 2016 erschienen. Eine Dissertation umfasst Untersuchungen zum Energiebedarf und beschäftigte sich dabei insbesondere mit Leistungsmessungen an RBG [Bra-2016]. Gleichzeitig hat *Ertl* in [Ert-2016] eine umfangreiche Untersuchung des Energiebedarfs auf Basis von Simulationen durchgeführt. In seiner Arbeit stellt er auch ein erstes Konzept zur Bewertung der logistischen Leistung eines AKL vor. Dieses Konzept wurde bereits 2013 in [Ert-2013; Ert-2014] vorgestellt.

Diese Arbeit diente als Ausgangsbasis für das bearbeitete Forschungsprojekt. Ein erster Ansatz, der über die Betrachtung des Energiebedarfs eines einzelnen RBG hinausgeht, wurde von *Hahn-Woernle und Günthner* [Hah-2017] veröffentlicht. Die Arbeit beschäftigt sich mit dem Zusammenspiel von mehreren RBG, ihrem kombinierten Leistungsbedarf und wie sich die gesamte, vom System aufgenommene, elektrische Leistung mit Hilfe einer Softwareanpassung begrenzen lässt. Eine übergreifende Methode zur Bewertung der Energieeffizienz verschiedener Lagersysteme wurde von *Stöhr et al.* in [Stö-2018] veröffentlicht. Darin werden AKL, Shuttlelager und Karusselllager auf Basis eines Referenz-Doppelspiels verglichen.

Der Energiebedarf von kompletten intralogistischen Anlagen ist in der Ausschreibungs- und Angebotsphase meist noch ein unbekannter Faktor. Um eine vergleichbare Berechnungsgrundlage zu schaffen, wurde die [FEM-9865] veröffentlicht. Ein erster Ansatz für eine Energieeffizienzbewertung im Bereich der Hebezeuge ist in der VDI 4707 [VDI-4707a; VDI-4707b] vorgestellt worden. In dieser Richtlinie wird eine Methode zur quantifizierten Bewertung der EE von Personenaufzügen vorgestellt.

Neue alternative Ansätze, um Waren in HRL automatisch ein- und auszulagern, wie Seilroboter, wurden zum Beispiel von *Sturm und Bruckmann* in [Stu-2014] vorgestellt. Eine Übersichtsarbeit zum Einsatz von Seilrobotern in der Intralogistik wurde dann 2018 von *Alias et al.* in [Ali-2018] veröffentlicht. Seilroboter stellen auf Grund des deutlich besseren Nutzlast zu Gesamtmasse Verhältnisses eine energieeffiziente Alternative zu einem RBG dar. Von der Firma Westfalia gibt es bereits eine abgewandelte Lösung für ein flurfreies RBG, dessen Hubwerk als reine Seilhubwerkslösung ausgeführt ist. Dabei ist das LAM des RBG ähnlich einer Traverse zum Anheben von Containern an vier Seilen aufgehängt. Mit der alternativen Konstruktion von RBG und insbesondere dem Einsatz von Faserverbundwerkstoffen hat sich *Wahle* in [Wah-2014] befasst. Er stellt in diesem Beitrag ein neuartiges Tragwerk für ein RBG im Kleinteilebereich vor. Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen, insbesondere zur Dämpfung von Mastschwingungen, wurde von *Zhakov et al.* in [Zha-2016] und [Zha-2017] untersucht.

3 Einflussfaktoren auf Energiebedarf und Nutzen

Beim Betrieb von RBG ergeben sich eine große Anzahl an Einflussfaktoren auf deren EE. Die EE wird zunächst einmal als ein Verhältnis aus Energiebedarf zu logistischem Nutzen beschrieben. In diesem Kapitel wird zuerst auf die Einflussfaktoren des Energiebedarfs und dann auf die des logistischen Nutzens eingegangen.

3.1 Einflussfaktoren auf den Energiebedarf

Zunächst wurden im Zuge der Analyse alle Einflussfaktoren gesammelt. Dazu wurde eine Vielzahl an Quellen, die im Stand der Technik beschrieben wurden, analysiert. Am Beginn wurden die Einflussfaktoren zunächst in zwei Haupteinflussfelder – strategische und physikalische Einflüsse – kategorisiert. Die zwei Haupteinflussfelder mit ihren Untergruppen sind in Abbildung 3-1 dargestellt.

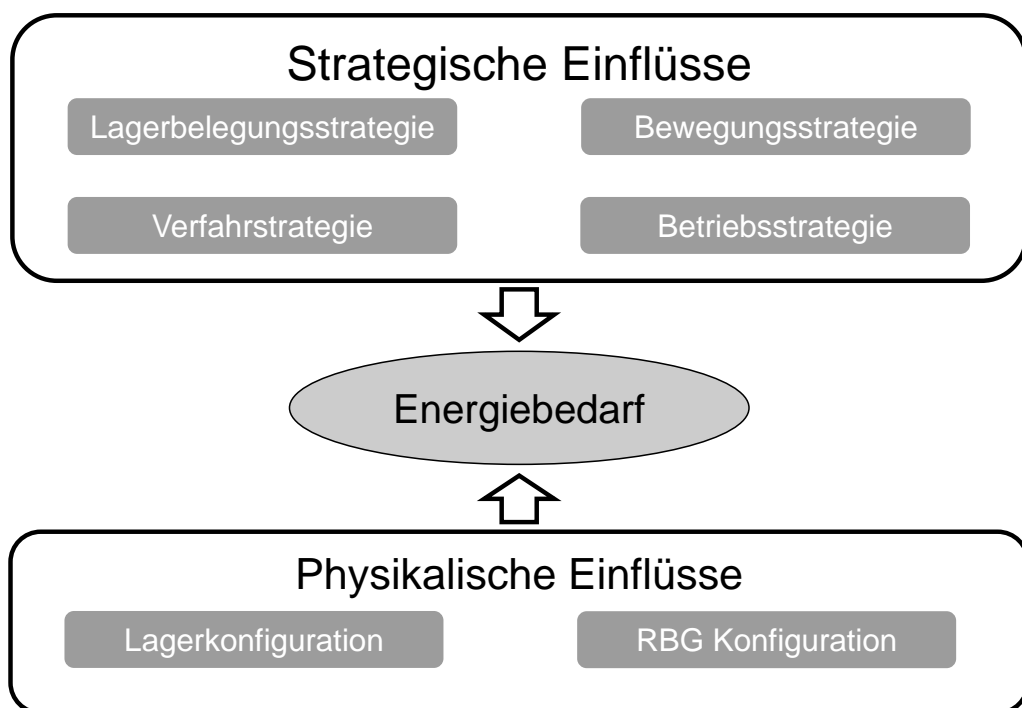


Abbildung 3-1: Einflussfelder auf den Energiebedarf (vgl. [Rüc-2018b])

Innerhalb dieser Haupteinflussfelder sind verschiedene Untergruppen an Einflüssen identifiziert worden. Auf der strategischen Seite stehen die vier Strategien – die Lagerbelegungsstrategie, die Bewegungsstrategie, die Verfahstrategie und die Betriebsstrategie. Auf der physikalischen Seite wird zwischen Lagerkonfiguration und RBG Konfiguration unterschieden. Die Einteilung in die zwei Haupteinflussfelder kann auch in der Darstellung der Ebenen eines Lagersystems nachvollzogen werden. Im Lager existiert die übergeordnete Prozessebene, die das Enterprise-Resource-Planing System, das Lagerverwaltungssystem und den Materialflussrechner beinhaltet. Unterhalb dieser Ebene befinden sich die Geräte- und die Komponentenebene. Diese beiden Ebenen bilden auch nahezu die strategischen und die physikalischen Einflüsse ab. Die Ebenen sind in Abbildung 3-2 dargestellt.

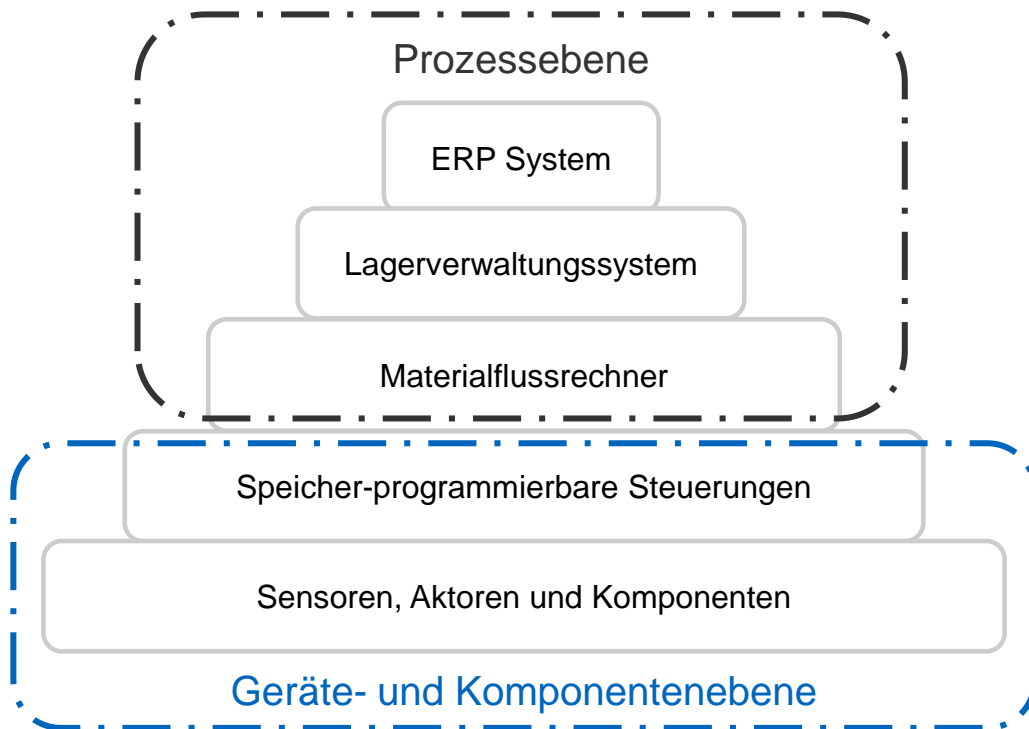


Abbildung 3-2: Ebenen innerhalb eines Lagersystems (vgl. [Rüc-2018c] und [Lot-2016, S. 42])

Die physikalischen und strategischen Einflüsse werden nachfolgend näher beschrieben. Eine komplette Zusammenstellung aller identifizierten Einflussfaktoren mit Ausprägungen ist als Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm) in Anhang A dargestellt.

3.1.1 Strategische Einflüsse

Die strategischen Einflüsse beinhalten vier Untergruppen: die Lagerbelegungsstrategie, die Bewegungsstrategie, die Verfahstrategie und die Betriebsstrategie.

Lagerbelegungsstrategie

Innerhalb der Lagerbelegungsstrategie wurden vier verschiedene Unterstrategien identifiziert:

1. Fachbelegungsstrategie:
Diese befasst sich damit, welche Artikel an welcher Position im Lager gelagert werden sollen. Man spricht auch von der Lagerplatzzuordnung. Wenn keine spezielle Lagerplatzzuordnung vorliegt, dann spricht man von chaotischer Lagerplatzzuordnung.
2. Sequenzierungsstrategie:
In der Sequenzierung wird festgelegt in welcher Reihenfolge und in welchen Spieltypen (Einzel-, Doppel- oder Mehrfachspiel) die Ein- und Auslageraufträge abgearbeitet werden sollen.
3. Umlagerstrategie:
Die Umlagerstrategie kommt bei mehrfachtiefer Lagerung zum Einsatz. Bei dieser muss definiert werden, wohin ein Lagergut, das den Zugriff auf ein anderes Lagergut behindert, umgelagert werden soll.
4. Bewegungsstrategie:
Die Bewegungsstrategie beinhaltet die verschiedenen Spieltypen. Bei einem RBG mit einem LAM können Einzel- und Doppelspiele ausgeführt werden. Ein Einzelspiel besteht aus einer Ein- oder einer Auslagerung. Ein Doppelspiel besteht aus einer Ein- und einer anschließenden Auslagerung. Bei zwei LAM können Vierfachspiele durchgeführt werden. Diese beinhalten dann zwei Ein- und zwei Auslagerungen.
Zusätzlich beinhaltet die Bewegungsstrategie auch die Gangwechselstrategie. Diese definiert wie ein RBG, das zwischen den einzelnen Gängen hin und her wechseln kann, über Gangwechsel entscheidet.

Verfahstrategie

Im Rahmen der Verfahstrategie wird über Anpassungen der Bewegungsgeschwindigkeiten, insbesondere der Fahrgeschwindigkeit, des RBG entschieden. Die Verringerung

rung der Fahrgeschwindigkeit führt zu einer Verringerung des Energiebedarfs. Grundsätzlich wird dabei unterschieden, ob die Verringerung der Fahrgeschwindigkeit den Durchsatz beeinflussen darf oder nicht.

Betriebsstrategie

Unter Betriebsstrategie wird die Planung der Einsatzzeit des RBG verstanden. In der Betriebsstrategie werden drei verschiedene Aspekte behandelt:

1. Verhältnis von Betriebs- und Stillstandszeit
Hier lassen sich verschiedene Formen des Schichtbetriebs unterscheiden – Ein-, Zwei- oder Mehrschichtbetrieb.
2. Interaktion des RBG mit seinem Umfeld
In diesem Einflussfaktor sind Lastübergabe-, Warte- und Störzeiten enthalten.
3. Abförder- und Zuförderstrategien
Hierunter werden die Strategien verstanden, die den Zu- und Abfluss von Lagergut zum HRL steuern.

3.1.2 Physikalische Einflüsse

Die physikalischen Einflüsse beinhalten zwei Untergruppen, die Lagerkonfiguration und die RBG Konfiguration.

Lagerkonfiguration

In der Lagerkonfiguration wurden sieben verschiedene Aspekte betrachtet:

1. Lagergut
Hierunter werden die verschiedenen Ladungsträger wie Kleinladungsträger (KLT), Tablare, Paletten, Gitterboxen und Sonderladungsträger verstanden.
2. Lagerausdehnung
Diese gibt die Anzahl an Ebenen und Feldern, die Regalabmessungen, die Lagerfachabmessungen und damit die Stellplatzanzahl im HRL an.
3. Beweglichkeit des Regals
Hierunter wird verstanden, ob sich einzelne Teile des Regals (z.B. Karusselllager) bewegen lassen.
4. Lagertiefe
Beschreibt die Anzahl an Lagergütern, die hintereinander gelagert werden können.

5. **Arbeitsgangtiefe**
Beschreibt die Anzahl an Lagergütern, die hintereinander auf einem LAM gelagert werden können.
6. **Lage und Anzahl der E/A Punkte**
In diesem Einflussfaktor wird die Lage und die Anzahl der Übergabepunkte, zwischen HRL und peripherer Fördertechnik, beschrieben.
7. **Anzahl RBG pro Gasse**
Gibt die Anzahl an RBG, die hintereinander in einer Gasse betrieben werden, an.

RBG Konfiguration

Innerhalb der RBG Konfiguration wurden 16 verschiedene Aspekte betrachtet:

1. **Bremsenergienutzung**
Dieser Einflussfaktor beschreibt die Nutzung der Bremsenergie durch Zwischenkreiskopplung, Energierückspeisung oder Energiespeicher. Wenn nur ein Bremswiderstand verbaut ist, dann erfolgt keine Bremsenergienutzung.
2. **Abschalteinrichtungen**
In diesem Einflussfaktor werden Abschaltseinrichtungen, die mindestens einen Teil der Grundlastverbraucher abschalten, betrachtet.
3. **Lage der Antriebe**
Hierunter wird verstanden, ob die Antriebe am RBG oder stationär in der Gasse verbaut sind. Fahrtriebe mit umlaufenden Riemen können auch stationär verbaut sein.
4. **Art des Fahrtriebs**
Hierunter wird die Bauart des Fahrtriebs z.B. Riemen-, Zahnstangen oder Reibradantrieb, verstanden.
5. **Art des Hubtriebs**
Hierunter wird die Bauart des Hubtriebs, also Riemen- oder Seilhubwerk, verstanden.
6. **Anzahl der Masten**
Beschreibt die Anzahl der Masten des RBG. Hierbei werden Ein-, Zwei oder Mehrmastgeräte unterschieden.
7. **Anzahl LAM**
Beschreibt die Anzahl der Lastaufnahmemittel am RBG.
8. **Bauart LAM**
Hier wird zwischen den zwei grundlegenden Bauarten, den ziehenden und den

hebenden LAM, unterschieden. Die ziehenden LAM überwinden bei der Bewegung von Lagergütern hauptsächlich die Reibungsenergie. Sie ziehen und schieben die Lagergüter aus und in die Regalfächer. Die hebenden LAM unterfahren die Lagergüter und heben Sie aus dem Regalfach, oder setzen sie entsprechend im Regalfach ab.

9. Kinematische Parameter der Antriebe (Fahrwerk und Hubwerk)

In diesem Einflussfaktor werden die kinematischen Parameter, wie Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit, der Hauptantriebe zusammengefasst.

10. Abmessungen

Hier sind die kompletten Abmessungen des RBG zusammengefasst.

11. Massenverteilung

Beschreibt die Masse der einzelnen Komponenten und die Gesamtmasse des RBG.

12. Gangkonfiguration

Die Gangkonfiguration beschreibt, ob ein RBG gassengebunden arbeitet oder die Gasse innerhalb des HRL wechseln kann.

13. Krafteinleitung

Hierin wird beschrieben, ob das RBG am Boden oder am Regal verfährt oder hängend von der Decke verfahren wird.

14. Wirkungsgrade

Hierin werden die Wirkungsgrade aller Komponenten zusammengefasst.

15. Pendeldämpfung

Dieser Einflussfaktor beschreibt Maßnahmen zur Mastpendeldämpfung. Hierunter werden passive Maßnahmen, wie Dämpfermodule und aktive Maßnahmen, wie die Bewegungssteuerung und Anti-Pendel-Antriebe verstanden.

16. Automatisierungsgrad

Beschreibt, ob es sich um ein voll- oder teilautomatisches oder um ein manuelles RBG handelt.

3.1.3 Thermische Bilanz an einem RBG

Im Rahmen der Untersuchung der Einflussfaktoren auf den Energiebedarf ist folgende Frage aufgetaucht: Was geschieht in einem HRL mit der elektrischen Energie? Folgende These wurde entwickelt: „Die komplette elektrische Energie, die für den Betrieb eines RBG gebraucht wird, wird in Wärme umgewandelt.“ Die Voraussetzungen unter denen diese These gilt sind:

- Der Ein- und der Auslagerpunkt befinden sich auf derselben Höhe.

- Das Lagergut ändert seine Masse während der Verweildauer im Lager nicht.
- Die Energie, die in Licht umgewandelt wird und anschließend nicht mehr in Wärme, ist vernachlässigbar.
- Es treten kaum plastische Verformungen an Elementen im Lager auf.

Diese These stützt sich darauf, dass nur potentielle Energie in ein Lagergut eingebracht wird, wenn dessen Potential erhöht wird. Dieses Potential wird aber bei der Auslagerung wieder abgerufen. Das gilt, solange der Betrachtungszeitraum lange genug und der Lagerfüllgrad konstant ist. Es lassen sich folgende Fälle betrachten: Das RBG fährt in horizontaler Richtung und die Last wird nicht angehoben, dann ergibt sich der Energiebedarf für die Fahrbewegung zu:

$$E_{el,x} \cdot \eta_x = E_{kin} + E_{W,R,x} + E_{W,L,x} \quad (3-1)$$

Verluste, die nicht in den Reibungs- $E_{W,R}$ und Luftwiderstandsverlusten $E_{W,L}$ enthalten sind, sind im Wirkungsgrad η_x zusammengefasst. Die kinetische Energie bei Bremsvorgängen wird entweder über eine Rückspeiseeinheit wieder zurückgespeist und reduziert den Energiebedarf oder wird in Wärme umgewandelt. Für die Hubbewegung gilt analog folgender Zusammenhang:

$$E_{el,y} \cdot \eta_y = E_{pot} + E_{W,R,y} + E_{W,L,y} \quad (3-2)$$

Auch hier gilt, dass sämtliche Verluste, die nicht in den Reibungs- und Luftwiderstandsverlusten berücksichtigt werden, im Wirkungsgrad η_y zusammengefasst sind. Die potentielle Energie im Lager wird beim Einlagern erhöht. Beim anschließenden Auslagervorgang wird diese Energie beim Bremsen und Absenken wieder in Wärme umgewandelt, oder durch eine Energierückspeisung wieder ans Netz zurückgegeben. Dadurch wird der gesamte Energiebedarf reduziert. Der gesamte Energiebedarf ergibt sich nach Gleichung (3-3) aus dem Bedarf für Hub- und Fahrbewegung und der Grundlast E_{GL} .

$$E_{el,ges} = E_{el,x} + E_{el,y} + E_{GL} \quad (3-3)$$

Jegliche Maßnahme, die den gesamten Energieverbrauch reduziert, würde dann über längere Zeit auch den Wärmeeintrag reduzieren. Auch für die Realisierung eines Ener-

giespeichers ergibt langfristig eine Reduktion des Energiebedarfs. Zusätzliche Verbraucher wie die Leistungselektronik, Klimageräte, Lüftermotoren oder ähnliches produzieren nur Verlustleistung und damit Wärme.

Aus diesen Gründen wurde eine Untersuchung der Wärmequellen am RBG für sinnvoll erachtet. Diese Untersuchung ist im nachfolgenden Kapitel 3.1.4 dargestellt.

3.1.4 Verlustquellen an einem RBG

Die in diesem Kapitel dargestellten Untersuchungen und Erkenntnisse wurden im Rahmen einer Studienarbeit von *Preis* erarbeitet [Pre-2018]. Nachdem sich alle Verlustquellen durch eine Abgabe von Wärme auszeichnen, wurden in dieser Arbeit mit Hilfe einer Wärmebildkamera verschiedene Komponenten des lehrstuhleigenen RBG (RBG-1) untersucht. Details zum RBG-1 können in Kapitel 6.3 nachgelesen werden. Die verwendete Wärmebildkamera ist eine Seek Thermal CompactPRO, die zusammen mit einer Firmware von Seek und einem Android Smartdevice eingesetzt wird. Technische Daten der Kamera (vgl. [Pre-2018, S. 20], [See-2018]):

- Bildauflösung: 320×240 Pixeln (76800 Pixel)
- Aufnahmereichweite: ca. 15 cm bis 550 m
- Aufnahmewinkel: 32°
- Bildrate: > 15 Hz
- Temperaturmessbereich: -40°C bis 330°C
- Sensitivität: 0,070 K
- Wellenlängenbereich: $7,5 \mu\text{m}$ bis $14 \mu\text{m}$

Das vollständige Datenblatt ist über [See-2018] abrufbar. Die Wärmebildkamera und ihre Hülle sind in Abbildung 3-3 dargestellt.



Abbildung 3-3: Wärmebildkamera Seek Thermal CompactPro [Pre-2018, S. 20]

Mit Hilfe dieser Hardware wurde das Erwärmungsverhalten verschiedener Komponenten am RBG untersucht. Zum einen wurden der stationäre und der mobile Schaltschrank und zum anderen die Antriebskomponenten untersucht. Mit Hilfe der Kamera werden Videos der zu untersuchenden Komponenten aufgezeichnet und später ausgewertet. Ein Beispiel für eine Thermografieaufnahme des Hubwerk-Getriebes mit der Kamera ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

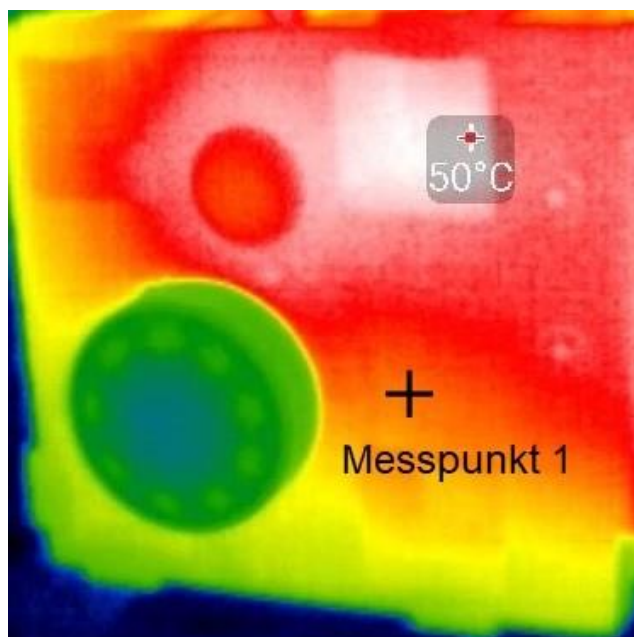


Abbildung 3-4: Thermografieaufnahme des Hubwerk-Getriebes [Pre-2018, S. 43]

Die Firmware zeichnet im Bild den aktuell wärmsten Punkt mit seiner Temperatur in °C ein. Zusätzlich ist in der Aufnahme ein Messpunkt eingezeichnet. Dieser Punkt wird

am Beginn der Temperaturlaufzeichnung definiert und an diesem Punkt wird der Temperatur-Zeit Verlauf ausgewertet.

An dieser Stelle werden exemplarische Ergebnisse der Untersuchung der Antriebskomponenten vorgestellt. Weitergehende Untersuchungen zum Warmlaufverhalten sind in Kapitel 6.4 beschrieben. Abbildung 3-5 zeigt den Versuchsaufbau für die Untersuchung des Fahrtriebs. In dieser Position wurden der Fahrmotor, das Getriebe und die Laufrolle betrachtet. Für die Messung wurde das RBG im Dauerbetrieb zwischen zwei Positionen alternierend hin und her bewegt.



Abbildung 3-5: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Fahrtriebs [Pre-2018, S. 37]

In Abbildung 3-6 sind die Ergebnisse der Untersuchung des Fahrtriebs als Zeit-Temperatur Diagramm dargestellt.

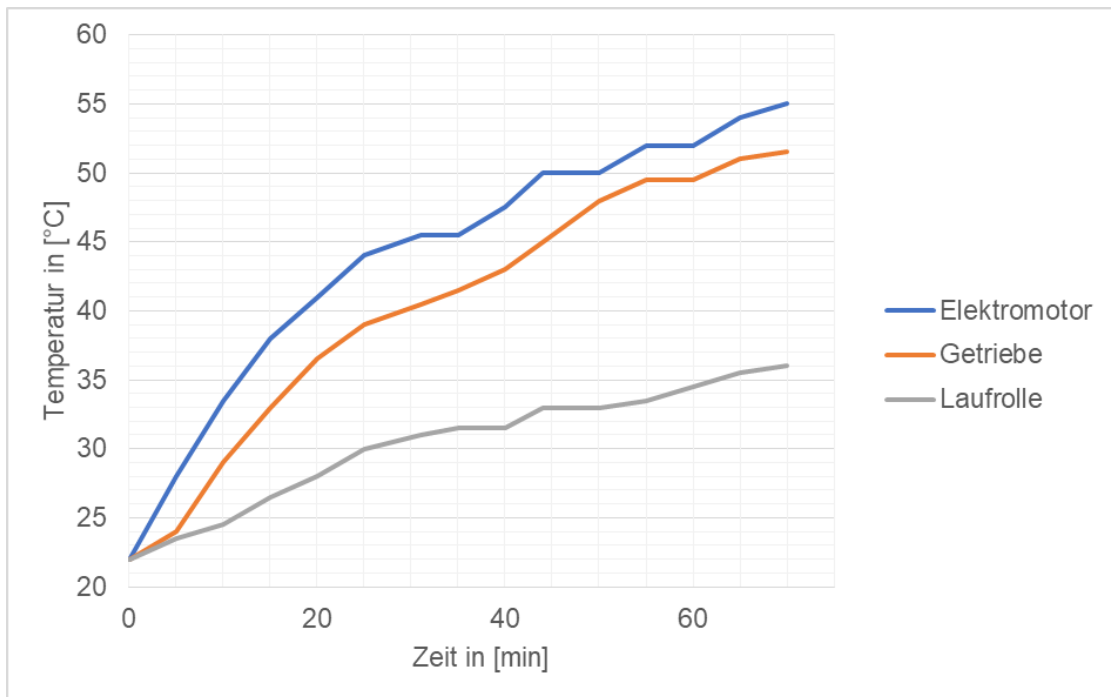


Abbildung 3-6: Zeit-Temperatur-Diagramm: Fahrtrieb x-Richtung [Pre-2018, S. 39]

Es zeigen sich die typischen exponentiellen Temperaturverläufe, die sich bei Erwärmung von Gegenständen einstellen. Motor und Getriebe erwärmen sich deutlich stärker, allerdings zeigen auch die Laufrollen ein deutliches Erwärmungsverhalten. Weitere Komponenten, die neben den Motoren, Getrieben und der Leistungselektronik in den Untersuchungen als Verlustquellen identifiziert wurden, sind die Führungsrollen von Fahr- und Hubwerk und die Stromabnehmer der Schleifleitung. In Abbildung 3-7 ist eine Aufnahme einer erwärmten Führungsrolle des Fahrwerks dargestellt. Diese erwärmt sich, im Vergleich zur Umgebungstemperatur von $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, um $\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

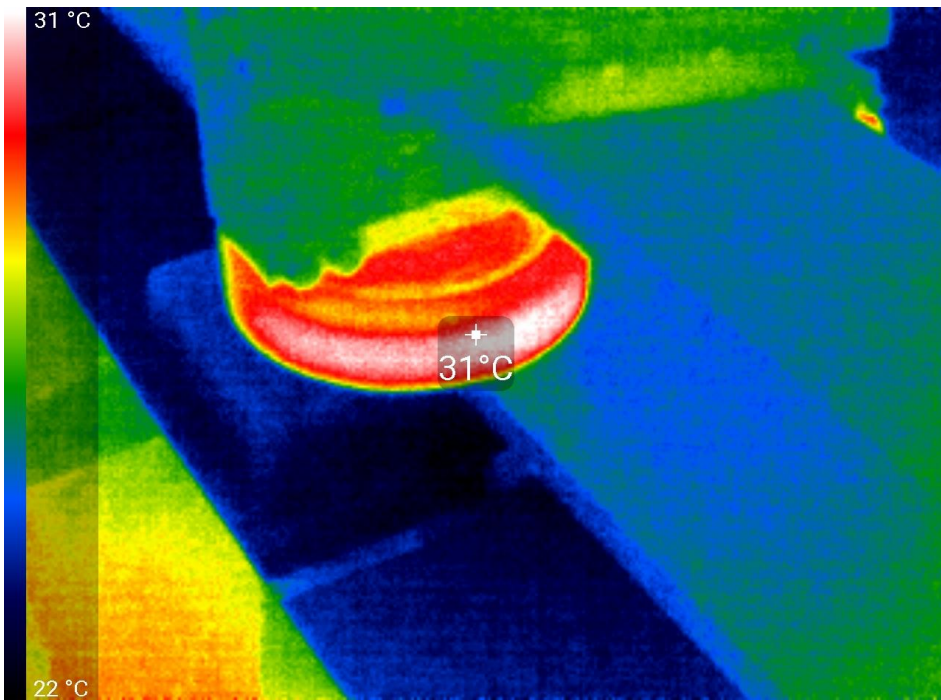


Abbildung 3-7: Thermografieaufnahme der Führungsrolle des Fahrwerks [Pre-2018, S. 42]

Abschließend ist in Abbildung 3-8 noch die Aufnahme einer erwärmten Führungsrolle des Hubschlittens dargestellt.

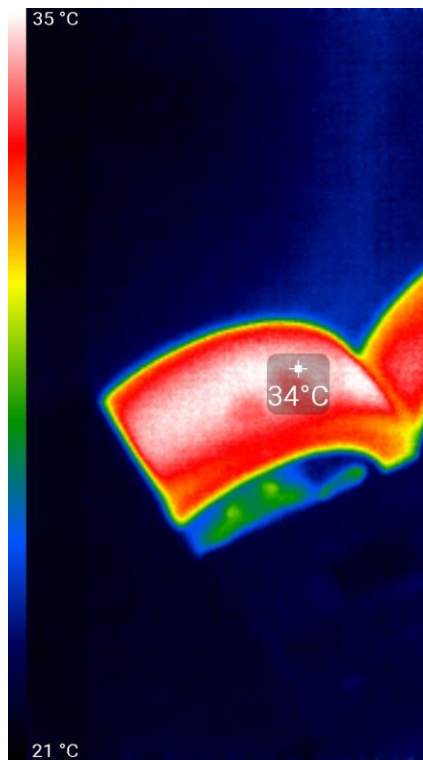


Abbildung 3-8: Thermografieaufnahme einer Führungsrolle des Hubschlittens [Pre-2018, S. 48]

Die Auswirkungen dieser Temperaturveränderung auf den Energiebedarf des RBG werden in den Langzeitmessungen des Fahr- und Hubantriebs deutlich. Die Messergebnisse werden in Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12 gezeigt.

3.2 Einflussfaktoren auf den logistischen Nutzen

Der logistische Nutzen beschreibt den effektiven Nutzen, der dem Betreiber eines HRL aus dessen Betrieb entsteht. Dieser Nutzen wird auch als „Logistischer Ertrag“ bezeichnet [Lot-2016, S. 54f.]. Zunächst einmal wurden Überlegungen angestellt, welche systemischen Komponenten innerhalb des HRL einen Nutzen bringen können. Grundsätzlich kann der Nutzen bei einem einzelnen Arbeitsspiel eines RBG herangezogen werden. Bei diesem wurden folgenden Faktoren identifiziert:

- Zurückgelegte horizontale Strecke
- Hubhöhe oder Senkhöhe
- Umgeschlagene Masse
- Einlagertiefe
- Spielzeit

Diese Faktoren wurden für die Bewertung der einzelnen Komponenten eines RBG herangezogen. Diese Bewertungen sind in den Kapiteln 7.1 bis 7.5 beschrieben. Für den kompletten Nutzen beim Betrieb eines RBG wurden folgende Faktoren (vgl. [Ert-2016, S. 168ff.]) identifiziert:

- Durchsatz
- Umgeschlagene Masse
- Lagergröße

Anhand dieser Faktoren wird die in Kapitel 7.6 vorgestellte Bewertung durchgeführt.

4 Entwicklung eines Bewertungsszenarios

Am Beginn des Projekts wurden zunächst zentrale Anforderungen für die Bewertung der EE von RBG gesammelt. Die Anforderungen wurden einerseits auf Basis der Literaturrecherche und andererseits im Rahmen von Expertengesprächen gewonnen. Die Anforderungen wurden mittels der MoSCoW Priorisierung in Must, Should, Could und Won't Anforderungen eingeteilt. Must sind alle Anforderungen, die umgesetzt werden müssen, Should sind die Anforderungen, die umgesetzt werden sollen, Could sind die Anforderungen, die umgesetzt werden können und Won't sind die Anforderungen, die nicht umgesetzt werden. In Tabelle 4-1 sind die zentralen gesammelten Anforderungen, die ein Bewertungsszenario erfüllen muss, samt ihrer Einstufung aufgelistet.

Tabelle 4-1: *Ermittelte Anforderungen an ein Bewertungsszenario*

#	Bezeichnung	MoSCoW Priorisierung (Must, Should, Could und Won't)
1	Festlegung einer Definition für ein RBG	Must
2	Definition für welche Typen und Konfigurationen von RBG die Bewertung gilt	Must
3	Systemgrenze für die Kennzahlermittlung	Must
4	Effizienz muss quantifiziert vorliegen; Verwendung eines Verhältnisses zwischen Energiebedarf und Nutzen	Must
5	Festlegung aller elektrischen Verbraucher, die dem RBG zugeordnet werden	Must
6	Differenzierung der Geräte mittels Kennzahlen in Klassen	Should
7	Regelung für einen Umgang mit Sondergeräten	Could
8	Festlegung, wie mit manuellen und teilautomatischen RBG umgegangen werden soll	Could
9	Bewertung bei unterschiedlichen Laststufen: Vollast, Teillast, Leerfahrt und Standby	Should
10	Abdeckung eines großen Spektrums von RBG	Must
11	Absicherung der Berechnungen und Methoden durch Experimente	Must

#	Bezeichnung	MoSCoW Priorisierung (Must, Should, Could und Won't)
12	Berücksichtigung von Energierückspeisung	Must
13	Berücksichtigung von Energiespeichern in der Bewertung	Should
14	Absicherung der Bewertungsmethodik gegen Manipulation	Should
15	Berücksichtigung von Stillstandszeiten des RBG	Must
16	Anwendbarkeit der Methode für RBG im Behälter- und Palettenbereich	Must
17	Prognose des Energiebedarfs in der Planungsphase	Could
18	Berücksichtigung verschiedener LAM Konfigurationen	Should
19	Berücksichtigung verschiedener Lagertiefen	Should
20	Handlungsempfehlungen geben, wenn ein Gerät den prognostizierten Energiebedarf bei Messungen überschreitet	Could
21	Einsatz frei verfügbarer Software für die Anwendung der Bewertungsmethodik	Could
22	Transparenz und Nachvollziehbarkeit der eingesetzten Methoden und Berechnungen	Must
23	Ermöglichung eines allgemeinen Vergleichs verschiedener RBG	Should
24	Die Berechnungsmodelle und Simulationen müssen durch Messungen validiert werden.	Must
25	Die Prognose und Bewertung lässt sich später einfach durch Messungen überprüfen.	Should

Die oben beschriebenen Anforderungen sind teilweise redundant bzw. ähneln sich inhaltlich. Die Anforderungen wurden später zur Bewertung der entwickelten Szenarien verwendet. Die Definition für ein RBG soll aufzeigen, für welche Geräte die Bewertungsmethodik einsetzbar ist.

Nach der Ermittlung der Anforderungen wurden sechs verschiedene Szenarien die EE-Bewertung von RBG entwickelt. Dabei wurde versucht Szenarien, unter denen eine Bewertung mittels einfacher Prozesse stattfinden kann, zu entwerfen. Die Szenarien sind nachfolgend mit ihren Kurzbezeichnungen aufgeführt:

1. Projektspezifische Bewertung
2. Referenzzyklus
3. Messwoche
4. Allgemeiner Bewertungskatalog
5. Wirkungsgradkatalog
6. Referenzgerät

Diese werden in den folgenden Unterkapiteln kurz anhand von Schemazeichnungen, die den Ablauf der Bewertung darstellen, und einer kurzen Beschreibung beschrieben.

4.1 Projektspezifische Bewertung

In der projektspezifischen Bewertung liegt zunächst schon ein fester Kundenauftrag für ein HRL mit RBG vor. Die Planung wird von einem Planer durchgeführt. Dieser wendet sich mit dem fixen Kundenauftrag an die Hersteller von RBG. Auf Basis der genauen Anforderungsdaten aus dem Kundenauftrag werden verschiedene RBG mit der entwickelten Energieeffizienzbewertung bewertet. Der schematische Ablauf für dieses Bewertungsszenario ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

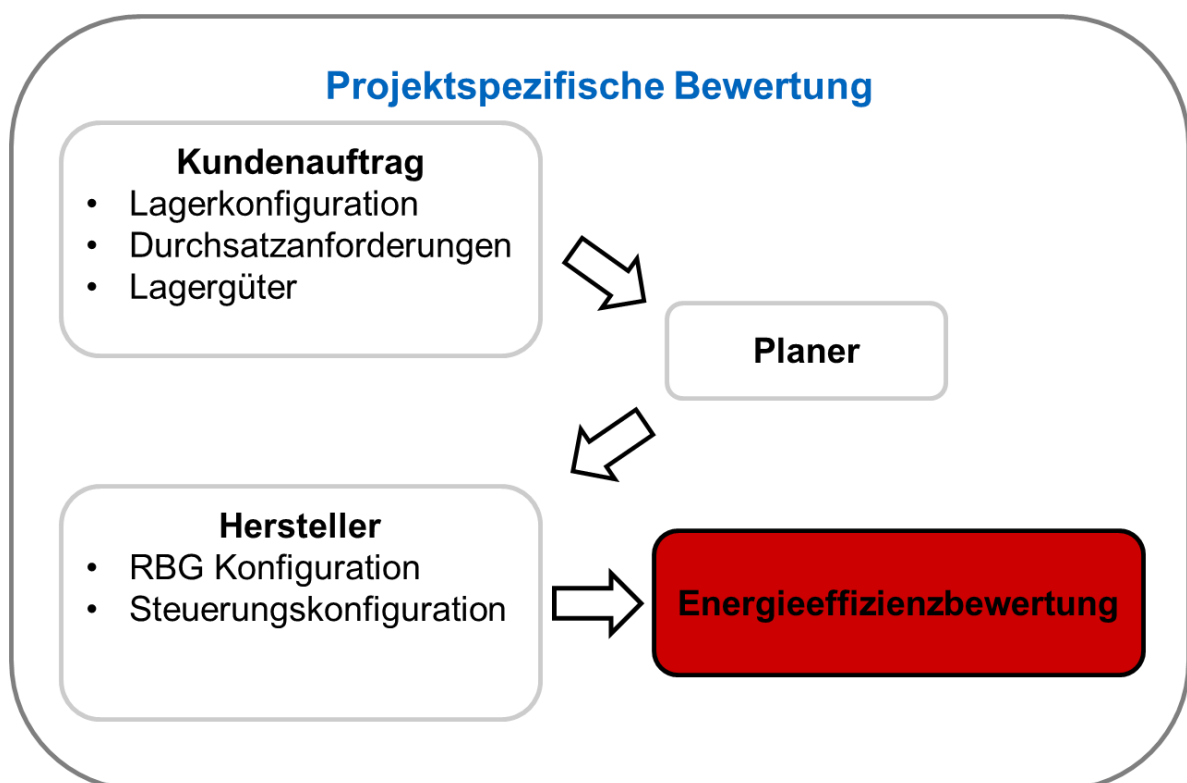


Abbildung 4-1: Bewertungsszenario 1: Projektspezifische Bewertung

4.2 Referenzzyklus

Im Bewertungsszenario Referenzzyklus wird ein RBG auf Basis von festgelegten, für den Betrieb charakteristischen, Spielen bewertet. Hersteller können für ihre RBG die Bewertung durchführen und dann entsprechend die Kennzahlen für ihre Geräte ausweisen. Die Bewertung kann auch von Betreibern und Planern verwendet werden. Der schematische Ablauf für dieses Bewertungsszenario ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

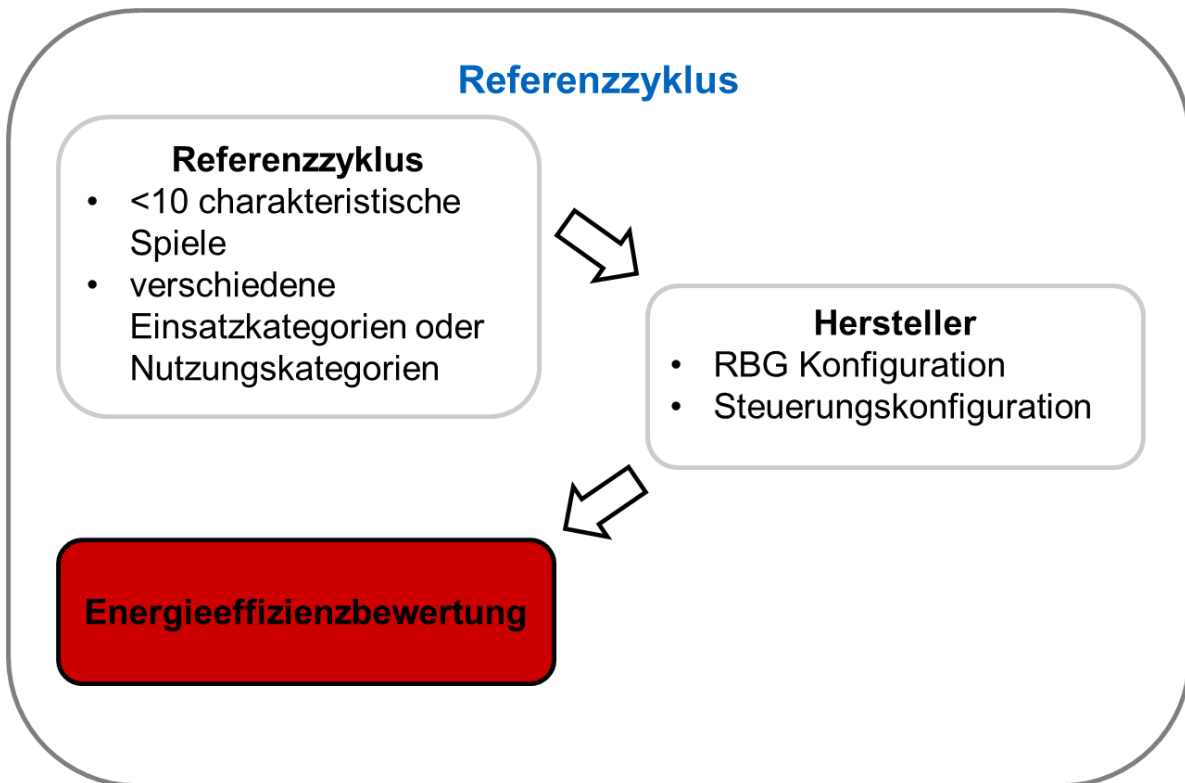


Abbildung 4-2: Bewertungsszenario 2: Referenzzyklus

4.3 Messwoche

Das Bewertungsszenario Messwoche beschreibt eine Bewertung, für ein sich im Betrieb befindendes RBG: Dieses wird auf Basis einer Langzeitmessung bewertet. Der repräsentative Messzeitraum ist mit einer Woche festgelegt. Zusätzlich zur Messung des Energiebedarfs sollen die Leistungsdaten aus dem Materialflussrechner verwendet werden. Auf Basis dieser Daten soll die Energieeffizienzbewertung erfolgen. Der schematische Ablauf für dieses Bewertungsszenario ist in Abbildung 4-3 dargestellt.

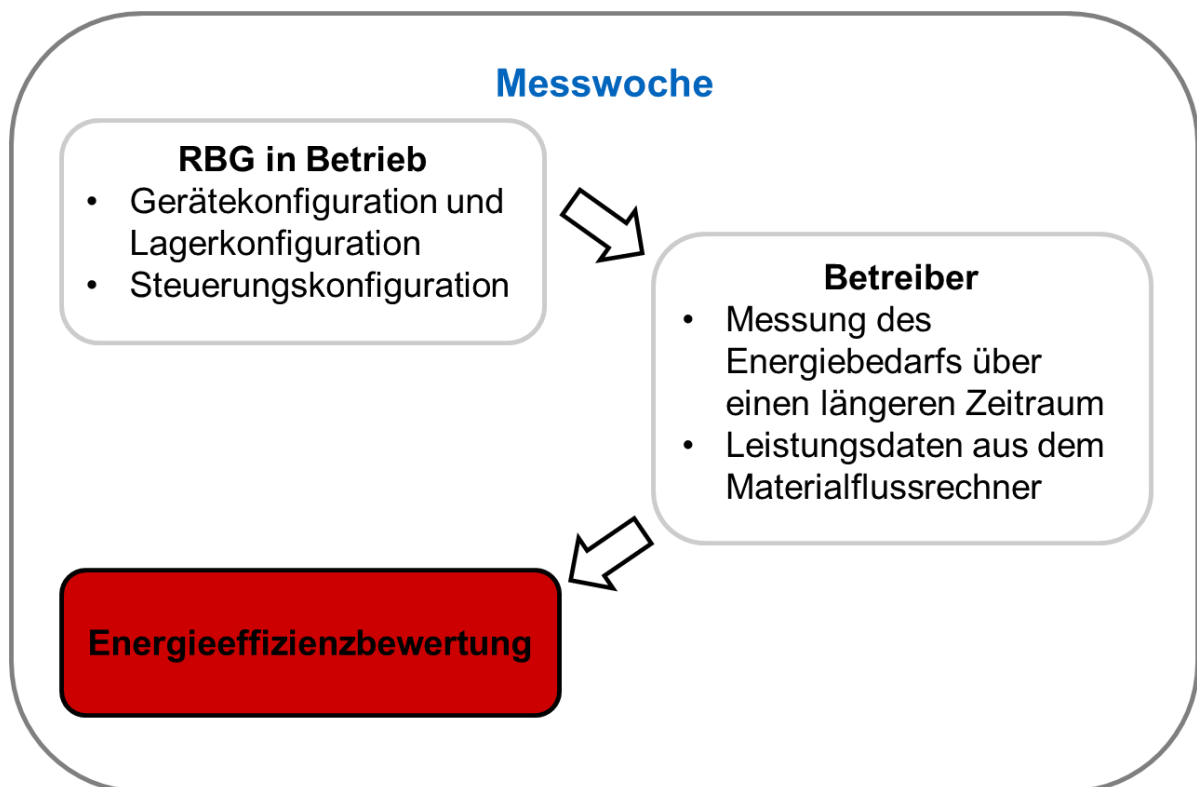


Abbildung 4-3: Bewertungsszenario 3: Messwoche

4.4 Allgemeiner Bewertungskatalog und Wirkungsgradkatalog

In diesem Bewertungsszenario werden verschiedene Eigenschaften, samt ihren Merkmalen, vordefiniert bewertet. Für den Bewertungskatalog wird im Vorfeld ein umfangreicher Punktekatalog erarbeitet. Dieser Katalog enthält die Kriterien für die EE eines RBG samt verschiedenen Ausprägungen. Alle Ausprägungen sind mit Punktezahlen versehen. Die Gesamtpunktzahl wird dann für die Bewertung verwendet. Der schematische Ablauf für dieses Bewertungsszenario ist in Abbildung 4-4 dargestellt.

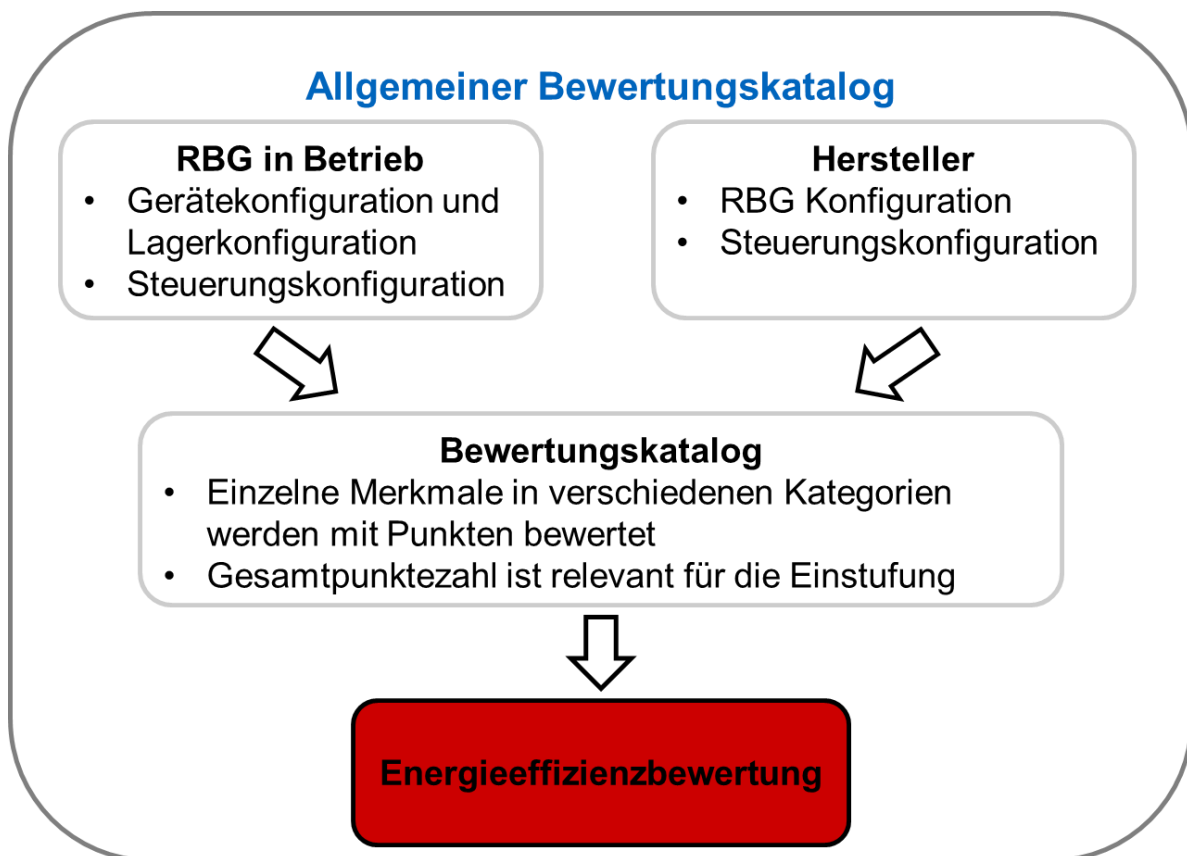


Abbildung 4-4: Bewertungsszenario 4: Allgemeiner Bewertungskatalog

4.5 Wirkungsgradkatalog

Analog zum Bewertungsszenario 4 findet eine Bewertung mit dem Wirkungsgradkatalog statt. Dabei werden die einzelnen Merkmale und Ausprägungen nicht mit Punkten, sondern mit einzelnen Wirkungsgraden bewertet. Diese Einzelwirkungsgrade werden anschließend zu einem Gesamtwirkungsgrad zusammengefasst. Dieser Gesamtwirkungsgrad wird dann für die Bewertung verwendet. Der schematische Ablauf für dieses Bewertungsszenario ist in Abbildung 4-5 dargestellt.

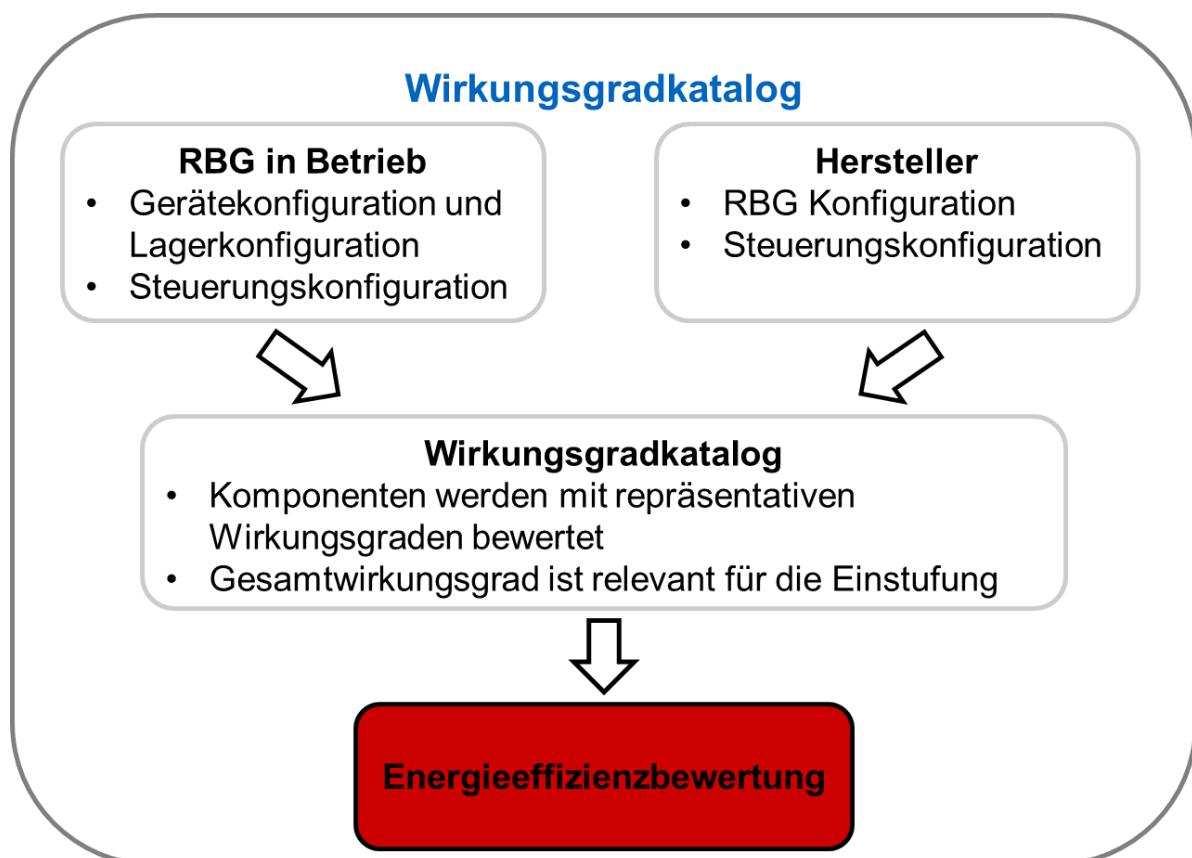


Abbildung 4-5: Bewertungsszenario 5: Wirkungsgradkatalog

4.6 Referenzgerät

Dieses Szenario ist analog zum Bewertungsszenario wie es bei der „Weißen Ware“ zum Einsatz kommt. Als „Weiße Ware“ werden Haushaltsgeräte wie Kühlschränke, Waschmaschinen etc. bezeichnet. Dabei wird eine Bewertung des RBG auf Basis von verschiedenen Referenzgeräten vorgenommen. Der Verbrauch eines RBG wird in diesem Fall mit dem Verbrauch eines fiktiven Referenzgerätes verglichen. Der schematische Ablauf für dieses Bewertungsszenario ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

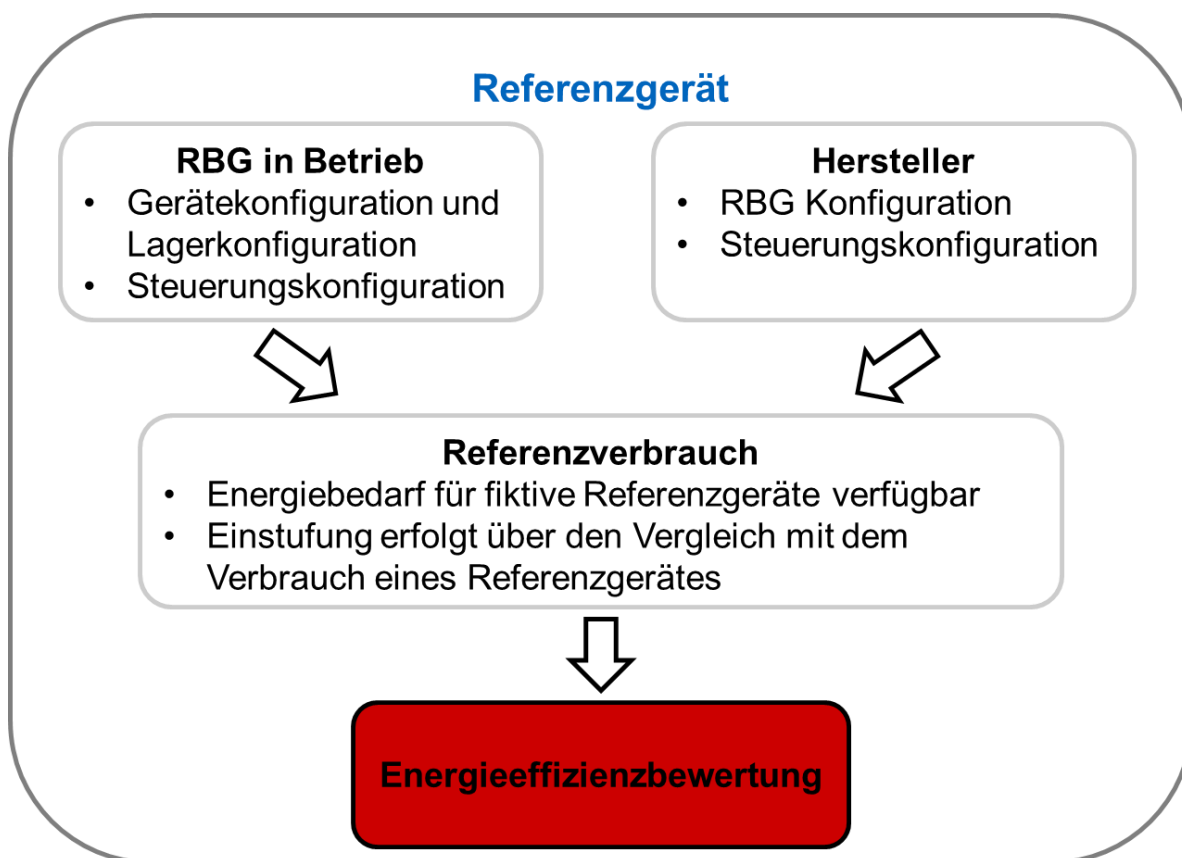


Abbildung 4-6: Bewertungsszenario 6: Referenzgerät

4.7 Zusammenfassung

Nach der Entwicklung der Bewertungsszenarien wurden diese mit Hilfe der Anforderungsliste, weiteren Expertengesprächen und einer gewichteten Bewertung bewertet. Das Bewertungsszenario 3 – Referenzzyklus – hat sich nach der Bewertung anhand der Anforderungsliste und weiteren Expertengesprächen als das am besten umsetzbare herausgestellt.

5 Entwicklung eines Referenzzyklus für die Bewertung der logistischen Leistung

Im Rahmen der Untersuchung des Energiebedarfs wurde mit Hilfe eines Simulationsmodells der mittlere Energiebedarf von unterschiedlichen RBG Konfigurationen beim Einsatz in automatischen HRL betrachtet. Die Grundidee für diese Simulationsstudie basiert auf einer Veröffentlichung von *Azzi et al.*, in der eine Untersuchung der Fahrzeit von RBG mit Doppel-LAM vorgestellt wurde [Azz-2011]. Im Rahmen einer Monte Carlo Simulation wurde versucht den bisherigen Zyklus zur Leistungsabnahme von RBG aus der FEM Richtlinie [FEM-9851], auf Vierfachspiele auszudehnen. Dabei sollte ein repräsentatives Vierfach-Spiel entwickelt werden, das die mittlere Fahrzeit beim Einsatz eines Doppel-LAM abbildet. Als Doppel-LAM werden zwei parallel nebeneinander liegende LAM verstanden. Es ermöglicht zusätzlich zum klassischen Einzel- und Doppelspiel die Möglichkeit zur Durchführung von Vierfachspielen. Analog zu diesem Vorgehen wird mit Hilfe zufällig generierter Fachanfahrten versucht, Referenzfachanfahrten zu finden, die den mittleren Energiebedarf beim Betrieb von RBG abbilden. Diese Referenzfachanfahrten sollen für Einzel-, Doppel- und Vierfachspielbetrieb ermittelt werden. Beispiele für solche Referenzspiele sind in Abbildung 5-1 dargestellt.

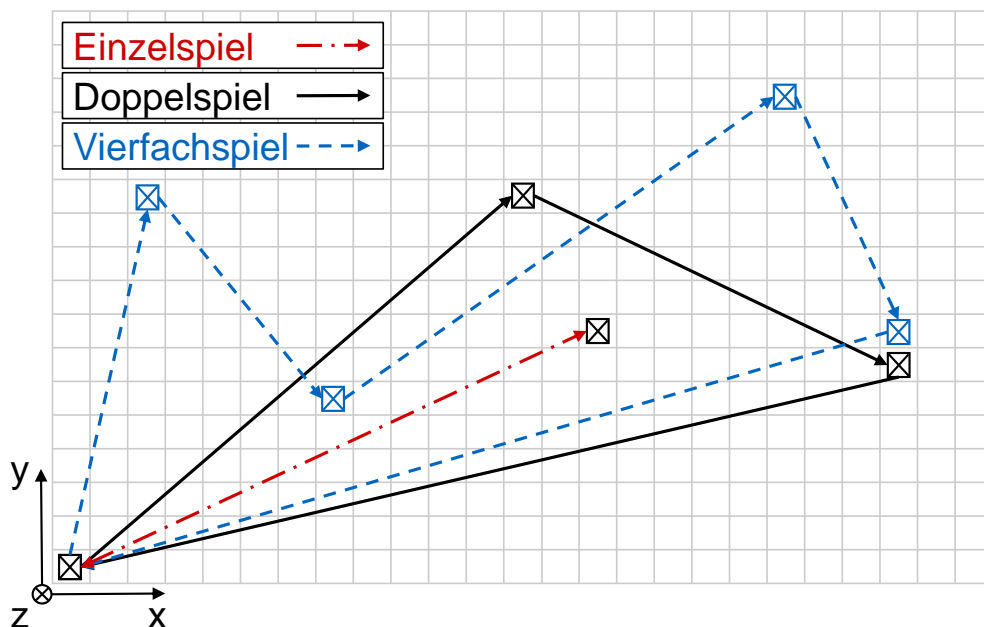


Abbildung 5-1: Exemplarisches Einzel-, Doppel- und Vierfachspiel [Rüc-2018b]

Die Entwicklung des Simulationsmodells und die Durchführung dieser Simulationsstudie wurde in zwei Studienarbeiten von *Parr* [Par-2017b] und *Rief* [Rie-2018] durchgeführt.

5.1 Simulationsstudie

Nachdem der Energiebedarf eines RBG simuliert werden soll, ging es zunächst darum ein geeignetes Simulationsmodell auszuwählen und dieses entsprechend an die Anforderungen dieser Simulationsstudie anzupassen. *Braun* hat in ihrer Dissertation drei Möglichkeiten zur Modellierung des Energiebedarfs eines RBG vorgestellt [Bra-2016, S. 137ff.]. Die drei vorgestellten Modelle sind mit ansteigender Komplexität und damit auch mit ansteigender Rechenzeit umsetzbar. Das erste Modell beinhaltet die statische Quantifizierung des Energiebedarfs über potentielle und kinetische Energie und einen Gesamtwirkungsgrad. Die Modellierung, die im Rahmen dieser Untersuchung zum Einsatz kommt, ist an das zweite Modell „Quantifizierung über Bilanzierung der mechanischen Verluste sowie des elektrischen Wirkungsgrads“ [Bra-2016, S. 138ff.] angelehnt. Dieses Modell weist gegenüber dem dritten Modell „Parameterbasiertes analytisches Simulationsmodell“, einem Simulationsmodell mit vollständiger zeitlicher Auflösung der Leistungsaufnahme eines RBG, eine deutlich geringere Komplexität auf [Bra-2016, S. 138ff.]. Es werden wesentlich weniger Eingangsparameter benötigt, die Simulation kann deswegen den Energiebedarf eines bestimmten RBG auch weniger genau wiedergeben, als ein vollständiges Simulationsmodell. Für eine generelle Untersuchung des Energiebedarfs verschiedener Geräte ist sie aber besser geeignet, da die Rechenzeit deutlich kürzer ist. Basierend auf diesem Modell soll der Energiebedarf beim Betrieb unterschiedlicher RBG simuliert werden. Die grundlegenden Annahmen für das Simulationsmodell sind in Anhang C aufgeführt.

Der grundsätzliche Ablauf der Simulationsstudie ist in Abbildung 5-2 dargestellt. Ausgangspunkt für die Untersuchung ist die Erzeugung einer Auftragsliste, die zufallsbasierte Fachanfahrten eines RBG im Lager beinhaltet. Ausgehend von der Auftragsliste wird der Energiebedarf zur Abarbeitung dieser Auftragsliste durch das RBG im Simulationsmodell berechnet. Anschließend werden die Ergebnisse für alle Konfigurationen ausgewertet. Eine Konfiguration beinhaltet dabei alle Parameter eines RBG samt dem zugehörigen Lager. Dabei wird nach Fachanfahrten gesucht, deren Energiebedarf dem mittleren Energiebedarf aller Fachanfahrten aus der Auftragsliste entspricht. Diese Fachanfahrten werden anschließend für alle simulierten Konfigurationen verglichen. Aus diesem Vergleich werden abschließend die Referenzspiele gewonnen.

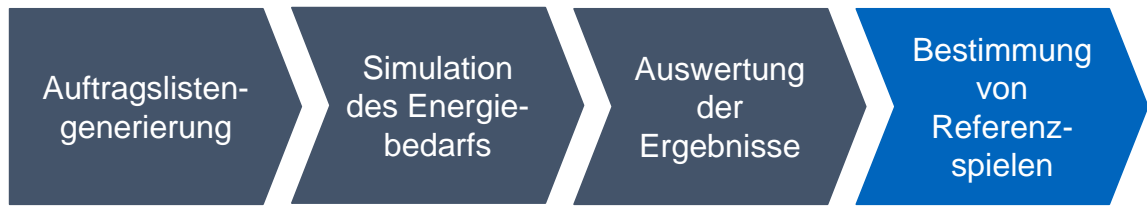


Abbildung 5-2: Ablauf der Simulationsstudie

Der Aufbau des hierzu verwendeten Simulationsmodells und der Ablauf eines Simulationslaufs sind in Abbildung 5-3 dargestellt. Um einen möglichst effizienten Ablauf der Simulationsreihen zu gewährleisten, wurde die Vorgehensweise in der Hinsicht angepasst, dass zuerst für einen Parametersatz die Einzelenergiebedarfe von Fahr- und Hubbewegungen berechnet wurden. Dabei wird sowohl der Zeit, als auch der Energiebedarf aller möglichen Einzelfahrten berechnet. Danach wird die Auftragsliste erzeugt und für den Fall von Vierfachspielen über eine eventuelle Optimierung entschieden. Im Falle von Vierfachspielen kann entweder zeit- oder energiebezogen optimiert werden. Dabei wird die Reihenfolge der Anfahrten innerhalb eines Vierfachspiels umsortiert. Bei den Optimierungsansätzen werden die zuvor berechneten Zeit- oder Energiebedarfe benutzt, um die Anfahrpositionen in einer energie- oder zeitoptimalen Reihenfolge anzuordnen.

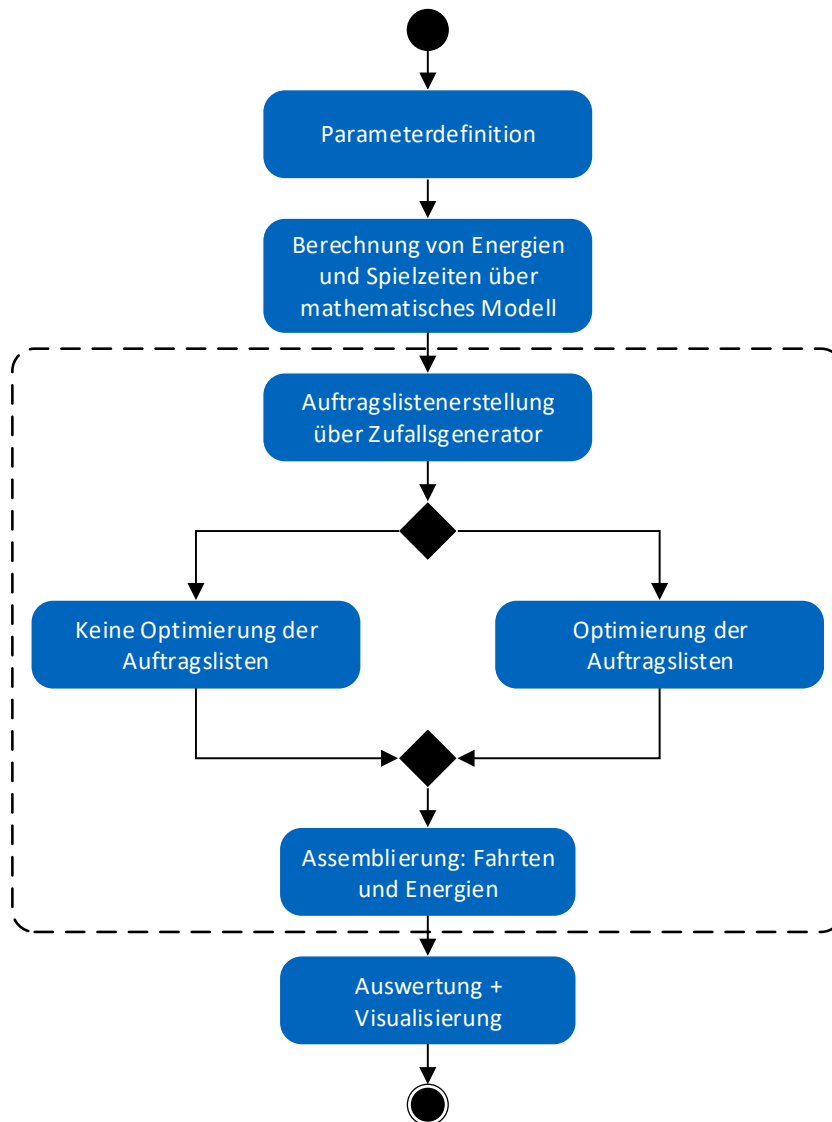


Abbildung 5-3: Aktivitätsdiagramm des Simulationsprogramms [Rie-2018, S. 34]

Anschließend kommt es zu einer Assemblierung der Fahr- und Hubbewegungen des RBG und der Berechnung des dazugehörigen Gesamtenergiebedarfs. Abschließend werden die Ergebnisse statistisch ausgewertet, visualisiert und abgespeichert. Das Modell ist in MATLAB 2017b programmiert und wurde möglichst rechenzeiteffizient gestaltet. Die Anzahl der simulierten Fachanfahrten wird über die Anzahl der Fachpositionen im Lager multipliziert mit einem experimentell ermittelten Faktor berechnet. Dieser Faktor stellt einen Kompromiss zwischen einem mittels statistischer Methoden ermittelten Faktor und der Rechenzeitbegrenzung dar. Für Einzel- und Doppelspiel beträgt der Faktor 1000, für das Vierfachspiel beträgt er 20000. Damit ergibt sich für das größte untersuchte AKL mit 70 Spalten und 35 Reihen bei vierfachtiefer Lagerung

eine Gesamtzahl von $196 \cdot 10^6$ Spielen. Aus diesem Grund wurde der Fokus auf die Rechenzeiteffizienz gelegt. [Rie-2018, S. 35]

Die Basisparameter für die Simulation der AKL und APL sind in Anhang B aufgelistet. Um die Anzahl der Simulationen zu begrenzen, wurden Geschwindigkeit und Lagergröße nicht unabhängig voneinander variiert. Stattdessen wurden unterschiedliche Kombinationen von Lagergrößen und Bewegungsgeschwindigkeiten mittels des Regalwandfaktors zusammengefasst. Der Regalwandfaktor definiert sich nach Gleichung (5-1).

$$RWF = \frac{v_x}{v_y} \cdot \frac{H_{HRL}}{L_{HRL}} \quad (5-1)$$

Er beschreibt ein Verhältnis der Fahrzeiten im Lager. Im Fall von $RWF = 1$ benötigt das RBG für eine Fahrt über die komplette Lagerlänge die gleiche Zeit wie für einen Hub über die komplette Lagerhöhe. [FEM-9851]

Im Rahmen der Simulationsstudie wurden folgende Parameter variiert:

- Art des RBG: AKL oder APL
- Regalwandfaktor
- Anzahl der Lagerpositionen pro Kanal
- Anzahl LAM
- Kapazität des / der LAM
- Konfiguration mit und ohne Rückspeiseeinheit
- Optimierungsmethode der Reihenfolge der angefahrenen Positionen bei Vierfachspielen

Die untersuchten variierten Parameter samt ihren Ausprägungen sind in Tabelle 5-1 aufgelistet. Es wurden nicht alle Kombinationen von LAM-Kapazität und Lagertiefe simuliert, denn es wurden nur Konfigurationen betrachtet, bei denen die LAM-Kapazität kleiner oder gleich der Lagertiefe ist. Damit ergeben sich für Vierfachspiele maximal 324 untersuchte Konfigurationen. Tabelle 5-1 enthält die variierten Parameter und ihre Ausprägungen bei der AKL Simulation.

Tabelle 5-1: *Variierte Parameter im AKL (vgl. [Rie-2018, S. 39])*

Parameter	Ausprägungen		
Rückspeiseeinheit	ja	nein	
LAM-Kapazität	1	2	4
Lagertiefe	1	2	4
Optimierungsmethode	keine	Zeit	Energie
Regalwandfaktor	s. Tabelle 5-2		

Die Regalwandfaktoren mit den zugehörigen Lagerdimensionen und Bewegungsgeschwindigkeiten sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Tabelle 5-2: *Zusammensetzung der betrachteten AKL Regalwandfaktoren (nach [Par-2017a, S. 33], [Rie-2018, S. 38])*

Regalwandfaktor [l]	Anzahl der Regalspalten [l]	Anzahl der Regalebenen [l]	Fahrgeschwindigkeit [m/s]	Hubgeschwindigkeit [m/s]
0,667	60	20	5,00	2,19
0,857	70	35	5,86	3,00
1,000	40	20	4,56	2,00
1,125	40	30	3,42	2,00
1,143	60	40	5,86	3,00
1,200	50	30	4,56	2,00
1,333	60	40	5,70	2,50
1,500	40	30	3,42	1,50
2,000	40	40	3,42	1,50

Analog zu den obigen Tabellen sind in Tabelle 5-3 die variierten Parameter bei den APL Simulationen aufgelistet.

Tabelle 5-3: *Ausgewählte Parameter bei der Simulation der APL*

Parameter	Ausprägungen				
Rückspeiseeinheit	ja	nein			
LAM-Kapazität	1	2			
Lagertiefe	1	2			
Fahrgeschwindigkeit	2,0	2,5	3,5		
Hubgeschwindigkeit	0,5	1,0	1,5		
Anzahl der Regalspalten	20	30	40	50	60
Anzahl der Regalebenen	8	12	16	18	
Regalwandfaktor	0,5 – 2,0				

5.2 Auswertung der Ergebnisse

Im Rahmen der Auswertung wurden Parameter ermittelt, mit denen der Betrieb und die Leistungsfähigkeit des RBG beschrieben werden können. Unter anderem wurden die pro Spiel ein- und ausgelagerten LE, die mittlere Spielzeit, der mittlere Energiebedarf und weitere Parameter ausgewertet. Besonderer Fokus wurde auf die Auswertung jener Fächer gelegt, die besonders häufig mit dem mittleren Energiebedarf angefahren wurden. Diese sind für die Bildung von Referenzspielen entscheidend, weil sie den mittleren Energiebedarf im Betrieb reflektieren. Dabei wurden alle Fächer detektiert, deren Fahrenergiebedarf maximal 2 % vom mittleren Energiebedarf aller Fachanfahrten abweicht (siehe [Par-2017b, S. 37]). Diese Fachanfahrten werden als repräsentative Fachanfahrten bezeichnet. [Rie-2018, S. 51ff.]

Es werden an dieser Stelle nur einige ausgewählte Darstellungen der Ergebnisse vorgestellt, um zu zeigen wie die Referenzfachanfahrten entwickelt wurden. Die Vorgehensweise wird exemplarisch an Hand der simulierten AKL Parametersätze gezeigt. Das Ergebnis der Auswertung einer Einzelspielsimulation ist in Abbildung 5-4 als Plot über eine rechteckige Lagerfront dargestellt. Die Zahlen außen geben die Spaltenanzahl N_{Col} und Ebenenanzahl N_{Lev} im Lager an. Die detektierten repräsentativen Fachanfahrten sind in Graustufen markiert. Die Zahlen innerhalb des Lagers geben an, wie groß die Anfahrtshäufigkeit für ein einzelnes repräsentatives Fach bezogen auf das am häufigsten angefahrne repräsentative Fach ist. Dabei geht es nicht darum wie häufig ein Fach insgesamt angefahren wurde, sondern wie oft es mit dem mittleren Energiebedarf angefahren wurde. Gesucht wurde dann nach der 3×3 Matrix, die die meisten repräsentativen Fächer enthält. Diese wird als repräsentative Position bezeichnet. In der Abbildung ist diese mit einem orangen Rechteck markiert. Die Koordinatenachsen beinhalten die absoluten Fachpositionen als Zahl. Details zur simulierten Konfiguration, den Ergebnissen und den Ergebnissen einer Doppelspielsimulation sind in Anhang D enthalten.

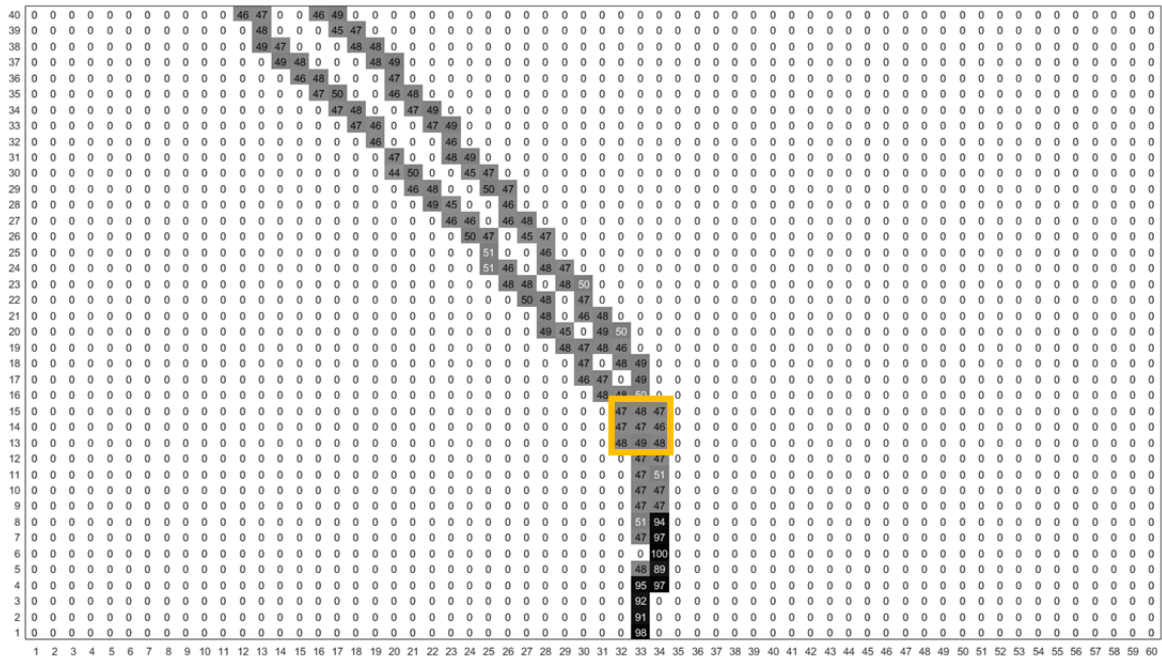


Abbildung 5-4: Exemplarisches Ergebnis für eine Einzelspielsimulation (vgl. [Rie-2018])

Die Zusammenfassung der repräsentativen Positionen für alle simulierten AKL Konfigurationen im Einzelspielbetrieb ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Hier beinhalten die Koordinatenachsen die normalisierten Lagerpositionen. Mit Hilfe dieser Positionen wurden dann die Referenzfachanfahrten bestimmt.

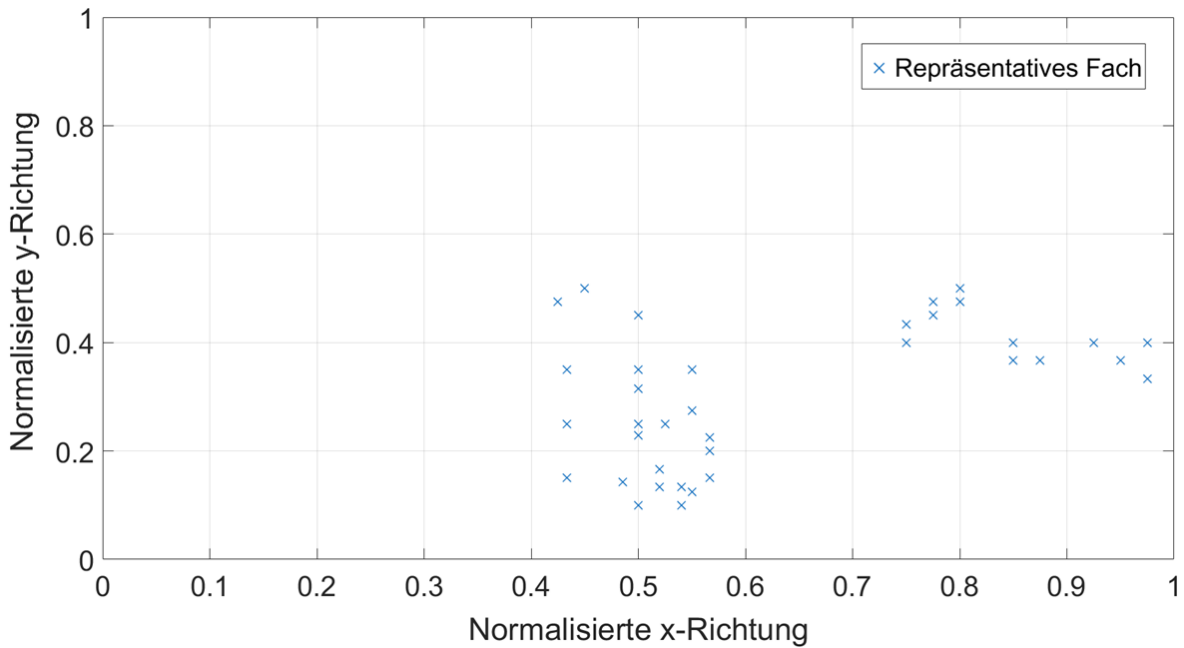


Abbildung 5-5: Zusammenfassung der Ergebnisse für Einzelspiele bei AKL

Abschließend ist in Abbildung 5-6 die Zusammenfassung der Ergebnisse der Doppelspielsimulation der AKL gezeigt. Bei Doppel- und Vierfachspielen wurde zusätzlich zwischen den einzelnen Anfahrpositionen unterschieden. Bei Doppelspielen kann explizit zwischen repräsentativer Ein- und Auslagerposition unterschieden werden.

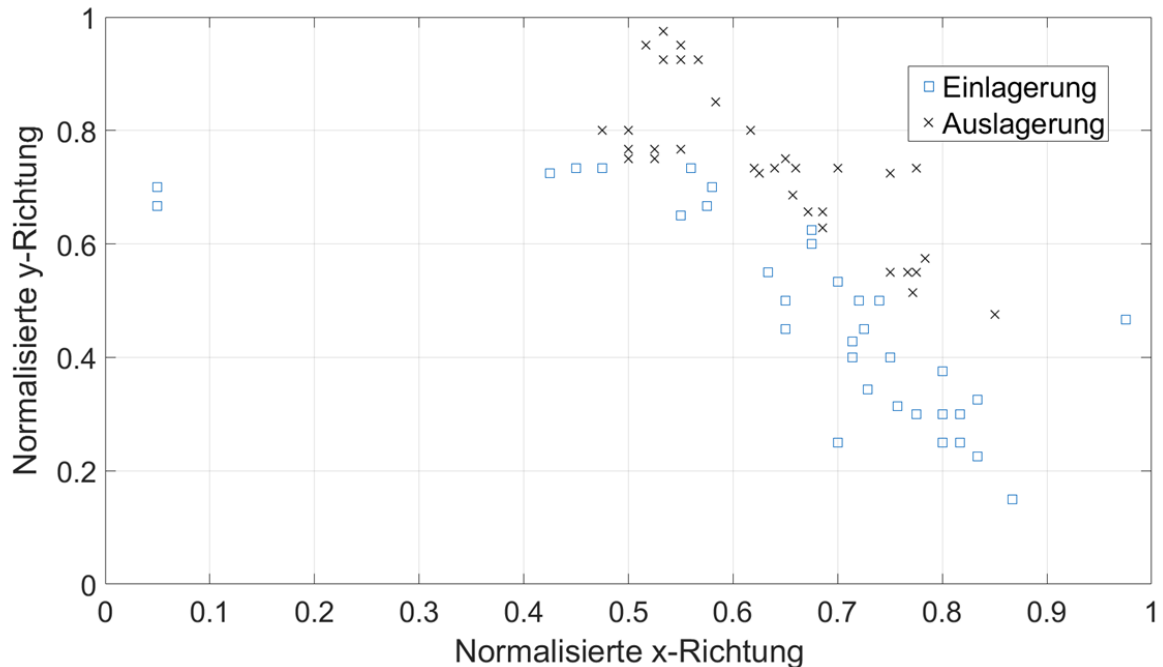


Abbildung 5-6: Zusammenfassung der Ergebnisse für Doppelspiele bei AKL

Analog musste für das Vierfachspiel der AKL Konfigurationen zwischen vier Positionen für die zwei Ein- und Auslagerpositionen unterschieden werden.

5.3 Bildung von Referenzspielen

Aus den gesammelten Simulationsergebnissen wurden für AKL und APL Referenzspiele entwickelt. Diese Spiele basieren auf Anfahrpositionen, die über Mittelwertbildung aus den einzelnen repräsentativen Positionen gewonnen wurden. Dabei wurde zuerst versucht AKL und APL Konfigurationen gesammelt zu behandeln, aber auf Grund der höheren mittleren Abweichung wurde entschieden die Referenzspiele für AKL und APL getrennt zu entwickeln. Als Abweichung wird hier die Differenz zwischen mittlerem Energiebedarf und Energiebedarf für das Referenzspiel verstanden. Eine positive Abweichung bedeutet, der mittlere Energiebedarf wird durch das Referenzspiel überschätzt / bei einer negativen Abweichung wird der mittlere Energiebedarf durch das Referenzspiel unterschätzt. Für die Referenzspiele werden unterschiedliche

Transportmassen eingesetzt. Um den mittleren Energiebedarf im Betrieb zu reflektieren wird in den Referenzspielen nicht die maximale Beladung verwendet. Die Beladung ist abhängig von der mittleren Anzahl der transportierten Ladeeinheiten. Diese mittlere Anzahl ist in Tabelle 5-4 abhängig von der LAM-Kapazität, des Spieltyps und des HRL Typs angegeben.

Tabelle 5-4: *Mittlere Anzahl der transportierten Ladeeinheiten in Abhängigkeit von der LAM-Kapazität, dem Spieltyp und des HRL Typs*

HRL Typ	Spieltyp	LAM-Kapazität 1	LAM-Kapazität 2	LAM-Kapazität 4
AKL	Einzelspiel	0,5	0,67	0,95
AKL	Doppelspiel	1	1,34	1,89
AKL	Vierfachspiel	2	2,7	3,7
APL	Einzelspiel	0,5	0,65	-
APL	Doppelspiel	1	1,31	-

Die mittlere Anzahl der transportierten Ladeeinheiten wurde aus der Simulation für jede Konfiguration berechnet. Beispielhaft ist für ein Referenzeinzelspiel, bei einem AKL mit LAM-Kapazität gleich 2 und einem maximalen Gewicht einer Ladeeinheit von 50 kg , die transportierte Masse für das Referenzspiel gleich $0,67 \cdot 50 \text{ kg} = 33,5 \text{ kg}$. Der Faktor kann aus Tabelle 5-4 abgelesen werden. Diese Transportmasse wird nachfolgend Referenzmasse m_{Ref} genannt.

5.3.1 AKL Konfigurationen

Für die AKL Konfigurationen wurden Referenzspiele für Einzel-, Doppel- und Vierfachspiel ermittelt. Der mittlere Energiebedarf wird durch eine beladene Hin- und Rückfahrt zum angegebenen Punkt realisiert. Abbildung 5-7 zeigt das gefundene Referenz-Einzelspiel für AKL.

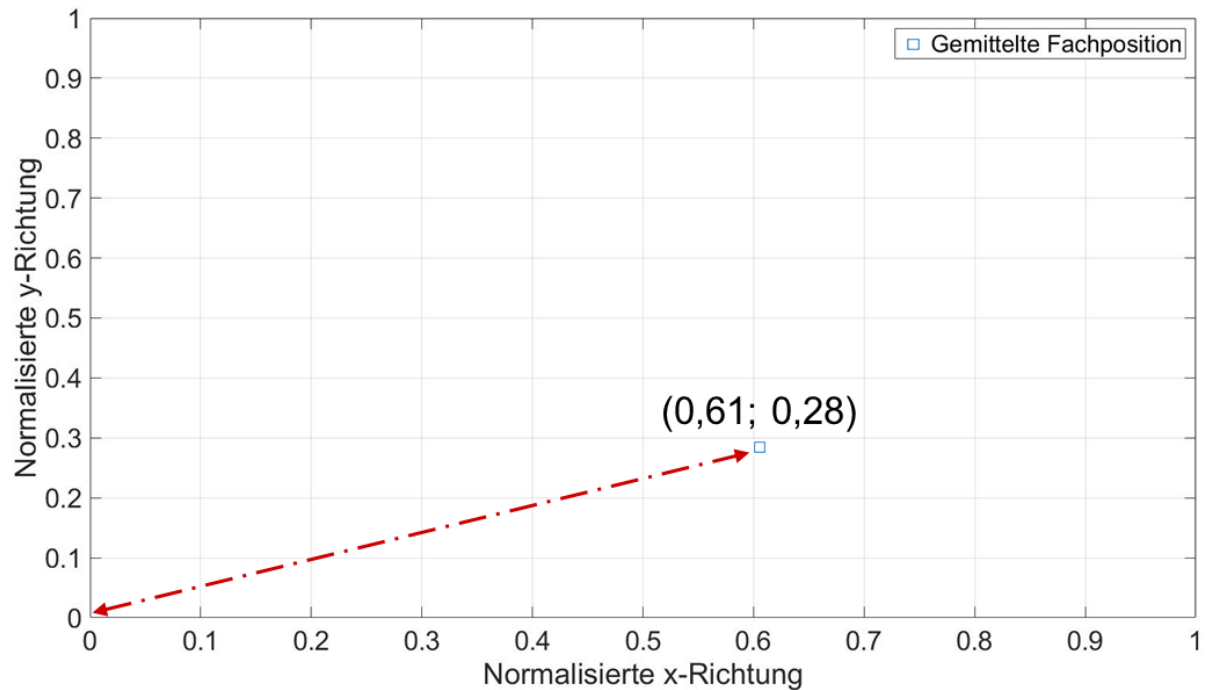


Abbildung 5-7: Referenzfachanfahrt für ein Einzelspiel im AKL

Details zum Referenz-Einzelspiel:

- Referenzpunkt $x_{rel} = 0,61$; $y_{rel} = 0,28$
- Abweichung zwischen 6 und 30 %
- Mittlere Abweichung 14,7 %
- Ablauf:
 - Start am Ausgangspunkt
 - Hinfahrt zum Referenzpunkt mit Nutzlast m_{Ref}
 - Rückfahrt zum Ausgangspunkt mit Nutzlast m_{Ref}

Die maximale Abweichung zum mittleren Energiebedarf ist für die simulierten Konfigurationen relativ hoch. Die mittlere Abweichung liegt mit 14,7 % deutlich über 10 % und damit in einem hohen Bereich.

In Abbildung 5-8 ist das Referenz-Doppelspiel für AKL dargestellt. Damit wird der mittlere Energiebedarf für Doppelspielbetrieb abgebildet. Dieses Referenzspiel weist relativ geringe Abweichungswerte auf. Damit eignet es sich am besten für die Bewertung von AKL und wird deswegen auch für die Bewertung von deren logistischer Leistung verwendet.

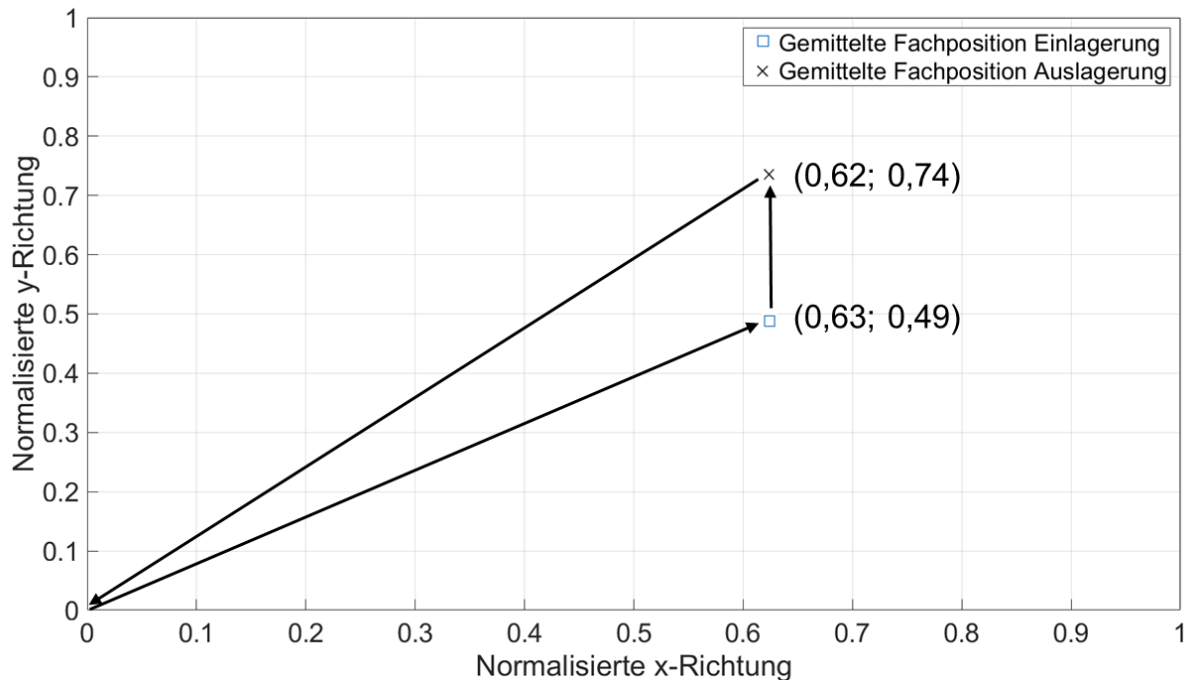


Abbildung 5-8: Referenzfachanfahrten für ein Doppelspiel im AKL

Details zum Referenz-Doppelspiel:

- Einlagerpunkt $x_{rel} = 0,63$; $y_{rel} = 0,49$
- Auslagerpunkt $x_{rel} = 0,62$; $y_{rel} = 0,74$
- Abweichung zwischen -2 und -10 %
- Mittlere Abweichung -6 %
- Ablauf:
 - Start am Ausgangspunkt
 - Fahrt zum Einlagerpunkt mit Nutzlast m_{Ref} ; Einlagerung von m_{Ref}
 - Fahrt zum Auslagerpunkt ohne Nutzlast; Auslagerung von m_{Ref}
 - Rückfahrt zum Ausgangspunkt mit Nutzlast m_{Ref}

Anschließend ist in Abbildung 5-9 das Referenz-Vierfachspiel dargestellt. Punkt 2 und 3 liegen sehr nahe beisammen. Aus diesem Grund ist die praktische Anwendbarkeit

des Spiels je nach Lagerfachabmaßen eingeschränkt. Die exakte Position kann unter Umständen mit Lagerfachkoordinaten nicht genau nachgebildet werden.

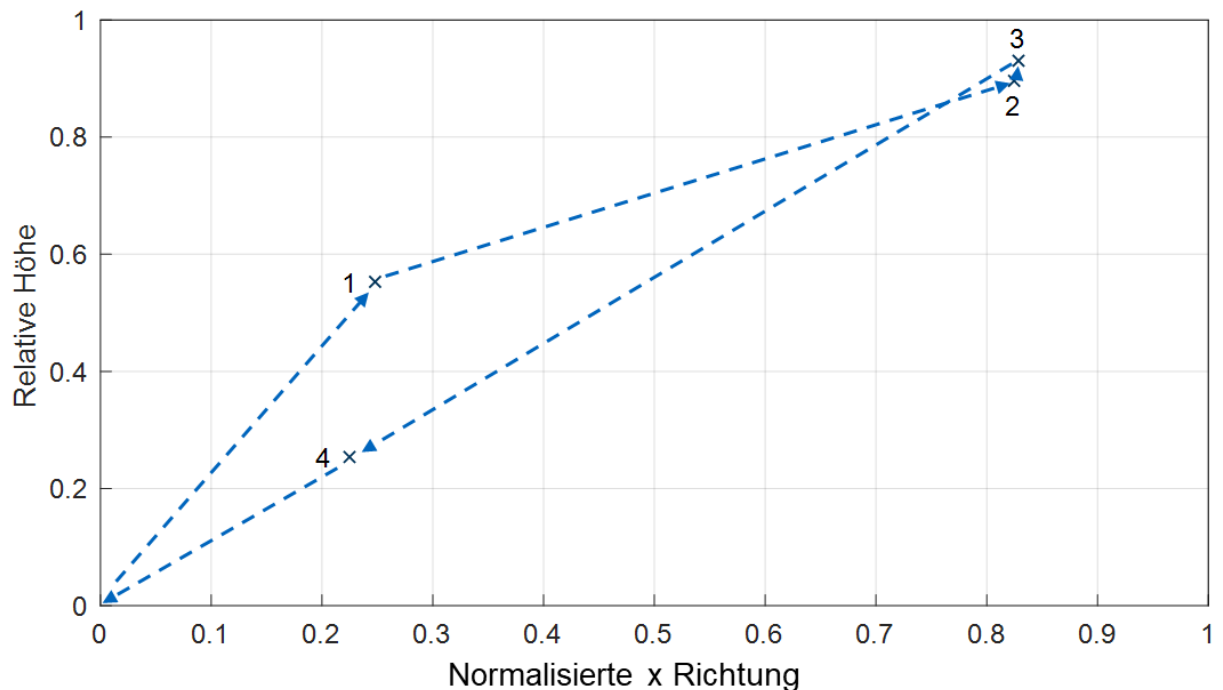


Abbildung 5-9: Referenzfahanfahrten für ein Vierfachspiel im AKL (vgl. [Rie-2018, S. 69])

Details zum Referenz-Vierfachspiel:

- Position 1 (Einlagerpunkt 1) $x_{rel} = 0,25$; $y_{rel} = 0,55$
- Position 2 (Einlagerpunkt 2) $x_{rel} = 0,82$; $y_{rel} = 0,90$
- Position 3 (Auslagerpunkt 1) $x_{rel} = 0,83$; $y_{rel} = 0,93$
- Position 4 (Auslagerpunkt 2) $x_{rel} = 0,22$; $y_{rel} = 0,25$
- Abweichung zwischen -12 und 10 %
- Mittlere Abweichung $0,2$ %
- Ablauf:
 - Fahrt zum Einlagerpunkt 1 mit Nutzlast m_{Ref} ; Einlagerung von $m_{Ref}/2$
 - Fahrt zum Einlagerpunkt 2 mit Nutzlast $m_{Ref}/2$; Einlagerung von $m_{Ref}/2$
 - Fahrt zum Auslagerpunkt 1 ohne Nutzlast, Auslagerung von $m_{Ref}/2$
 - Fahrt zum Auslagerpunkt 2 mit Nutzlast $m_{Ref}/2$; Auslagerung von $m_{Ref}/2$
 - Rückfahrt zum Ausgangspunkt mit m_{Ref}

Die mittlere Abweichung liegt mit 0,2 % in einem niedrigen Bereich. Die maximalen Abweichungen sind im Bereich um 10 % und damit auch im akzeptablen Bereich.

5.3.2 APL Konfigurationen

In den AKL-Simulationen wurde das Doppelspiel als beste Alternative für die Bewertung der logistischen Leistung ermittelt. Dieses weist die geringsten Abweichungen zum mittleren Energiebedarf auf. Für die APL-Konfigurationen wurden deswegen nur Referenzspiele für Einzel- und Doppelspiele ermittelt. Auf Grund der geänderten Massenverhältnisse ergeben sich noch einmal andere Positionen für die Referenzspiele. Das Referenz-Einzelspiel ist in Abbildung 5-10 gezeigt.

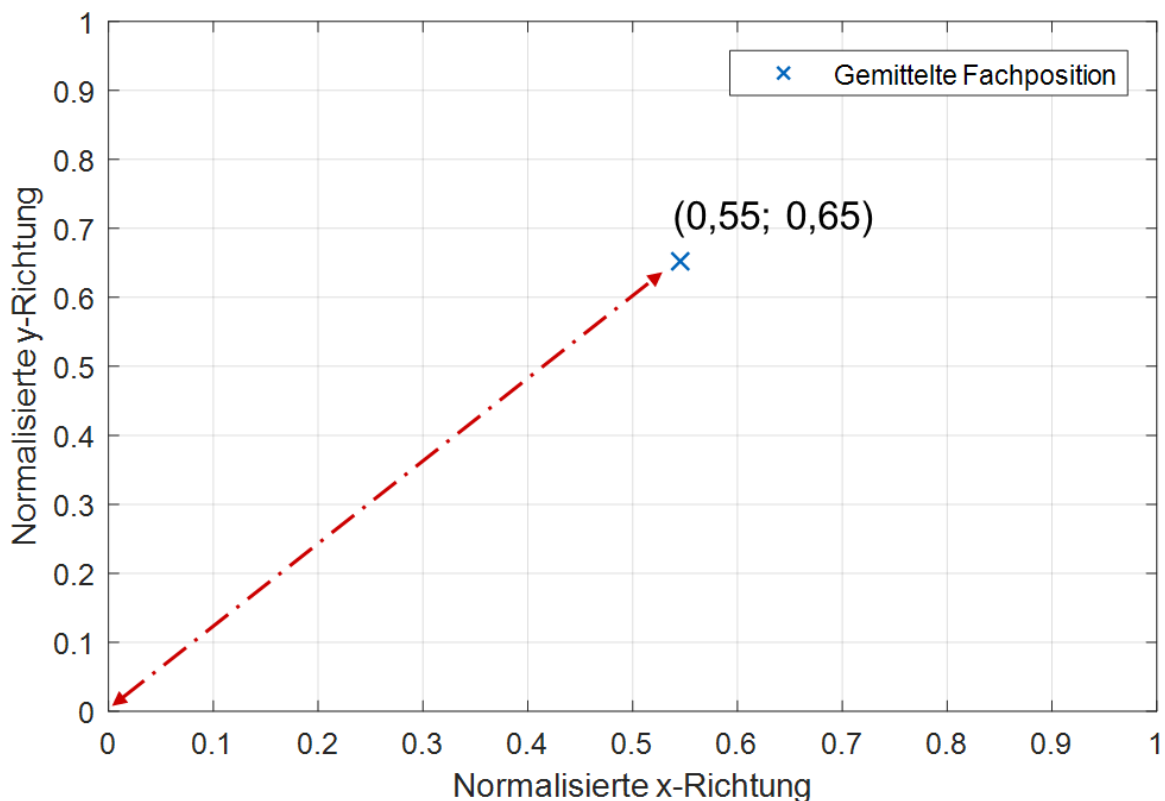


Abbildung 5-10: Referenzfachanfahrt für ein Einzelspiel im APL

Details zum Referenz-Einzelspiel:

- $x_{rel} = 0,55$; $y_{rel} = 0,65$
- Abweichung zwischen -2% und 36%
- Mittlere Abweichung $18,1\%$
- Ablauf:

- Start am Ausgangspunkt
- Hinfahrt zum Referenzpunkt mit Nutzlast m_{Ref}
- Rückfahrt zum Ausgangspunkt mit Nutzlast m_{Ref}

Die maximalen Abweichungen und die mittlere Abweichung sind bei diesem Referenz-Einzelspiel relativ hoch. Deswegen ist es für eine Bewertung weniger geeignet.

Abbildung 5-11 zeigt abschließend das ermittelte Referenz-Doppelspiel im APL dargestellt.

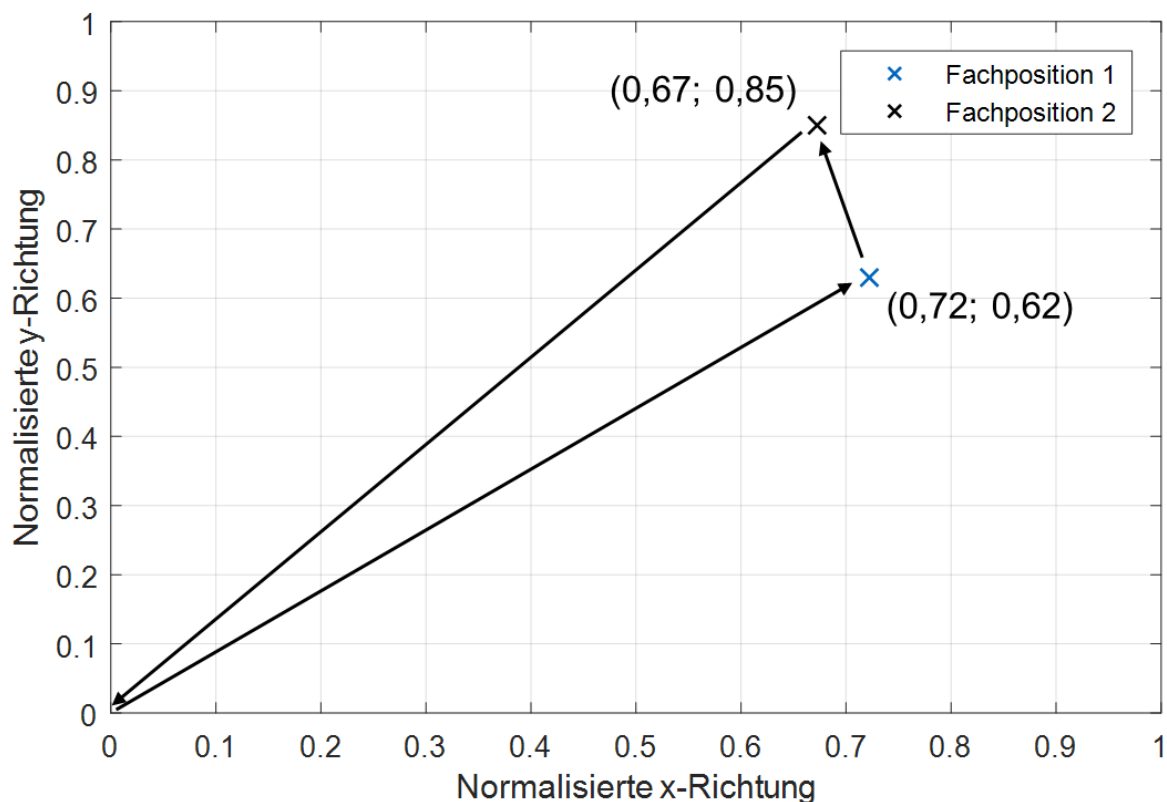


Abbildung 5-11: Referenzfachanfahrten für ein Doppelspiel im APL

Details zum Referenz-Doppelspiel:

- Fachposition 1 (Einlagerpunkt) $x_{rel} = 0,72$; $y_{rel} = 0,62$
- Fachposition 2 (Auslagerpunkt) $x_{rel} = 0,67$; $y_{rel} = 0,85$
- Abweichung zwischen -24% und 17%
- Mittlere Abweichung $-5,8\%$

- Ablauf:
 - Start am Ausgangspunkt
 - Fahrt zum Einlagerpunkt mit Nutzlast m_{Ref} ; Einlagerung von m_{Ref}
 - Fahrt zum Auslagerpunkt ohne Nutzlast; Auslagerung von m_{Ref}
 - Rückfahrt zum Ausgangspunkt mit Nutzlast m_{Ref}

Auf Grund der besseren Vergleichbarkeit und der niedrigeren mittleren Abweichung wird auch für die Bewertung von APL das Referenz-Doppelspiel verwendet. Die mittlere Abweichung ist zwar geringer als 10 % die maximalen Abweichungen liegen aber deutlich über 10 %. Deswegen soll in Zukunft noch an der Verbesserung der Referenzspiele gearbeitet werden.

6 Untersuchung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten

Um den Energiebedarf von RBG im Rahmen des Projekts genauer zu untersuchen, wurden umfassende Leistungs- und Energiebedarfsmessungen an laufenden Anlagen durchgeführt. Dabei wurde insbesondere darauf Wert gelegt, dass die Anlagen möglichst unterschiedliche Gerätetypen abbilden. Insgesamt wurden vier verschiedene Anlagen untersucht, darunter zwei AKL und zwei APL. Um den Energiebedarf von RBG mit deren Bewegungsdaten in Einklang zu bringen, wurden zusätzlich Beschleunigungsmessungen an den Geräten durchgeführt. Teile der Untersuchungen und Ergebnisse sind bereits in [Rüc-2018a] veröffentlicht worden.

6.1 Grundlagen zur Leistungsmessung an RBG

Im Rahmen der Untersuchungen mussten einige Grundlagen zur Leistungsmessung an RBG erarbeitet werden. Zunächst werden hier einige Details zum generellen Systemaufbau der Leistungselektronik von RBG vorgestellt. Ein Schema der Leistungselektronik eines gängigen RBG ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Das RBG mit seinem mitfahrenden Schaltschrank wird ausgehend vom Netzanschluss über einen stationären Schaltschrank und Schleifleitungen mit elektrischer Energie versorgt. Zusätzlich ist in der Abbildung dargestellt an welcher Stelle das Leistungsmessgerät bei den Versuchen angeschlossen wurde.

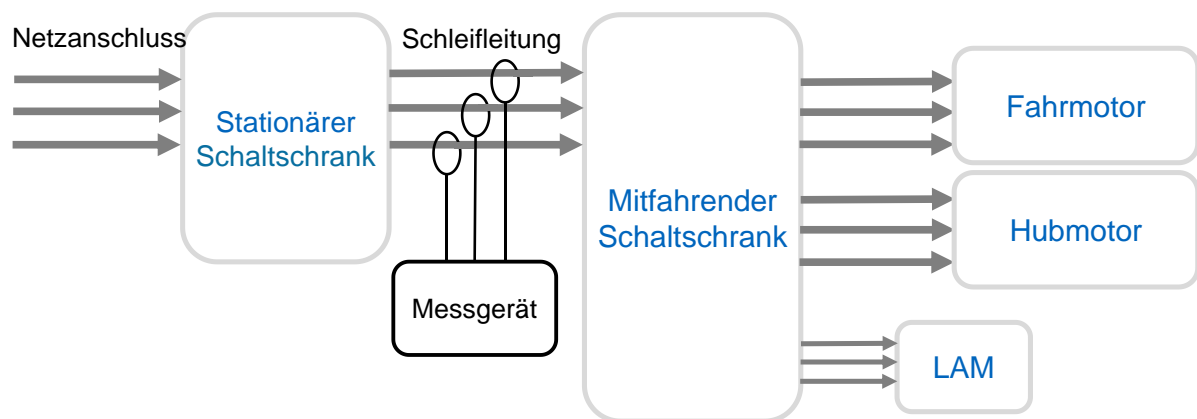


Abbildung 6-1: Schema der Leistungselektronik eines RBG [Rüc-2018a]

Im stationären Schaltschrank sind Komponenten wie Steuerrechner und Kommunikationseinheit untergebracht. Die Kommunikationseinheit kann im Falle einer Datenlichtschranke, mit deren Hilfe die Steuerungsinformation übertragen wird, auch außerhalb des Schaltschranks verbaut sein. Des Weiteren werden meist eine Lüftung oder auch eine Klimatisierung und weitere Verbraucher vom stationären Schaltschrank mit elektrischer Energie versorgt. Im mitfahrenden Schaltschrank befinden sich die Umrichter und weitere Leistungselektronik. Der mitfahrende Schaltschrank versorgt auch weitere Komponenten wie die Positionserfassung und die mechanischen Bremsen mit elektrischer Energie. Diese Verbraucher sind in Abbildung 6-2 dargestellt. Sie alle tragen zur Grundlast des RBG bei. Die Grundlast ist jene elektrische Leistung, die bei eingeschaltetem Gerät, Stillstand der Antriebe und geschlossenen Bremsen anfällt. Die Grundlast spielt für die spätere Entwicklung der Energieeffizienzbewertung eine wichtige Rolle, da sie einen wesentlichen Teil zum gesamten Energiebedarf eines RBG beiträgt.

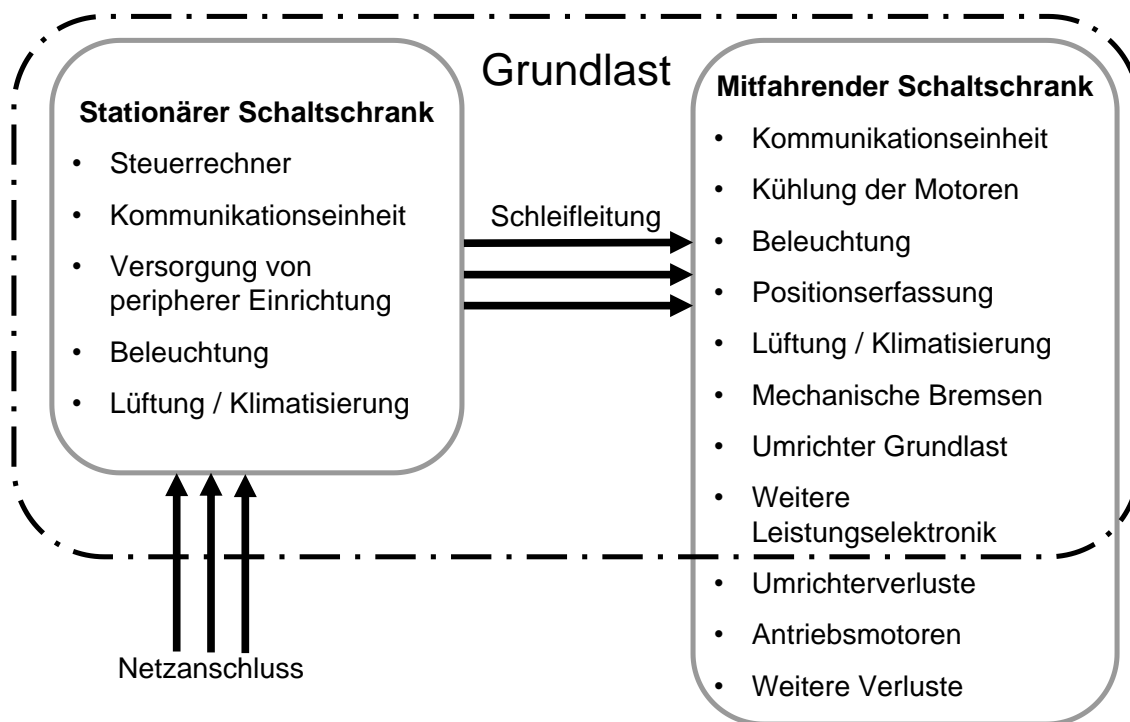


Abbildung 6-2: Verbraucher an einem RBG [Rüc-2018b]

Die Messung der elektrischen Leistung wurde mit Hilfe eines Fluke 1735 Leistungsmessgeräts (siehe Abbildung 6-3) durchgeführt. Dieses Messgerät ermöglicht die Messung an 3-Phasen-Systemen mit Hilfe von Spannungsklemmen und Stromzangen. Das Messgerät misst Spannung und Strom der drei Phasen und berechnet daraus die

Leistung und den Energieverbrauch. Auf Grund der begrenzten Leistung der Datenaufzeichnung ist das kürzeste Messintervall 0,5 s. Das Messgerät wird in Dreiphasen-Delta Schaltung mit drei Stromzangen und drei Spannungsklemmen an die drei Phasen angeschlossen. Mit Hilfe eines einfachen Vergleichs der gemessenen Leistungen, abhängig davon wo das Versorgungsnetzteil des Messgeräts angeschlossen wurde, konnte sein Eigenbedarf während einer Messung zu 5,75 W bestimmt werden.



Abbildung 6-3: Fluke 1735 Messgerät im stationären Schaltschrank

Trotz des relativ langen Messintervalls von 0,5 s beträgt die tatsächliche Abtastrate des Messgerätes 10,24 kHz. Dies ist auch nötig, um eine hochgenaue Leistungsmessung durchzuführen, da sonst die höherfrequenten Leistungsanteile nicht korrekt mitgemessen werden. Die aktuellen Kalibrierdokumente können in Anhang E und Details zum Leistungsmessgerät können in [Flu-2006] nachgelesen werden.

6.2 Grundlagen der Beschleunigungsmessung

Im Rahmen der Untersuchungen wurden neben den Leistungsmessungen auch Beschleunigungsmessungen an den untersuchten RBG durchgeführt. Diese dienen dazu die tatsächlich auftretenden Beschleunigungen und Geschwindigkeiten, mit den in der Steuerung ermittelten, abzugleichen. Dazu wurde ein Beschleunigungssensor in Kombination mit einem Arduino Micro-Computer eingesetzt. Das Messsystem wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit von *Karzel* [Kar-2017] entwickelt und validiert. Ziel war es dabei, ein Modul zur Beschleunigungsmessung zu entwickeln, das mobil an einem RBG verbaut werden kann und drahtlos von einem Laptop außerhalb der Lagergasse bedient werden kann. Dieses Ziel wurde erreicht, indem ein Micro-Computer mit einem Beschleunigungssensor und einem Funkmodul kombiniert wurde. Zusätzlich wurde ein Speichermodul verbaut, um die aufgezeichneten Beschleunigungsdaten auf einer SD Karte zu speichern. Das Messmodul misst die Beschleunigung in drei Achsen mit einer Messfrequenz von $\sim 1000 \text{ Hz}$. Das aufgezeichnete Beschleunigungssignal wird anschließend zur Berechnung der Geschwindigkeits- und Positionsverläufe verwendet. Das Beschleunigungsmesssystem wurde am lehrstuhleigenen Forschungsregalbediengerät getestet und dessen korrekte Funktion validiert. Ein exemplarischer Einsatz des Messmoduls am RBG-1 ist in Abbildung 6-4 gezeigt. Das Messmodul selbst ist im linken oberen Bildrand dargestellt und wird mit einer 9V Batterie versorgt. Das Modul kann via Magneten oder einer Halteplatte am LAM eines RBG montiert werden und damit die Beschleunigungsvorgänge von Fahr- und Hubantrieb aufzeichnen.

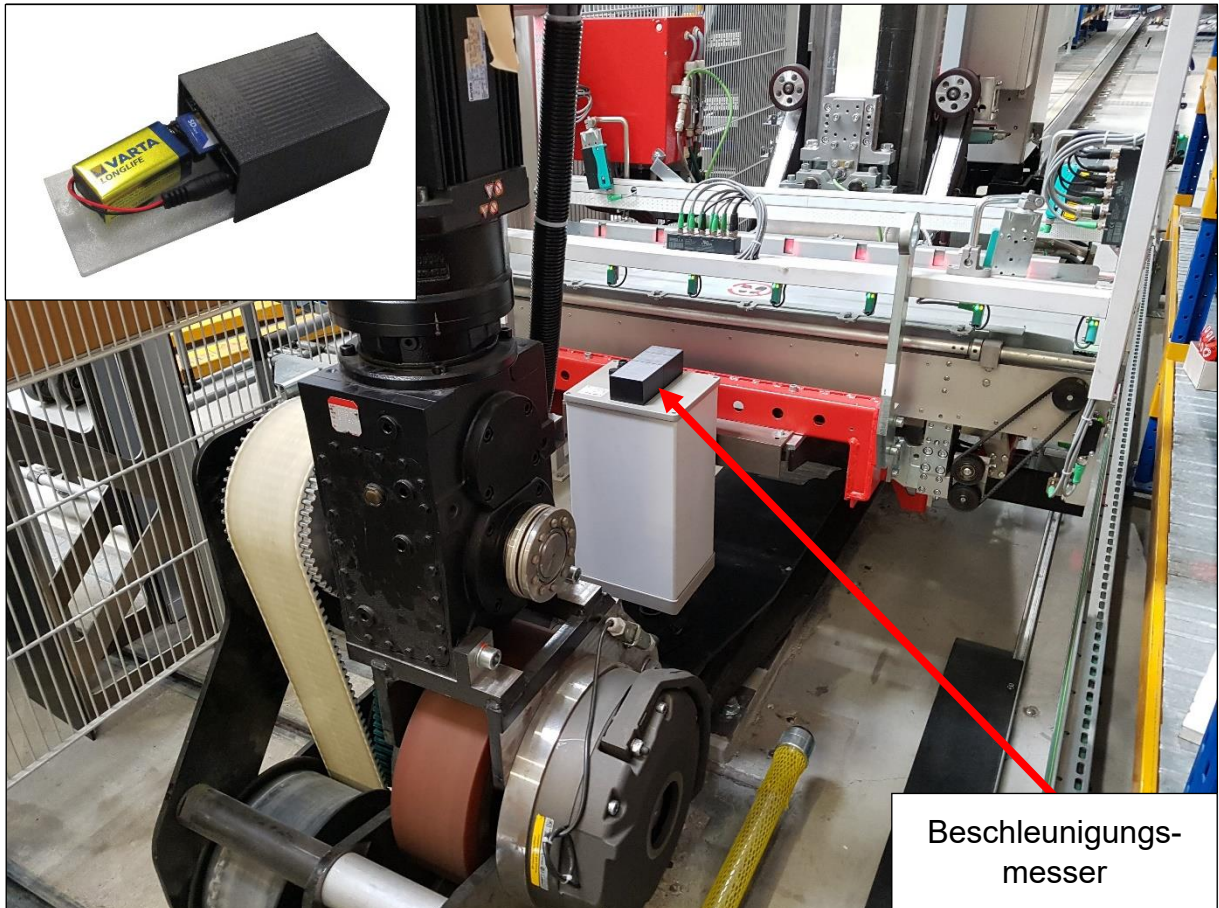


Abbildung 6-4: Einsatz des Beschleunigungssensors (vgl. [Kar-2017])

Dass vor allem die Geschwindigkeit einen hohen Einfluss auf den Energiebedarf eines Fahrtriebs hat, wurde bereits in [Sch-2012a] gezeigt. Auf Grund dessen wurde dieser Parameter zusätzlich durch Messungen überprüft. Die Bewegung RBG neuerer Bauart wird üblicherweise über den Ruck, die zeitliche Ableitung der Beschleunigung, geregelt. Das bedeutet, dass ihre Fahrkurve aus sieben Ruckphasen besteht. Bezieht man die Phasen auf die Beschleunigung ergeben sich folgende sieben Bewegungsphasen (vergleiche [Rüc-2018a]):

1. Konstant zunehmende Beschleunigung (konstant positiver Ruck)
2. Konstante Beschleunigung (kein Ruck)
3. Konstant abnehmende Beschleunigung (konstant negativer Ruck)
4. Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit (keine Beschleunigung und kein Ruck)
5. Konstant zunehmende Verzögerung (konstant negativer Ruck)
6. Konstante Verzögerung (kein Ruck)
7. Konstant abnehmende Verzögerung (konstant positiver Ruck)

Die einzelnen Phasen von Ruck, Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg einer vollständigen Fahrbewegung sind in Abbildung 6-5 dargestellt. Vollständig bedeutet in diesem Fall, dass eine Phase konstanter Geschwindigkeit vorhanden ist. Bei kurzen Fahrten wird aus einer siebenphasigen Bewegung eine fünfphasige Bewegung und das RBG beginnt nach Erreichen einer Geschwindigkeit, die abhängig von der Fahrstrecke ist und unter der Maximalgeschwindigkeit liegt, sofort wieder zu verzögern.

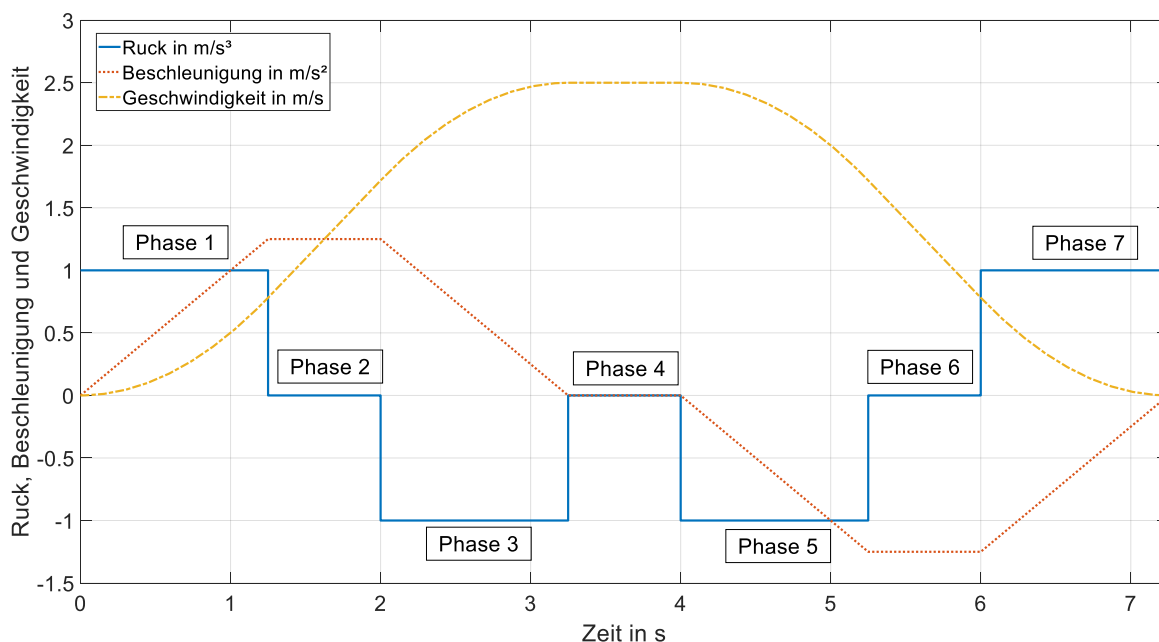


Abbildung 6-5: Verlauf der kinematischen Parameter bei einer Normalfahrt [Rüc-2018a]

Diese Form der Fahrkurve sorgt für ein möglichst sanftes Beschleunigungsverhalten mit hohem Verschleiß der Fahrkurve und geringerer Schwingungsanregung der Struktur als zum Beispiel die ältere Form der Bewegungssteuerung, die mit einer konstanten Beschleunigung arbeitet (Dreiphasige Bewegung). Die Form der Beschleunigung lässt sich mit Hilfe des Ruckverhältnisses JR charakterisieren. Dieses beschreibt das Verhältnis aus maximaler Beschleunigung zu maximalem Ruck und ist in der nachfolgenden Gleichung dargestellt.

$$JR = \frac{J_{max}}{a_{max}} \tag{6-1}$$

Je höher das Ruckverhältnis, umso rechteckiger ist der Beschleunigungsverlauf. Ein Vergleich unterschiedlicher Ruckverhältnisse für die Beschleunigung auf 6 m/s ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Für ein Ruckverhältnis von $7,0$ stellt sich fast schon ein

rechteckiger Verlauf ein. Je niedriger das Verhältnis, umso mehr nähert sich der Beschleunigungsverlauf einem Dreieck an. Bei gleichbleibender Beschleunigungszeit steigt dabei die maximal erreichte Beschleunigung an. Die Verläufe wurden mit Hilfe eines einfachen mathematischen Modells erzeugt. Dieses berechnet für einen vorgegeben kinematischen Parametersatz aus maximalem Ruck, maximaler Beschleunigung, maximaler Geschwindigkeit und zurückgelegtem Weg, die zeitlichen Verläufe dieser Parameter.

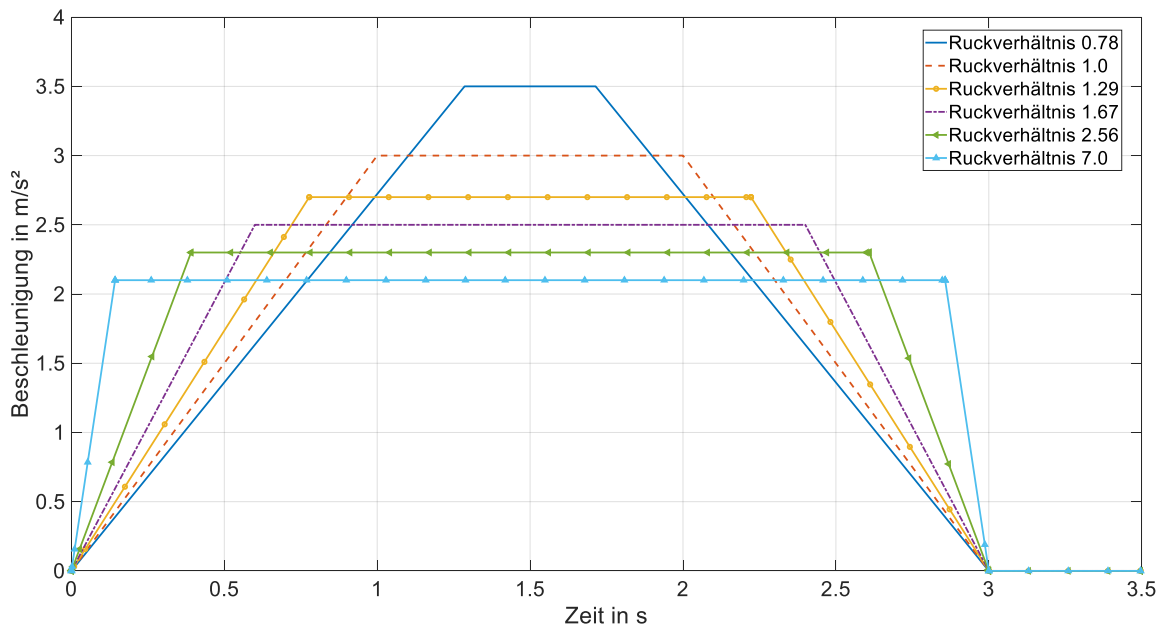


Abbildung 6-6: Verlauf der Beschleunigung bei unterschiedlichen Ruckverhältnissen

Somit lassen sich für gleiche Gesamtfahrzeiten und gleiche Maximalgeschwindigkeiten unterschiedliche Ruckprofile einstellen. Zwei Beispiele für die Messung, anschließende Auswertung und Vergleich mit dem Simulationsmodell einer Beschleunigungsmessung sind in Abbildung 6-7 und Abbildung 6-8 gezeigt. Ausgehend von den gemessenen Beschleunigungswerten wird der Ruckverlauf durch Differentiation, der Geschwindigkeitsverlauf durch einfache Integration und der Wegverlauf durch doppelte Integration gewonnen. Die aus der Messung gewonnenen Werte sind in rot, die berechneten in blau dargestellt. Bei dem untersuchten Fahrtrieb sind für Beschleunigung und Verzögerung unterschiedliche Ruck und Beschleunigungswerte verwendet. Der mittels Differentiation gewonnene Ruckverlauf ist stark vom gewählten Differenzintervall abhängig. Generell kann aber bei geeigneter Wahl des Intervalls eine gute Übereinstimmung mit den in der Steuerung hinterlegten Daten hergestellt werden.

6 Untersuchung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten

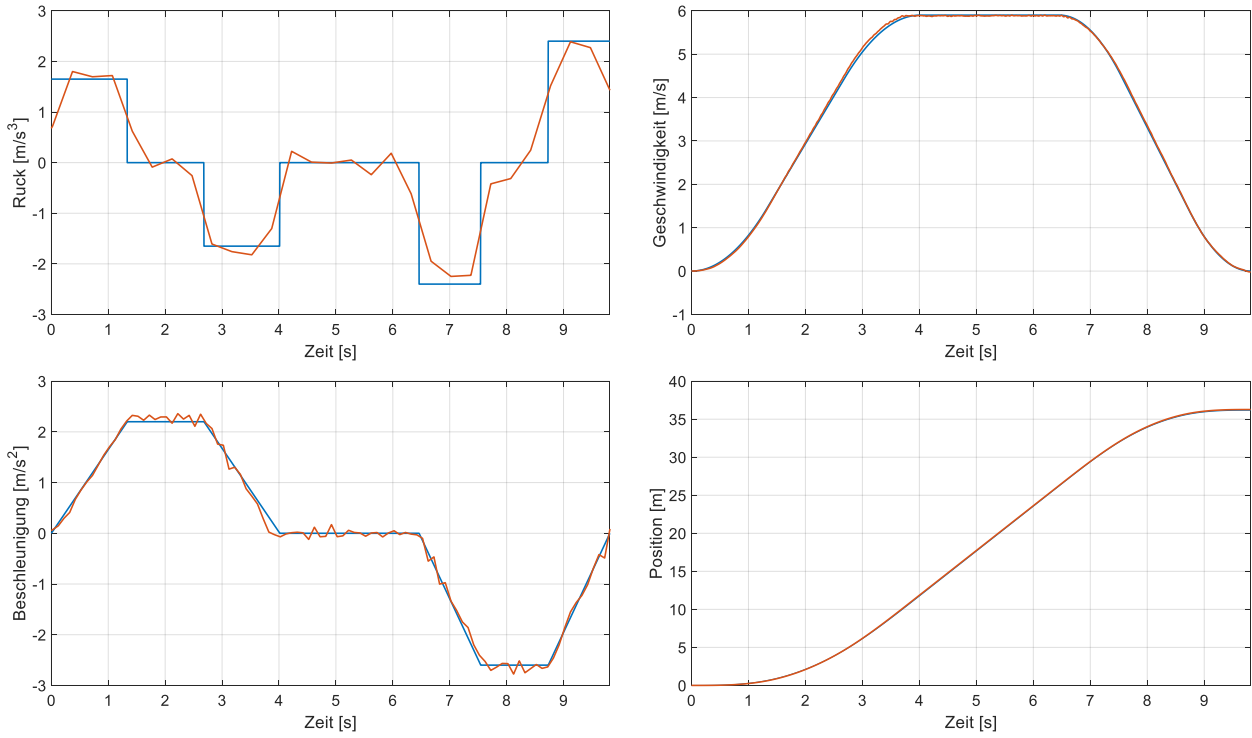


Abbildung 6-7: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Kinematik des Fahrtriebs von RBG-3

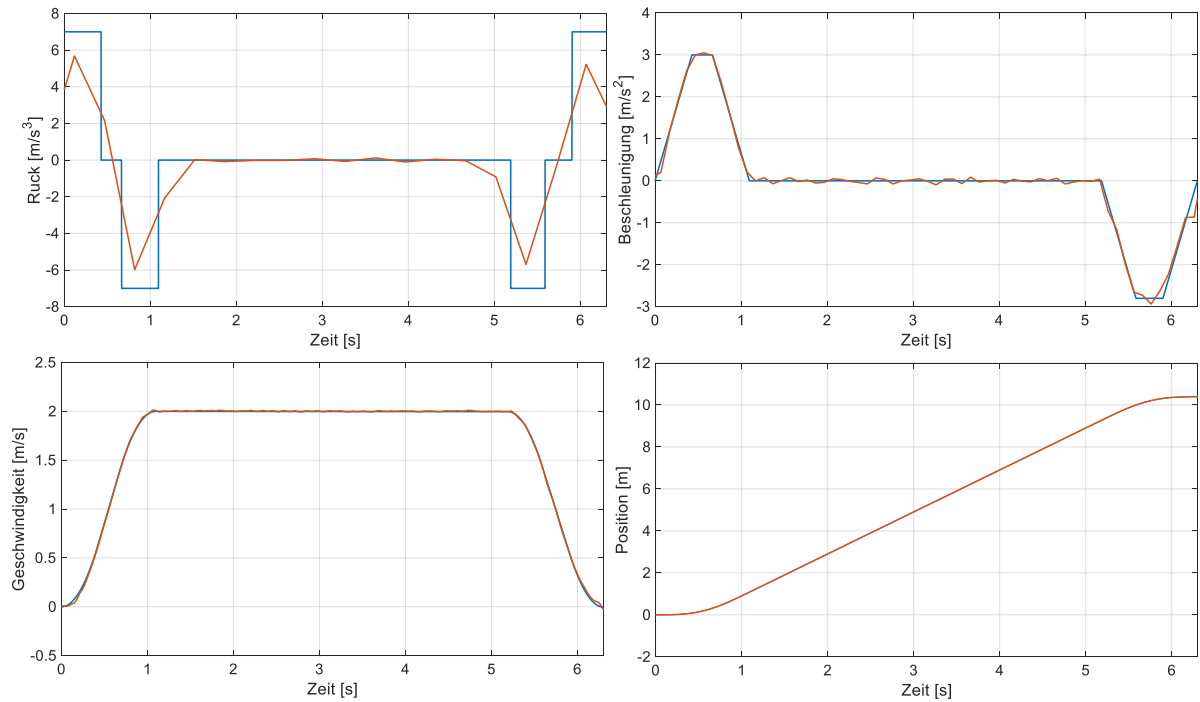


Abbildung 6-8: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Kinematik des Hubantriebs von RBG-3

6.3 Untersuchte Geräte

Die vier untersuchten Geräte werden im Forschungsbericht anonymisiert nur mit den Namen RBG-1, RBG-2, RBG-3 und RBG-4 beschrieben. RBG-1 ist das Forschungsregalbediengerät des Lehrstuhls fml. Die Basisdaten der vier Geräte sind in Tabelle 6-1 vermerkt.

Tabelle 6-1: *Untersuchte Regalbediengeräte*

	RBG-1	RBG-2	RBG-3	RBG-4
Typ	AKL	APL	AKL	APL
Nutzlast	100 kg	1000 kg	60 kg	1000 kg
Gesamtgewicht ohne Nutzlast	2230 kg	8620 kg	2430 kg	21200 kg
Lagerlänge	21 m	105 m	76 m	85 m
Gerätehöhe	8 m	19 m	12 m	34 m
Max. Geschwindigkeit Fahrwerk	6 m/s	2,3 m/s	5,8 m/s	3,3 m/s
Max. Beschleunigung Fahrwerk	3 m/s ²	0,36 m/s ²	2,4 m/s ²	0,5 m/s ²
Max. Geschwindigkeit Hubwerk	3 m/s	0,7 m/s	2 m/s	1,2 m/s
Max. Beschleunigung Hubwerk	3 m/s ²	0,5 m/s ²	2,9 m/s ²	0,6 m/s ²
LAM-Kapazität	2 Behälter	1 Palette	2 Behälter	1 Palette
Bremsenergienutzung	Zwischenkreis	Energierückspeisung	Energierückspeisung	Energierückspeisung
Fahr- / Hubantrieb	Riemen / Riemen	Reibrad / Seil	Riemen / Riemen	Reibrad / Seil

Es wurden also mit RBG-1 und RBG-3 zwei AKL und mit RBG-2 und RBG-4 zwei APL untersucht. Auf Wunsch der Betreiber werden keine Details zum eigentlichen Lagerbetrieb und den transportierten Gütern veröffentlicht. Die vier Geräte werden in den nachfolgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

Forschungsregalbediengerät (RBG-1)

RBG-1 ist das lehrstuhleigene Forschungs-RBG. Dieses wurde vom Lehrstuhl fml in Zusammenarbeit mit der Firma viastore entwickelt, konstruiert und gebaut. Es handelt sich um ein AKL in Ultraleichtbauweise, bei dem verstärkt auf den Einsatz von kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) und Klebeverbindungen zurückgegriffen wurde.

Der Mast wurde vollständig aus CFK hergestellt. Die Fahrschienen für den Hubschlitten aus Aluminium wurden vollständig mittels Klebeverbindungen befestigt. Der Hubschlitten wurde in einer CFK-Aluminium Hybridbauweise gefertigt. Das Lastaufnahmemittel ist konventionell aus Stahl und Aluminium gefertigt. Die maximale Nutzlast beträgt zweimal 50 kg und damit maximal 100 kg. Auf Grund der höheren Antriebsgeschwindigkeit und seiner höheren Nutzlast ist das RBG auch bei kleinerer Masthöhe nur ca. 8 % leichter als RBG-3. Die maximalen Antriebsgeschwindigkeiten von bis zu 6 m/s am Fahrtrieb und bis 3 m/s am Hubtrieb stellen gute Werte für die heute in AKL eingesetzten Geräte dar. Die maximalen Beschleunigungen von 3 m/s² an Fahr- und Hubtrieb werden vereinzelt von heute eingesetzten RBG noch übertroffen. Trotzdem stellt das RBG einen optimalen Versuchsträger dar. Fahr- und Hubtrieb sind über Riementriebe realisiert. Abbildung 6-9 zeigt das RBG in der Versuchshalle des Lehrstuhls. Im Vergleich zu einem normalen AKL fällt sofort auf, dass sich das RBG nicht komplett zwischen zwei Regalwänden befindet. Auf Grund der ausschließlichen Nutzung zu Versuchszwecken ist keine durchgängige Ausstattung mit Regalfächern vorhanden.

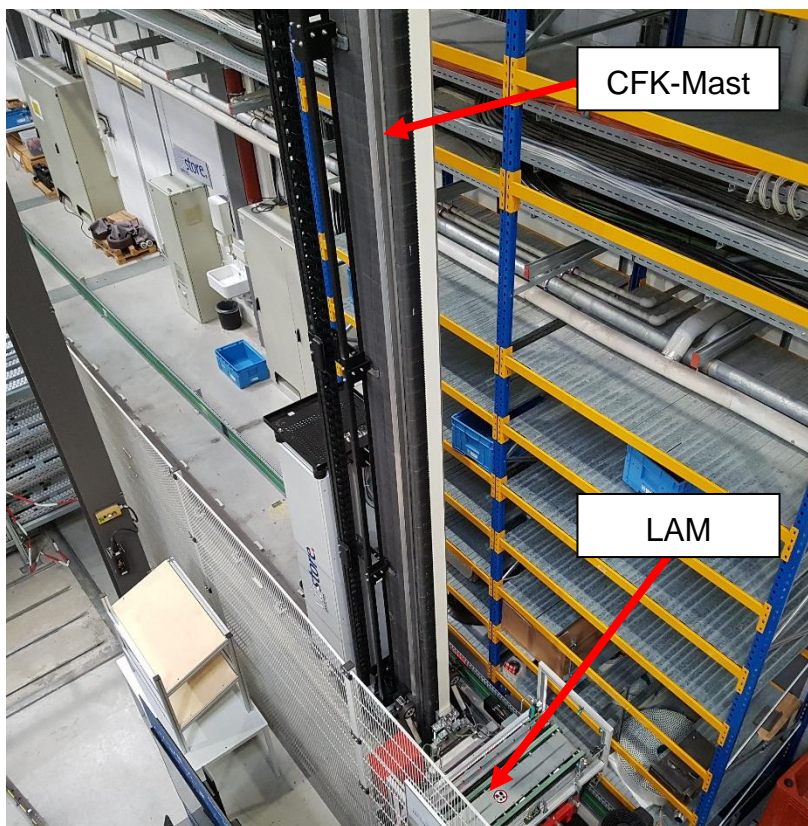


Abbildung 6-9: Mast und LAM des RBG-1 in der Versuchshalle des fml

Auf die Ausstattung mit Regalfächern wird später in Kapitel 6.4 noch näher eingegangen.

Regalbediengerät 2 (RBG-2)

Das zweite RBG ist in einem viergassigen APL verbaut und ist von seinem relativ alten Stahlbau geprägt. Das RBG stammt aus dem Jahr 1985, ist aber ca. 2010 im Rahmen eines Retrofit modernisiert worden. Dabei wurden die Antriebsmotoren und die komplette Leistungselektronik getauscht. In diesem Zuge wurde auch eine Energierückspeisung verbaut. Die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Antriebe sind etwas geringer als die von RBG-4. Die Nutzlast liegt mit 1000 *kg* und einer LAM-Kapazität von einer Palette im üblichen Bereich für APL. Das Hubwerk ist als Seilhubwerk ausgeführt. Mit dem RBG werden Paletten und Gitterboxen einfachtief gelagert. Der Hubschlitten samt LAM des RBG-2 ist in Abbildung 6-10 dargestellt. Zusätzlich ist im Hintergrund das HRL und rechts vorne der Mast zu sehen. Der am LAM angebrachte Beschleunigungsmesser ist zusätzlich gekennzeichnet.



Abbildung 6-10: Hubschlitten und LAM mit HRL des RBG-2 im Hintergrund

Regalbediengerät 3 (RBG-3)

Das dritte gemessene RBG ist in einem mehrgassigen AKL verbaut. Das Gerät ist im Gegensatz zu RBG-1 in konventioneller Bauweise ohne den Einsatz von CFK aufgebaut und erreicht trotzdem ein geringes Gesamtgewicht von 2430 *kg* bei einer Bauhöhe von ca. 12 *m*. Die Beschleunigungen und Geschwindigkeiten sind beinahe so hoch wie bei RBG-1. Das RBG weist eine geringere Nutzlast von 60 *kg* bei einer LAM Kapazität von zwei Kleinteilebehältern auf. Beide Antriebe sind als Riemenantriebe ausgeführt und das RBG ist mit einer Energierückspeisung ausgestattet.

Regalbediengerät 4 (RBG-4)

Das vierte gemessene RBG wird in einem neungassigen APL eingesetzt. Es ist mit einer Nutzlast von 1000 *kg* und einer Bauhöhe von ca. 34 *m* das größte und schwerste untersuchte RBG. Es weist höhere Beschleunigungen und Geschwindigkeiten als RBG-2 auf und ist auch mit einer Energierückspeisung ausgestattet. Das Hubwerk ist in diesem Fall als Seilhubwerk mit Gegengewicht ausgeführt.

6.4 Messungen an RBG-1

Am RBG-1 wurden die Grundlagen zur Wirkungsgradbestimmung der Hauptantriebe entwickelt. Dazu wurden umfassende Messreihen der einzelnen Antriebe durchgeführt. Für die Zuordnung der Fahrten wird die Koordinatenschreibweise (x,y) verwendet. Die Koordinaten lassen sich auch in Fachpositionen bzw. Fahrstrecken umrechnen. Im Rahmen der Messungen an Fahr- und Hubwerk wurden mehrere Parameter näher untersucht. Besonders entscheidend für den Energiebedarf einer Fahr- oder Hubbewegung sind Antriebsgeschwindigkeit und Zuladung. Aus diesem Grund wurde für jeden Antrieb eine vollständige Messreihe mit Variation von Antriebsgeschwindigkeit und Zuladung durchgeführt. Die Nutzlast wurde dabei in vier Stufen von 0 auf 100 *kg* erhöht. Gleichzeitig wurden vollfaktoriell vier verschiedene Fahrgeschwindigkeiten und fünf verschiedene Hubgeschwindigkeiten untersucht. Bei einem vollfaktoriellen Versuchsplan werden alle möglichen Kombinationen aus den gestuften Einflussfaktoren untersucht. Zusätzlich wurde in einer weiteren Messreihe der Einfluss der Beschleunigung untersucht. Die untersuchten Geschwindigkeiten und Nutzlasten und die daraus resultierenden Kombinationen sind in Tabelle 6-2 aufgelistet.

Tabelle 6-2: Zuladungen und Antriebsgeschwindigkeiten für die Messreihen an RBG-1 (vergleiche [Rüc-2018a])

Fahrwerk						Hubwerk					
Nutzlast in kg	0	24	55	76	100	Nutzlast 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	•	•	•	•	•

Bei den Messungen am RBG-1 wurde ein deutliches Warmlaufverhalten festgestellt. Dies liegt an den diversen mechanischen Elementen, deren Wirkungsgrad sich über die Betriebstemperatur und damit über die Betriebszeit verändert. Die mittlere elektrische Leistungsaufnahme des Fahrtriebs bei Dauerbetrieb ist in Abbildung 6-11 dargestellt. Die mittlere Leistung nimmt in den ersten 120 *min* des Betriebs um ca. 5 % ab. Messungen in wiederholbarer Genauigkeit müssen deswegen nach einer Warmlaufphase des jeweiligen Antriebs durchgeführt werden.

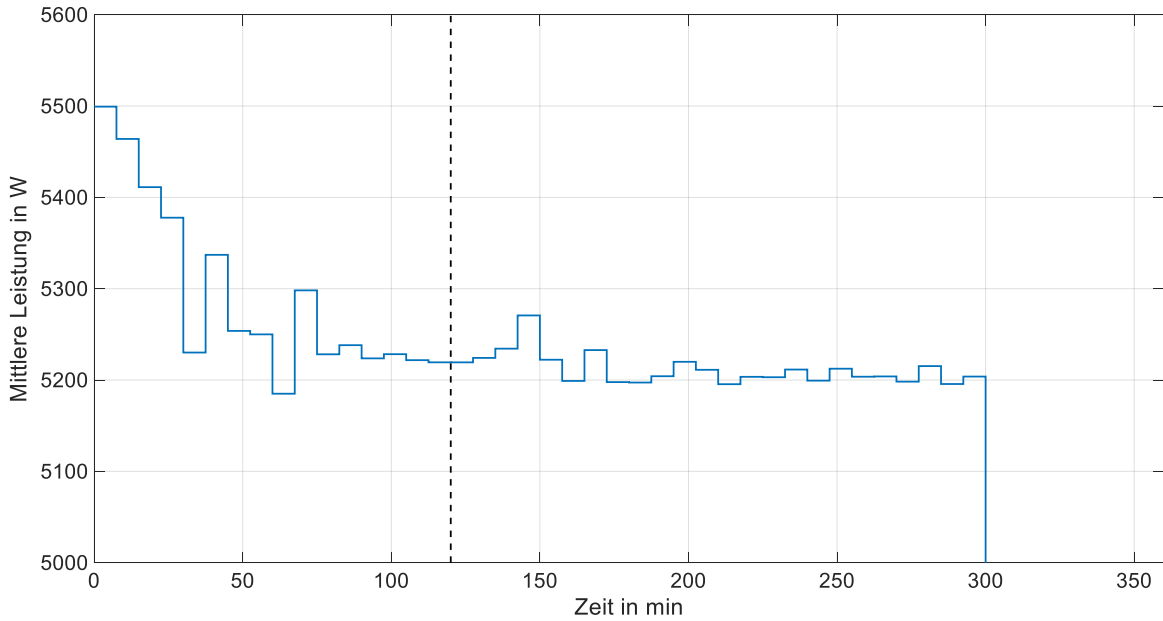


Abbildung 6-11: Mittlere Leistungsaufnahme und Warmlaufverhalten des RBG-1 bei Dauerbetrieb des Fahrtriebs (vgl. [Rüc-2018a])

Ein ähnliches Verhalten kann auch für den Hubantrieb beobachtet werden. Auch hier zeigt sich bei Dauerbetrieb ein deutliches Warmlaufverhalten. Die signifikante Abnahme der Leistung findet auch in den ersten 120 min statt. Vor allem die Aufwärmphase des Getriebes dürfte für den Rückgang der Leistungsaufnahme verantwortlich sein.

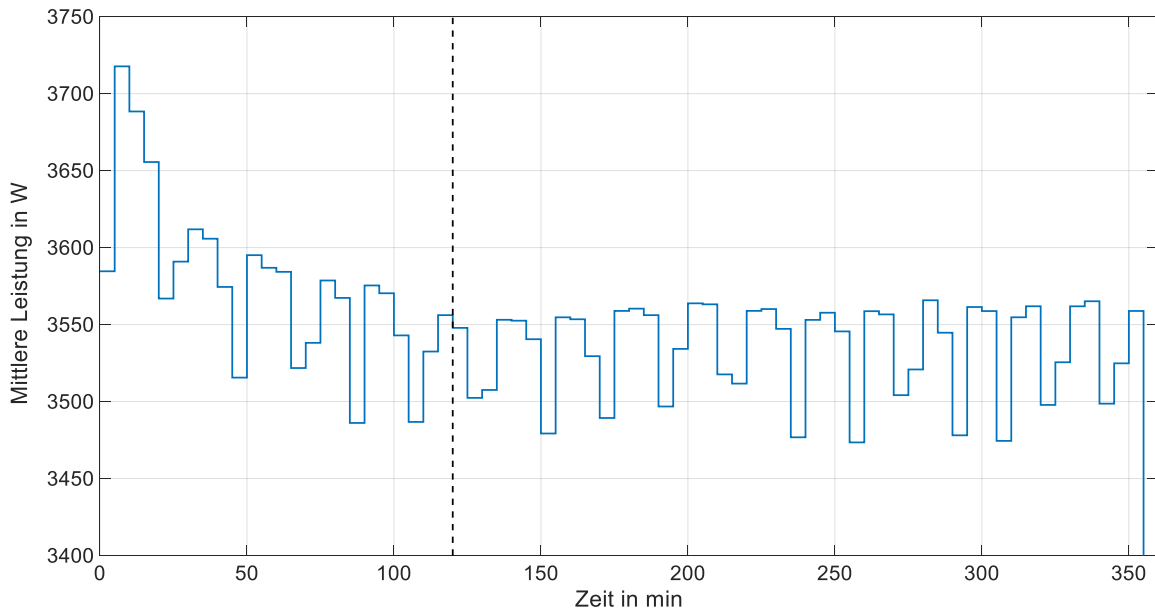


Abbildung 6-12: Mittlere Leistungsaufnahme und Warmlaufverhalten des RBG-1 bei Dauerbetrieb des Hubantriebs

In beiden Abbildung muss die Skalierung beachtet werden, da die y-Achse mit der aufgetragenen Leistung nicht bei 0 anfängt.

Die durchgeführten Messfahrten für die Untersuchung von Fahr- und Hubantrieb sind in den nächsten beiden Abbildungen zu sehen. Nachdem die Messung des Energiebedarfs einer Bewegung statistischen Unsicherheiten unterliegt, müssen viele Bewegungen gemessen werden. Es wurden pro Zustand von Geschwindigkeit und Nutzlast 20 Bewegungen gemessen. In Voruntersuchungen wurde ermittelt, dass diese Anzahl einen guten Kompromiss aus Zeitaufwand und Genauigkeit bildet. Die Fahrbewegung beinhaltet die Hin- oder die Rückfahrt zwischen (1,1) und (7,1). Diese beiden Bewegungen sind physikalisch identisch, weisen in etwa den gleichen Energiebedarf auf und werden deswegen äquivalent behandelt. Die Abbildung 6-13 zeigt die Fahrbewegung für die durchgeführten Messungen am Fahrtrieb. Diese Bewegung zwischen (1,1) und (7,1) nutzt den maximal möglichen Fahrweg des RBG-1 in x Richtung von $s_x = 20978 \text{ mm}$ aus.

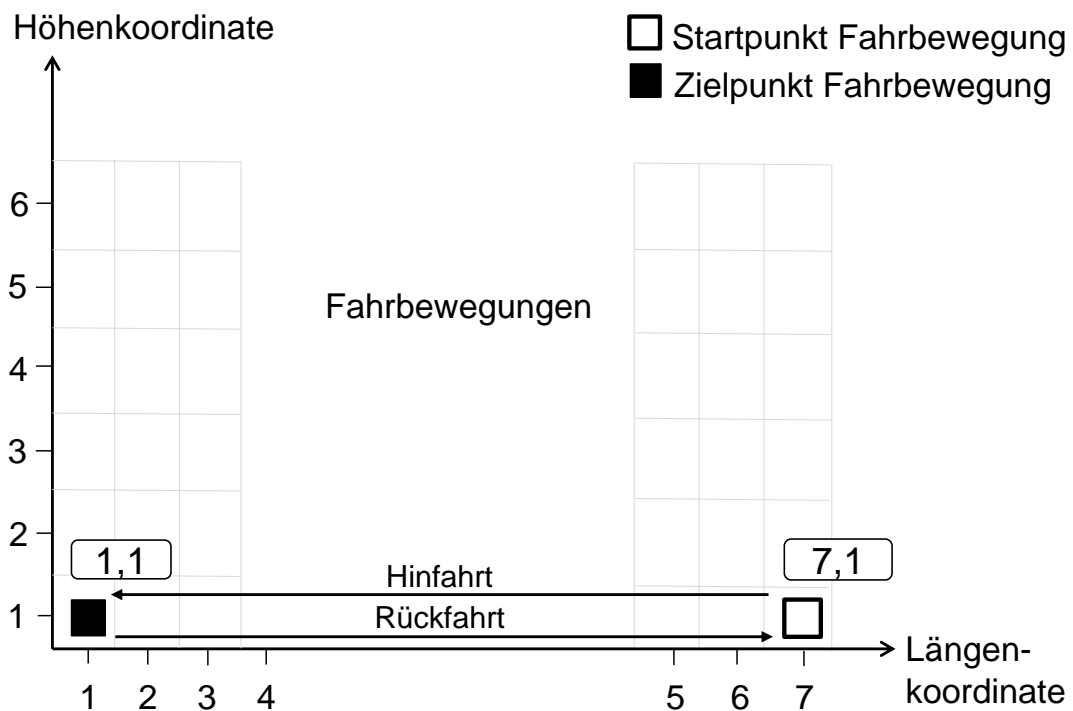


Abbildung 6-13: Bewegung des Fahrtriebs von RBG1 in der Versuchshalle (vergleiche [Rück-2018a])

Die in Abbildung 6-14 dargestellte Hubbewegung wird am Ende der Regalgasse von (7,1) nach (7,6) durchgeführt. Diese nutzt den maximalen Hub von $s_y = 6255 \text{ mm}$ aus.

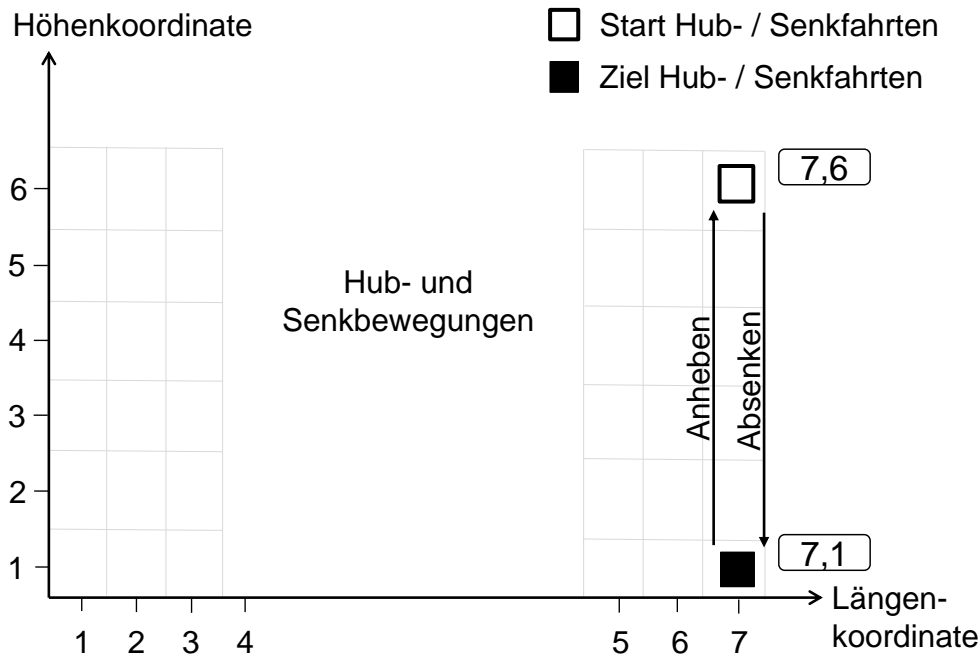


Abbildung 6-14: Bewegung des Hubantriebs von RBG1 in der Versuchshalle (vergleiche [Rück-2018a])

Bei den Messreihen beinhaltet eine Hubbewegung den Energiebedarf für eine Hub- und Senkbewegung. Beim Absenken entsteht kein zusätzlicher Energiebedarf. Es ist keine Energierückspeisung verbaut und deswegen wird keine Energie zurückgewonnen, einzig die Grundlast sinkt beim Senken leicht ab. Die Trennung in der Betrachtung von Hub- und Senkbewegung wurde erst im späteren Verlauf des Projekts entwickelt und ist dann in Kapitel 7.1 beschrieben. Abbildung 6-15 zeigt exemplarisch die Leistungsaufnahme des Fahrtriebs bei einer Messreihe ohne Nutzlast ($m_{NL} = 0 \text{ kg}$). Es sind fünf Blöcke mit je 20 Leistungsspitzen zu sehen. Die fünf Blöcke repräsentieren Fahrgeschwindigkeiten von 6 m/s bis 2 m/s in 1 m/s Schritten.

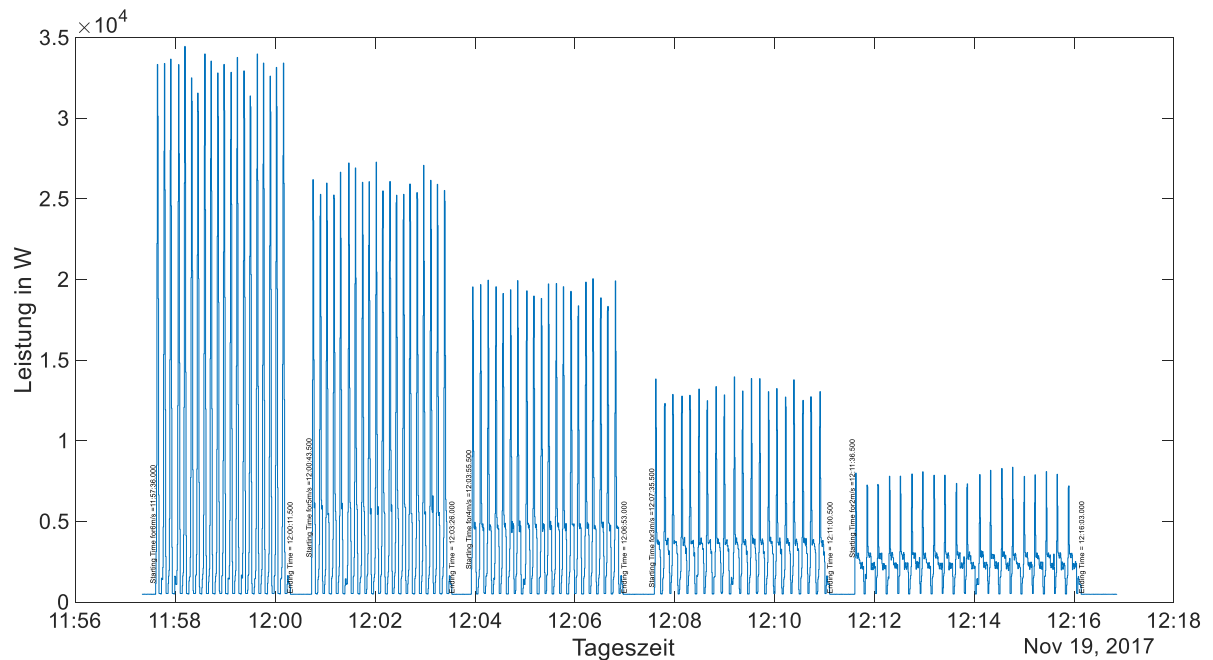


Abbildung 6-15: Leistungsaufnahme des Fahrtriebs von RBG-1 bei einer Messreihe (vgl. [Rüc-2018a])

Bei diesem Diagramm handelt es sich um eine direkte Wiedergabe der aufgezeichneten Messdaten. Deswegen ist hier die Leistung über die Tageszeit aufgetragen. Die Messdaten wurden automatisiert mit Hilfe eines eigens entwickelten Skriptes ausgewertet. Das Skript identifiziert automatisch Beginn und Ende eines Blockes und die einzelnen Fahrten innerhalb eines Blocks. Die daraus gewonnenen einzelnen Energiebedarfe aller Fahrbewegungen aus Abbildung 6-15 sind in Abbildung 6-16 dargestellt. In diesem Balkendiagramm sind auch die Schwankungen des Energiebedarfs einzelner Fahrten bei gleicher Fahrgeschwindigkeit zu sehen.

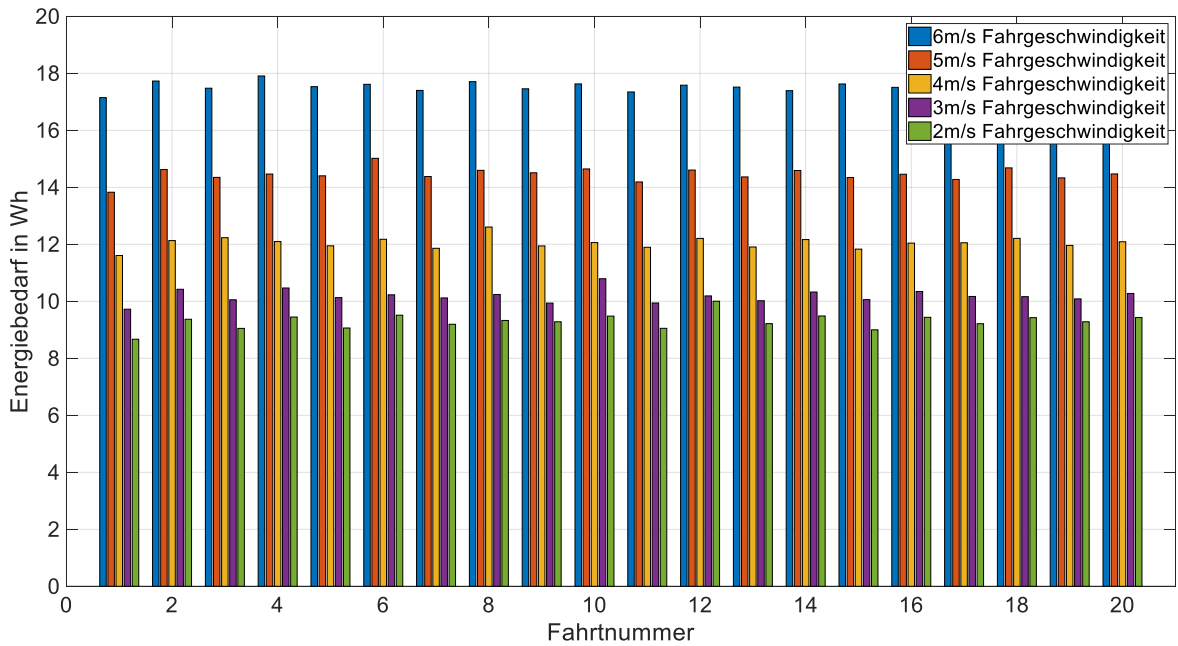


Abbildung 6-16: Energiebedarf der einzelnen Fahrten von RBG-1 bei unterschiedlichen Fahrge-
schwindigkeiten

Aus den einzelnen Energiebedarfen werden für jede Geschwindigkeit der Mittelwert und die Standardabweichung der Stichprobe gebildet. Die Standardabweichung der Stichprobe wird mit der Anzahl der Ereignisse minus eins normalisiert. Diese lassen sich dann kombiniert in einem übersichtlichen Diagramm darstellen (Abbildung 6-17). Die Standardabweichung liegt zwischen 0,5 und 3 % und wird deswegen in den nachfolgenden Diagrammen nur noch vereinzelt dargestellt. Generell konnte beobachtet werden, dass die Standardabweichung mit sinkenden Fahrge-
schwindigkeiten und damit mit steigender Fahrzeit zunimmt.

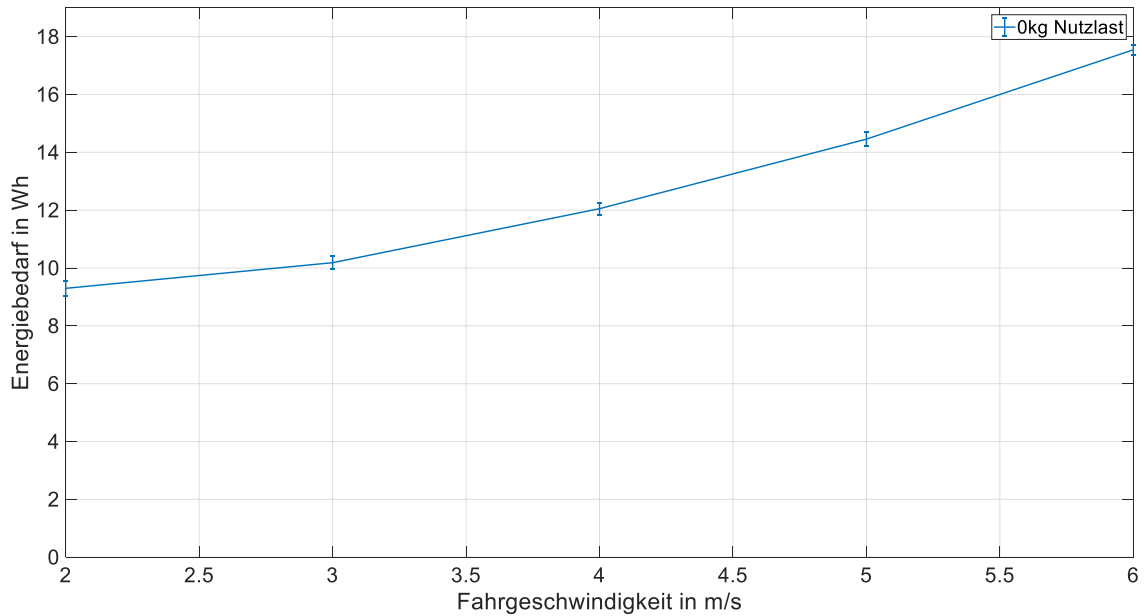


Abbildung 6-17: Mittlerer Energiebedarf und Standardabweichung über Fahrgeschwindigkeit bei RBG-1

Alle Messreihen wurden nach dem gleichen Vorgehen durchgeführt und ausgewertet. Nachdem festgestellt wurde, dass auch die Umgebungstemperatur einen leichten Einfluss auf den Energiebedarf des Fahrtriebs hat, wurden die nachfolgenden Messungen für alle Geschwindigkeiten und Nutzlasten an einem Tag durchgeführt. Das Ergebnis für alle Kombinationen ist in Abbildung 6-18 dargestellt. Hierbei wurde der Energiebedarf der Grundlast herausgerechnet. Damit sind Einflüsse der Grundlast, die sich bei längeren Fahrzeiten auswirken, nicht mehr im Diagramm enthalten. Die Grundlast von RBG-1 beträgt im aufgewärmten Zustand mit laufenden Lüftermotoren während der Messungen 475 W.

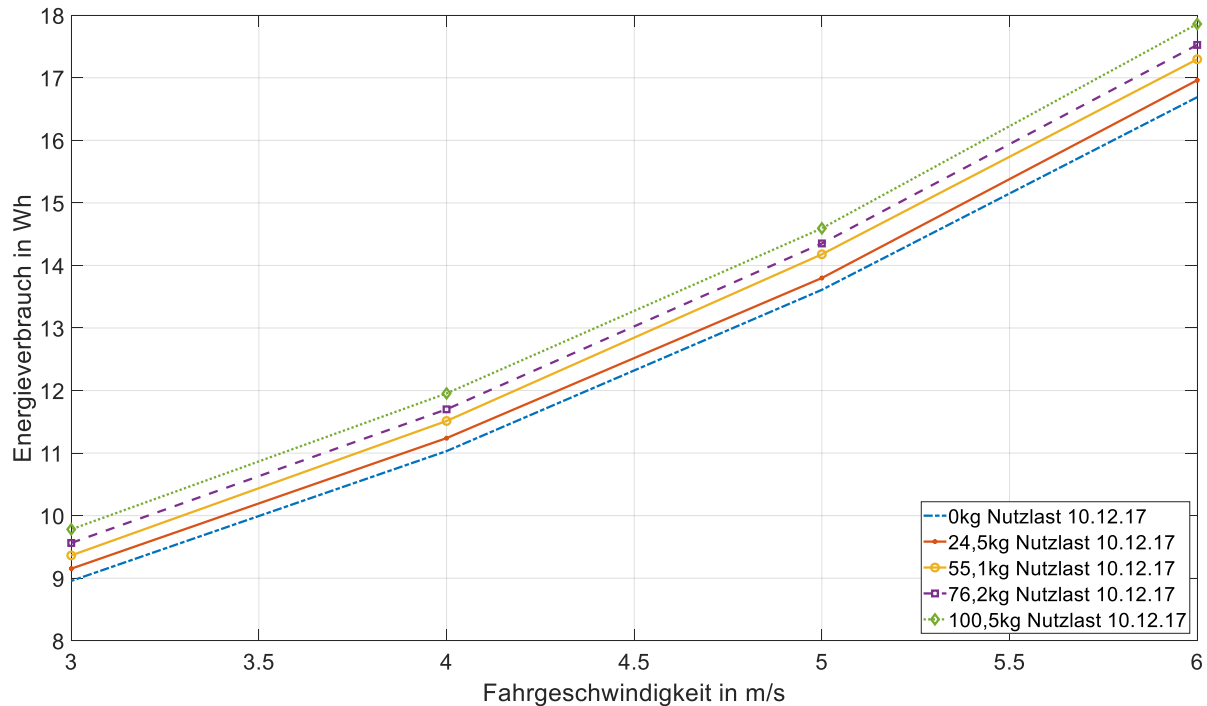


Abbildung 6-18: Energiebedarf des Fahrtriebs von RBG-1 ohne Grundlast [Rüc-2018a]

Die Nutzlast hat einen geringeren Einfluss als die Fahrgeschwindigkeit. Dies lässt sich hauptsächlich mit dem hohen Verhältnis von Eigengewicht zu Nutzlast erklären. Dieses liegt bei einer Nutzlast von 100 kg bei etwa 22. Der Energiebedarf skaliert in etwa linear mit der Nutzlast und mit dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit. [Rüc-2018a]

Die Ergebnisse der Messreihen des Hubwerks sind gesammelt in Abbildung 6-19 dargestellt. In diesem Fall herrscht ein indirekt proportionales Verhältnis zwischen Hubgeschwindigkeit und Energiebedarf. Die Haupteinflüsse auf den Energiebedarf sind Hubhöhe und Nutzlast. Mit steigender Hubgeschwindigkeit sinkt der Energiebedarf zuerst leicht, bevor er anschließend wieder minimal ansteigt. Dieser Einfluss wird durch das Herausrechnen der Grundlast verkleinert. Vereinfacht betrachtet ist der Energiebedarf für die Hubbewegung erst einmal unabhängig von der Hubgeschwindigkeit [Sch-2012a]. Der Energiebedarf berechnet sich mittels Hubhöhe und Nutzlast. Berücksichtigt man die Grundlast, so steigt der Energiebedarf bei niedrigerer Hubgeschwindigkeit, auf Grund der längeren Fahrzeit, an. Nachdem der Einfluss der Grundlast herausgerechnet wurde, könnten geschwindigkeitsabhängige Reibungsverluste ein Grund für das beobachtete Verhalten sein. Eine genauere Erklärung ist Gegenstand aktueller Untersuchungen. Die optimale Hubgeschwindigkeit liegt für den betrachteten Hub je nach Nutzlast zwischen $2,0$ und $2,5\text{ m/s}$. [Rüc-2018a]

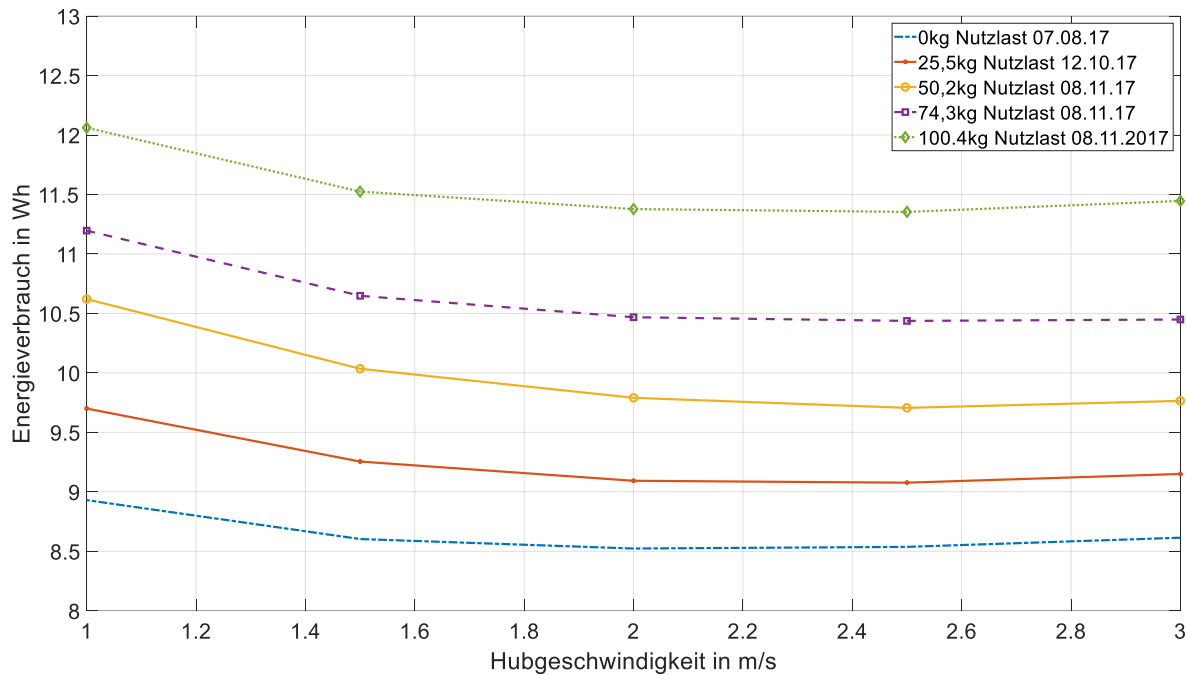


Abbildung 6-19: Energiebedarf des Hubantriebs ohne Grundlast [Rüc-2018a]

Neben der Untersuchung des Einflusses von Nutzlast und Fahrgeschwindigkeit wurde zusätzlich der Einfluss der Beschleunigung auf den Energiebedarf des Fahrtriebs untersucht (siehe Abbildung 6-20). Dazu wurde bei einer festen Maximalgeschwindigkeit von $v_{x,max} = 5 \text{ m/s}$ die Beschleunigung schrittweise nach unten gesenkt. Bei einer Beschleunigung unter $a_x = 1,5 \text{ m/s}^2$ erreicht das RBG in der vorgegebenen Fahrstrecke die Maximalgeschwindigkeit nicht mehr. Damit ist keine sieben Phasen Bewegung mehr möglich. Der Energiebedarf sinkt bis zu dieser Grenze mit abnehmender Beschleunigung leicht und nimmt danach durch die verringerte Maximalgeschwindigkeit deutlich stärker ab.

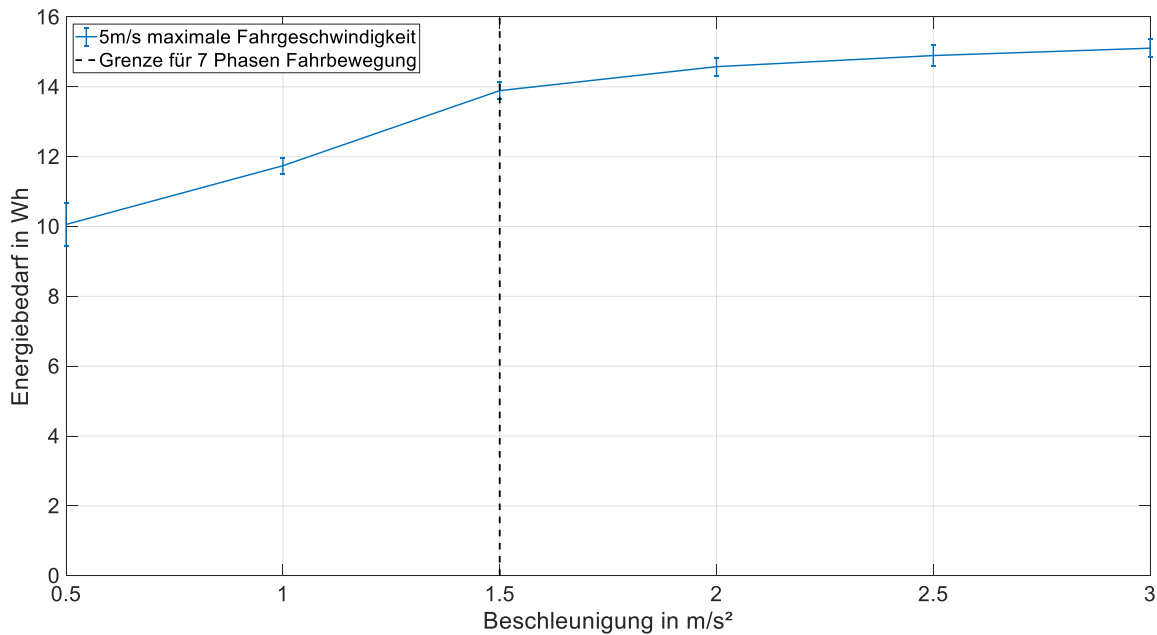


Abbildung 6-20: Einfluss der Beschleunigung auf den Energiebedarf des Fahrtriebs

Mit Hilfe dieser Erkenntnisse wurden die in Kapitel 7.1 beschriebenen Wirkungsgradberechnungen für die Hauptantriebe entwickelt.

Zusätzlich wurden Messungen am LAM durchgeführt. Dabei wurden zwei Parameter untersucht. Einmal die Einlagertiefe / Einlagerposition und die Nutzlast. Am LAM des RBG-1 können maximal zwei KLT mit je ca. 50 kg Nutzlast transportiert werden. Bei der Untersuchung des LAM wurden drei Beladungszustände und zwei verschiedene Einlagertiefen vollfaktoriell untersucht. Die Beladungszustände repräsentieren:

- KLT ohne Zuladung mit Eigengewicht von ca. 4,4 kg → 4,4 kg Nutzlast
- KLT mit ca. 26 kg Zuladung → 30,6 kg Nutzlast
- KLT mit ca. 51 kg Zuladung → 55,4 kg Nutzlast

Daraus ergeben sich die in Abbildung 6-21 dargestellten Energiebedarfe für die Nutzlasten. Da auch der Energiebedarf bei einem Lastwechsel einer gewissen Schwankung unterworfen ist, wurden auch hier jeweils 20 Ein- und Auslagervorgänge und damit 40 Lastwechsel pro untersuchter Kombination aus Einlagertiefe und Beladungszustand durchgeführt. Die Mittelwerte des Energiebedarfs für einen Lastwechsel bei den unterschiedlichen untersuchten Zuständen sind in Abbildung 6-21 dargestellt.

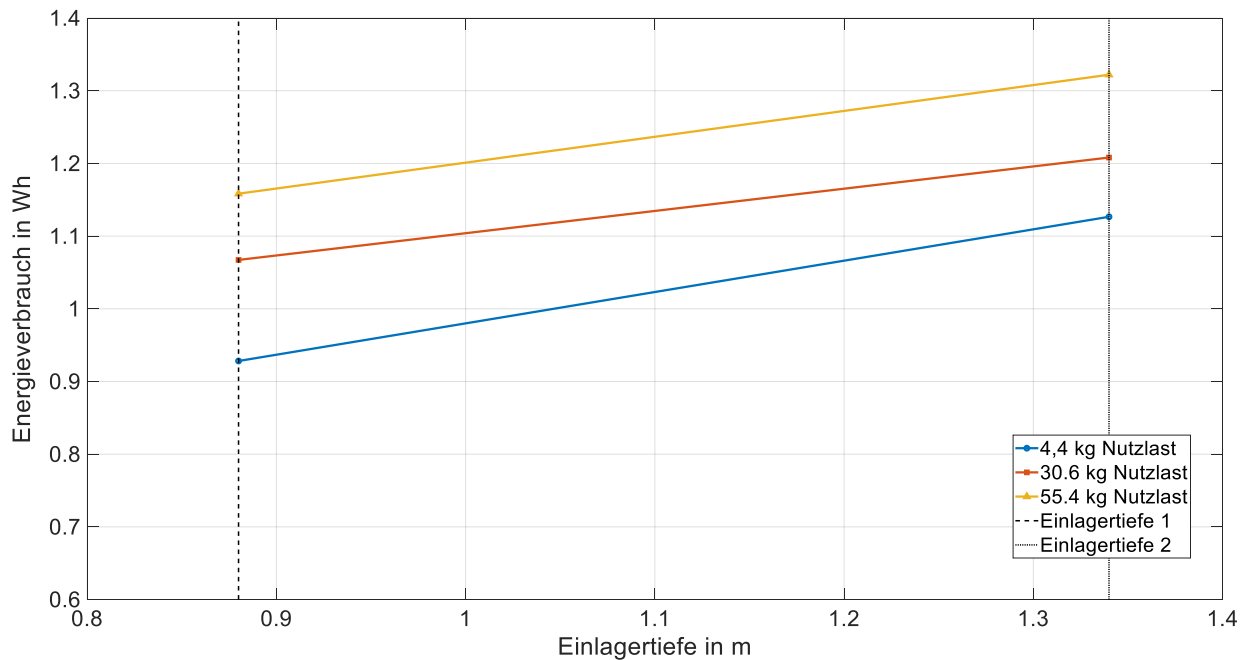


Abbildung 6-21: Energiebedarf für einen Lastwechsel des LAM von RBG-1 [Rüc-2018b]

In diesem Fall ist die Einlagertiefe als tatsächliche Distanz, die der Behälter vom LAM ins Regal zurücklegt, auf der x-Achse aufgetragen. Hier wird ersichtlich, dass sowohl Nutzlast als auch Einlagertiefe bei diesem LAM nur einen geringen Einfluss auf den Energiebedarf haben. Dies ist vor allem der hohen Eigenmasse der bewegten Teile des LAM im Vergleich mit der geringen Nutzlastmasse geschuldet. Der mittlere Energiebedarf für einen Lastwechsellvorgang betrug, bei Annahme einer Gleichverteilung der verschiedenen Beladungen und Einlagertiefen, 1,135 Wh. Aus den Erkenntnissen dieser Messungen und den Messungen am LAM von RBG-2 wurde die in Kapitel 7.3 vorgestellte Bewertung entwickelt.

Messung der kinematischen Parameter

Am RBG-1 wurde das Beschleunigungsverhalten des Gerätes mit dem in der Steuerung vorgegebenen Beschleunigungsprofil verglichen. Dazu wurde das Beschleunigungsprofil der Steuerung in einem Simulationsmodell abgebildet. Das Simulationsmodell basiert auf der mehrfachen Integration des Ruckverlaufs bei einer siebenphasigen Bewegung. Die betrachteten Fahr- und Hubbewegungen entsprechen den vorher beschriebenen. Betrachtet man das Beschleunigungsverhalten des Fahrtriebs in Abbildung 6-22, so kann eine gute Übereinstimmung der gemessenen Beschleunigung mit der vorgegebenen Beschleunigung der Steuerung festgestellt werden. Eine leichte Schwingung im gemessenen Beschleunigungssignal lässt sich dennoch feststellen.

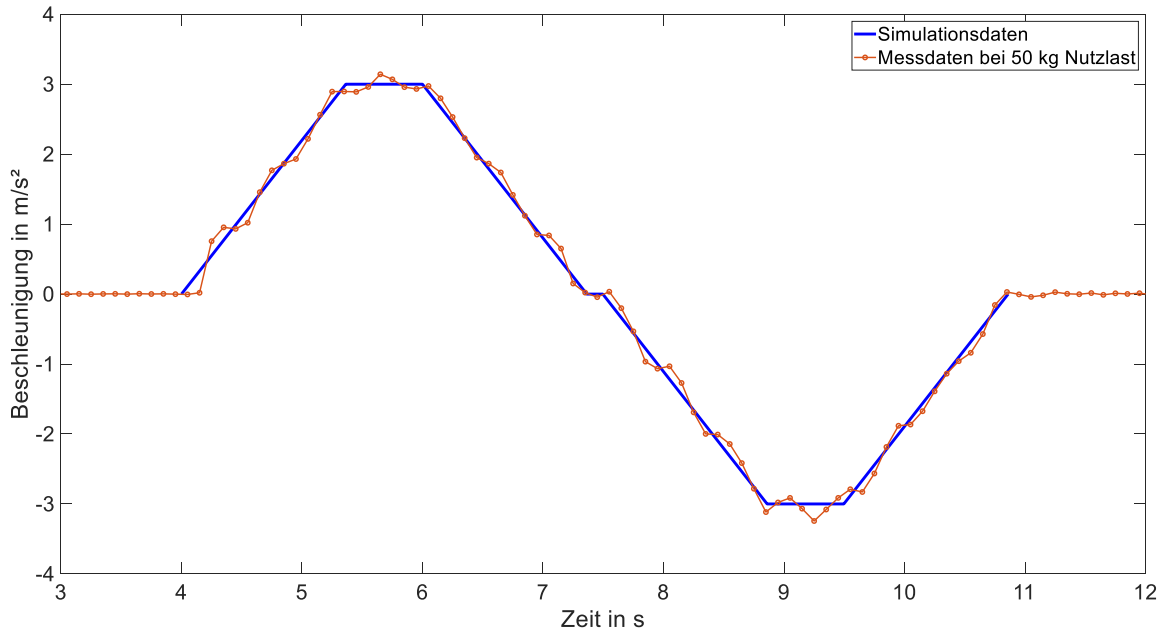


Abbildung 6-22: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Beschleunigung des Fahrtriebs von RBG-1

Die Fahrstrecke entsprach der maximalen Fahrstrecke von ca. 21 m mit der Maximalgeschwindigkeit von 6 m/s. Analog kann man das Beschleunigungsverhalten des Hubantriebs mit dem simulierten Beschleunigungsverhalten vergleichen. Diese Verläufe sind in Abbildung 6-23 dargestellt. Es zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie beim Fahrtrieb. Bei der Beschleunigung auf die Maximalgeschwindigkeit des Hubantriebs von 3 m/s wird bei dieser Fahrstrecke die maximale Beschleunigung von 3 m/s² nur kurz erreicht. Auch die Beschleunigung des Hubantriebs zeigt ein leichtes Schwingungsverhalten, das aber nicht stark ausgeprägt ist.

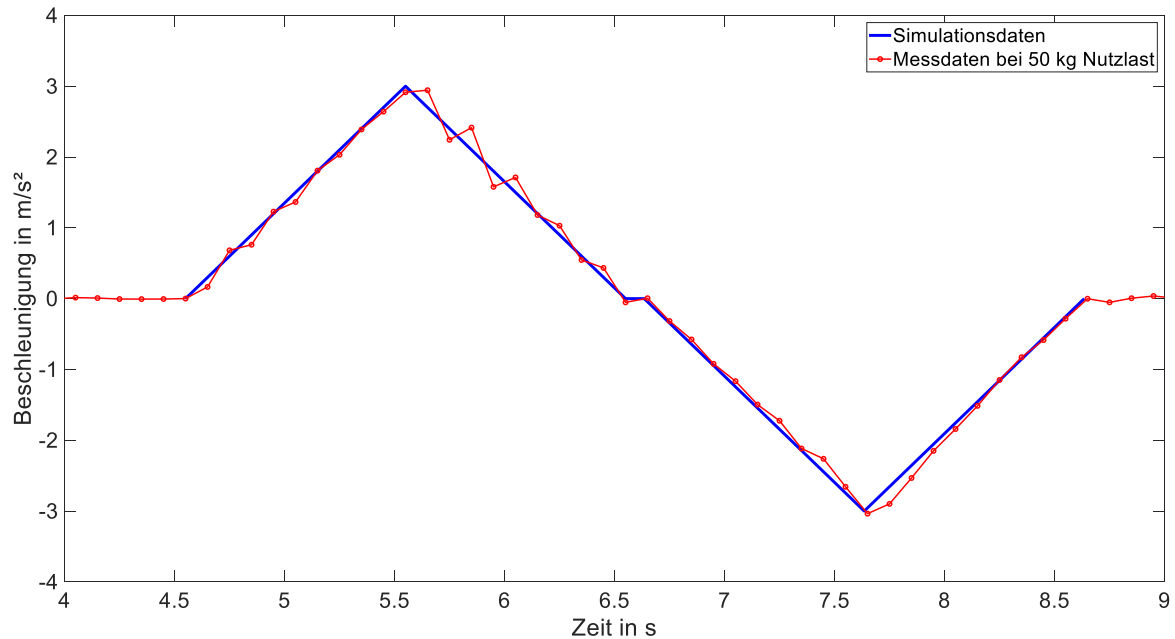


Abbildung 6-23: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Beschleunigung des Hubantriebs von RBG-1

Die zugehörigen Verläufe der Antriebsgeschwindigkeit weisen kaum ein Schwingungsverhalten auf und werden deswegen an dieser Stelle nicht gezeigt. Insgesamt folgen sowohl Fahr- als auch Hubwerk sehr gut der in der Steuerung vorgegebenen Beschleunigungsfunktion. Damit können die vorgegebenen Daten für die Berechnung der Wirkungsgrade verwendet werden. Die gesammelten Daten der kinematischen Parameter und das Ruckverhältnis der Antriebe von RBG-1 sind in Tabelle 6-3 vermerkt.

Tabelle 6-3: Kinematische Parameter des RBG-1

	Fahrtrieb	Hubtrieb
Geschwindigkeit in m/s	6,0	3,0
Beschleunigung in m/s²	3,0	3,0
Ruck in m/s³	2,2	3,0
Ruckverhältnis in 1/s	0,73	1,00

6.5 Messungen an RBG-2

Das RBG-2 ist in den normalen Betrieb eines Logistikzentrums integriert und deswegen waren Messungen nur stark eingeschränkt möglich. Der reguläre Betrieb des RBG

im APL konnte relativ einfach und ohne große Einschränkung des Hochregallagerbetriebs gemessen werden. Während einer Produktionsunterbrechung konnten analog zu den Messungen an RBG-1 auch reine Fahr- und Hubbewegungen, kombinierte Bewegungen und das LAM gemessen werden. Das Gerät wurde zu verschiedenen Zeiten gemessen. Die Fahrbewegungen, die während der Produktionsunterbrechung gemessen werden konnten, sind in Tabelle 6-4 vermerkt. Die Kurzbezeichnungen F1, F2, H1, H2 und KB werden nachfolgend für die Beschreibung der Ergebnisse verwendet.

Tabelle 6-4: Gemessene Fahrbewegungen des RBG-2

Bewegung	Startkoordinate	Zielkoordinate	Fahrstrecke in m	Hubhöhe in m
Fahrbewegung 1 (F1)	1,1	18,1	17,6	0
Fahrbewegung 2 (F2)	1,1	30,1	30,0	0
Hubbewegung 1 (H1)	1,1	1,5	0	4,8
Hubbewegung 2 (H2)	2,1	2,14	0	15,9
Kombinierte Bewegung (KB)	1,1	18,5	17,6	4,8

Eine Variation der Geschwindigkeit konnte nicht durchgeführt werden. Es wurden jeweils Fahrten mit und ohne Nutzlast gemessen. Als Nutzlast kam eine Gitterbox samt Ladung mit einem Gesamtgewicht von 435 kg zum Einsatz. Im Gegensatz zum RBG-1 konnte bei den Messungen von RBG-2 jede Bewegung nur dreimal wiederholt werden, da der Zeitaufwand sonst zu groß geworden wäre.

Messung der elektrischen Leistung

Der Energiebedarf der gemessenen Bewegungen F1 und F2 ist jeweils in Abbildung 6-24 dargestellt. Dabei sind für F1 und F2 jeweils vier Energiebedarfswerte aufgetra-

gen – der Energiebedarf mit und ohne Zuladung und jeweils auch mit und ohne Grundlast. Ohne Zuladung bedeutet hier, dass sich auch keine leere Gitterbox am LAM befand. Die Grundlast wurde in der Messung zu $P_{GL,RBG-2} \approx 600 \text{ W}$ bestimmt. Eine Besonderheit zeigt sich hier sofort. Der Energiebedarf ohne Nutzlast ist größer als der Energiebedarf mit Nutzlast. Das könnte mit Aufwärmeeffekten zusammenhängen, da zuerst alle Bewegungen ohne Nutzlast gemessen wurden. Der Energiebedarf hängt zusätzlich nur schwach von der Nutzlast ab und die statistische Gültigkeit der Messergebnisse ist auf Grund der geringen Anzahl an Fahrten eingeschränkt. Der Energiebedarf nimmt über die Fahrstrecke zu, das Herausrechnen der Grundlast führt zu einer konstanten Senkung des Energiebedarfs und hat damit auf die grundsätzlichen Effekte keinen Einfluss. Die schwache Abhängigkeit von der Nutzlast hängt hauptsächlich mit den Massenverhältnissen am RBG zusammen. Bei einem gesamten Eigengewicht von 8620 kg ergibt sich bei einer Nutzlast von 435 kg ein Verhältnis von Eigengewicht zu Nutzlast von ~ 20 . Die Abhängigkeit des Energiebedarfs von der Nutzlast ist aber größer als bei RBG-1.

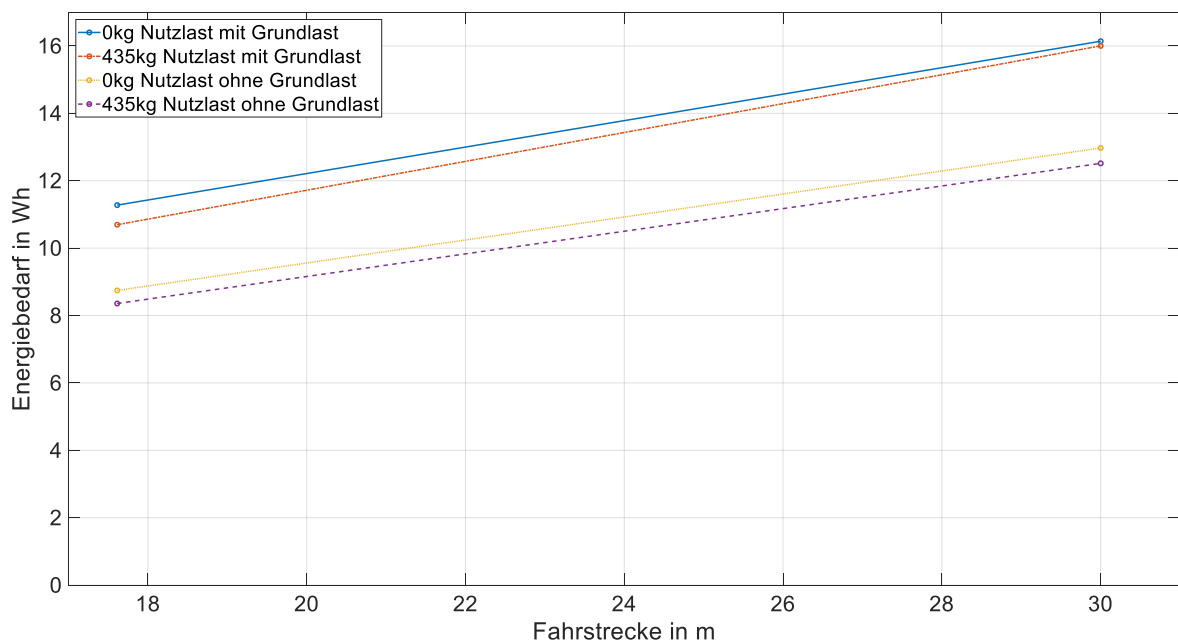


Abbildung 6-24: Energiebedarf des Fahrtriebs von RBG-2 bei den Bewegungen F1 und F2

Die entsprechenden Energiebedarfe für die Bewegungen H1 und H2 sind in Abbildung 6-25 dargestellt. Hier zeigen sich starke Abhängigkeiten des Energiebedarfs von der Hubhöhe und der Nutzlast. Das Herausrechnen der Grundlast verringert die Abhängigkeit von der Hubhöhe, da Effekte, die rein aus der verlängerten Hubzeit kommen, nicht mehr berücksichtigt werden.

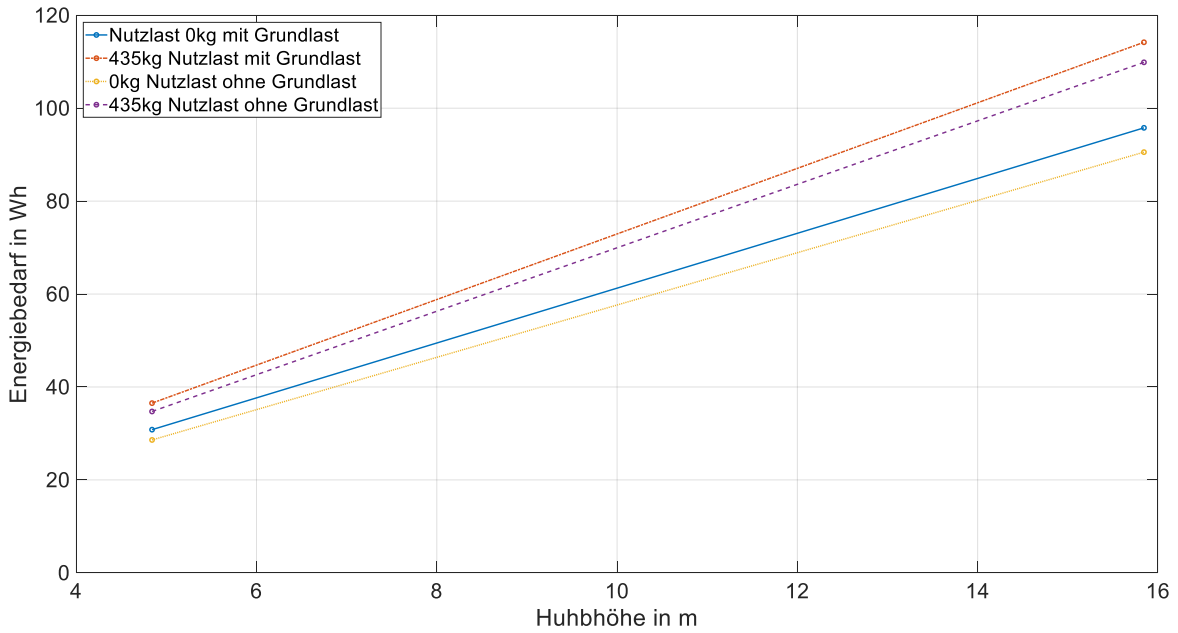


Abbildung 6-25: Energiebedarf des Hubantriebs von RBG-2 bei den Bewegungen H1 und H2

Für eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse von Energiebedarfsmessungen wurde die sogenannte Kartendarstellung entwickelt. Diese stellt den Energiebedarf zum Anfahren einer Position schematisch über der Regalwand dar. Eine solche Darstellung wurde in Abbildung 6-26 genutzt, um die Energiebedarfe aller Bewegungen mit Nutzlast und Grundlast darzustellen.

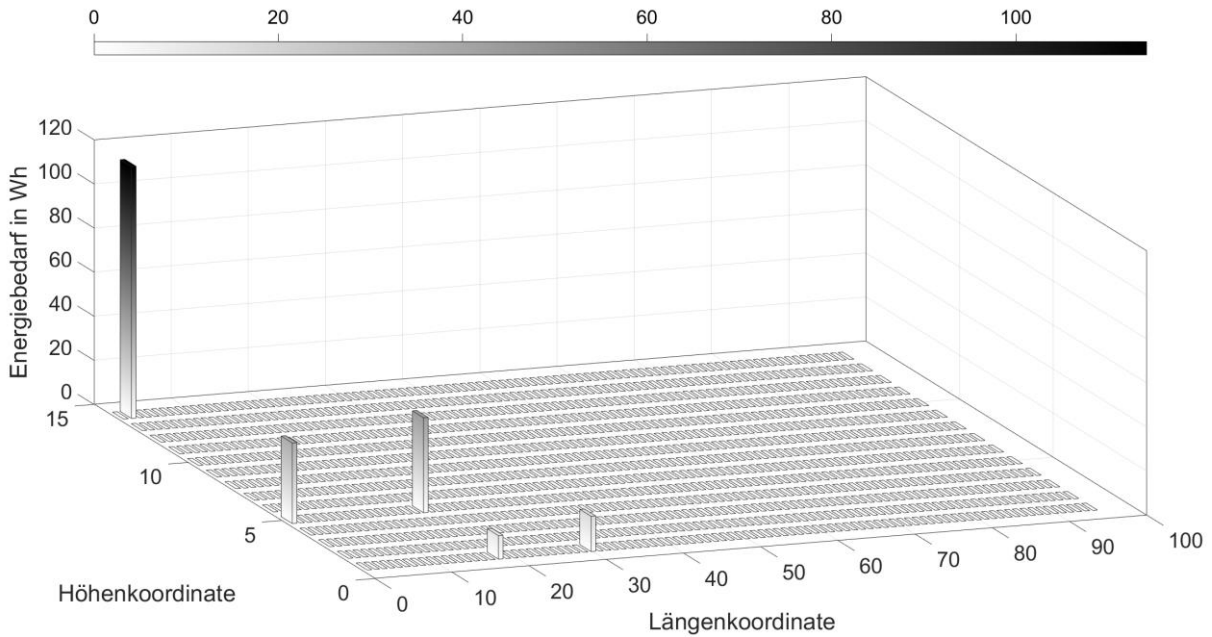


Abbildung 6-26: Zusammenstellung des Energiebedarfs der Bewegungen von RBG-2 in Kartendarstellung

Die Kartendarstellung ermöglicht einen schnellen und übersichtlichen Vergleich, aber die einzelnen Werte können schlecht abgelesen werden. Die dargestellten Werte können daher in Tabelle 6-5 nachgelesen werden.

Tabelle 6-5: Ergebnisse der Energiebedarfsmessung mit Nutzlast des RBG-2

Bewegung	Fahrstrecke in m	Hubhöhe in m	Energiebedarf in Wh	Energiebedarf ohne Grundlast in Wh
F1	17,6	0,0	10,7	8,4
F2	30,0	0,0	16,0	12,5
H1	0,0	4,8	36,5	34,7
H2	0,0	15,8	114,2	109,9
KB	17,6	4,8	43,1	36,7

Abschließend wurde eine kurze Messung am LAM des RBG-2 durchgeführt. Dabei konnten drei Einlagerungen und zwei Auslagerungen gemessen werden. Die Energiebedarfe dieser fünf Lastwechsel sind in Abbildung 6-27 dargestellt. Die Bewegungen 1, 3 und 5 sind Einlagervorgänge, die Bewegungen 2 und 4 Auslagervorgänge. Die Auslagerungen weisen einen höheren Energiebedarf als die Einlagerungen auf. Dies ist durch den Energiebedarf beim Heben der Palette während der Auslagerung bedingt.

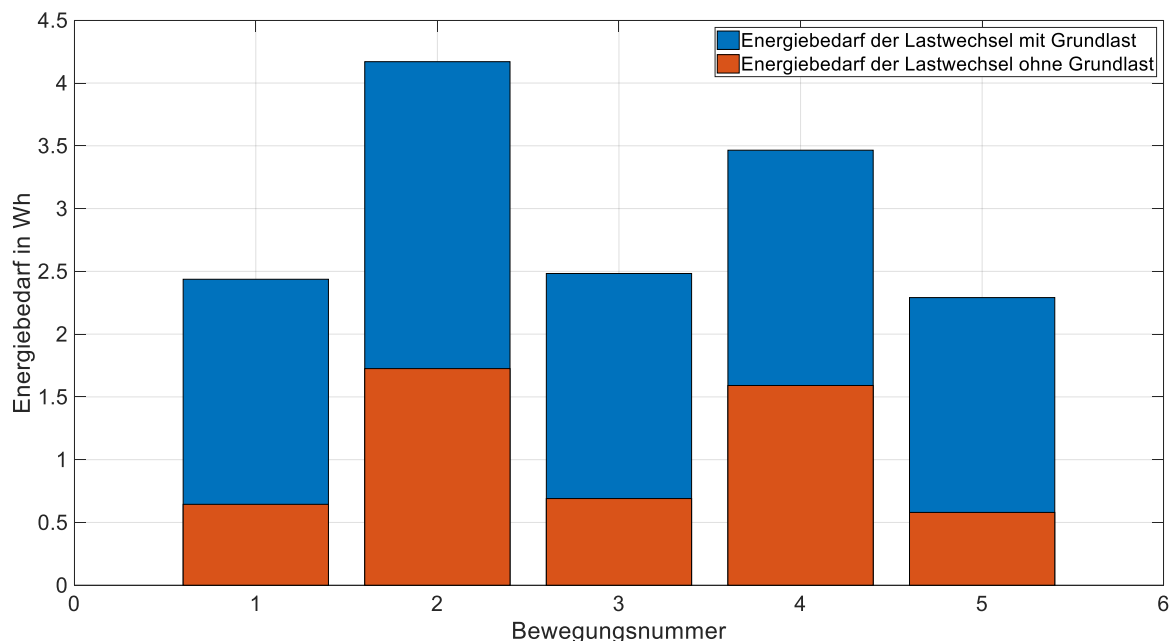


Abbildung 6-27: Energiebedarf der Lastwechsel des LAM von RBG-2

Die Werte für die Zeitdauer eines Lastwechsels und die zugehörigen Energiebedarfe sind in Tabelle 6-6 aufgeführt.

Tabelle 6-6: Ergebnisse der Energiebedarfsmessung des LAM von RBG-2

Bewegungsnummer	Zeitdauer in s	Energiebedarf mit Grundlast in Wh	Energiebedarf ohne Grundlast in Wh
1	11	2,44	0,64
2	15	4,17	1,73
3	11	2,48	0,69
4	11	3,47	1,59
5	10	2,29	0,58

Nimmt man den Mittelwert der ersten vier Bewegungen, so wird im Schnitt bei einem Lastwechsel ohne Grundlast ein Energiebedarf von 1,162 Wh verbraucht. Dieser Energiebedarf ist dem von RBG-1 ähnlich, allerdings dauert ein Lastwechsel bei RBG-1 deutlich kürzer und es wurde ein Mittelwert aus verschiedenen Beladungszuständen und Einlagertiefen betrachtet. Die Nutzlast ist bei RBG-1 geringer aber durch die höhere Geschwindigkeit ist der Energiebedarf beim Lastwechsel mit dem von RBG-2 vergleichbar.

Abschließend wurde in einer separaten Messung das Langzeitverhalten der Leistungsaufnahme des RBG-2 untersucht. Dazu wurde eine Messung mit einer Messdauer von ca. einer Woche durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messung sind in Abbildung 6-28 dargestellt.

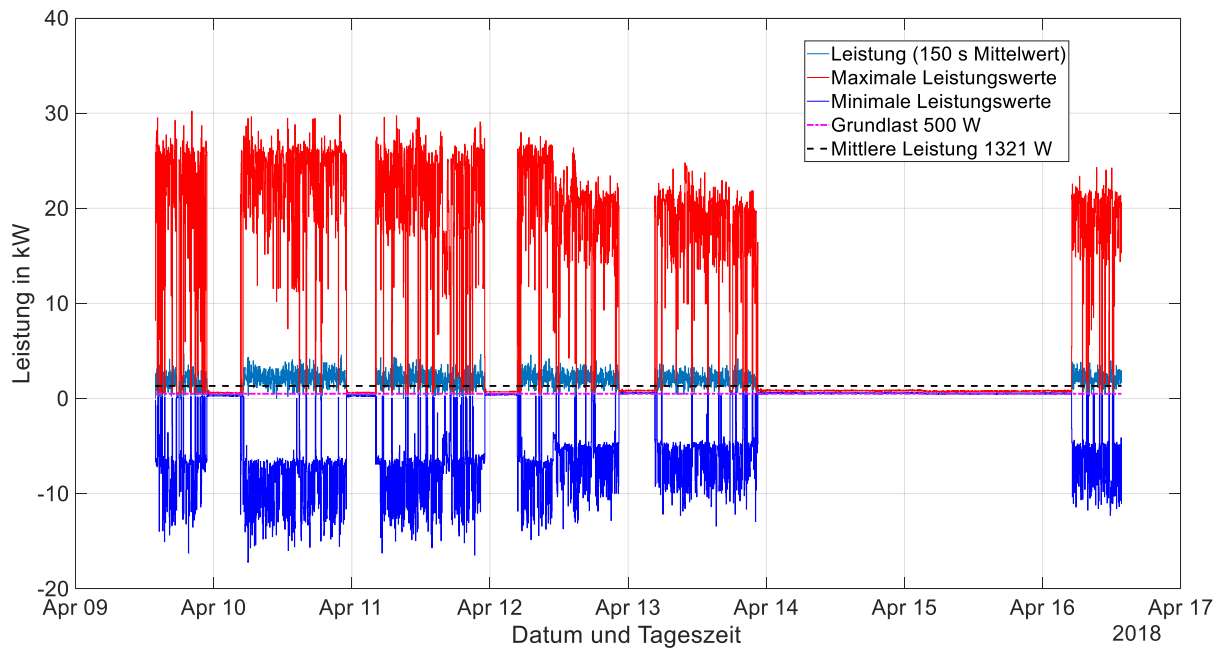


Abbildung 6-28: Ergebnisse einer Langzeitmessung an RBG-2 [Rüc-2018b]

Insgesamt sind fünf Leistungskurven dargestellt.

1. Der gemessene 150 s Leistungsmittelwert: Dieser wird vom Messgerät aufgezeichnet.
2. Der maximale Leistungswert: In jedem 150 s Intervall wird vom Messgerät zusätzlich ein Maximalwert der Leistung aufgezeichnet.
3. Der minimale Leistungswert: In jedem 150 s Intervall wird vom Messgerät zusätzlich ein Minimalwert der Leistung aufgezeichnet, dieser liegt auf Grund der verbauten Energierückspeisung im negativen Bereich.
4. Die Grundlast: Diese lag im betrachteten Zeitraum, bzw. über die Zeiten in denen das RBG keine Fahrbewegungen ausgeführt hat, bei $\sim 500\text{ W}$.
5. Die mittlere Leistung: Dies ist die aufgenommene elektrische Leistung über den kompletten Messzeitraum gemittelt.

Auffällig ist, dass die mittlere Leistung im Verhältnis zur Grundlast sehr niedrig ist. Das Gerät wird in zwei Schichten betrieben und in der Nacht finden Umlagerungen statt. Die Messung beginnt und endet an einem Montag. Am Wochenende steht das Gerät still. Diese Umstände und die verbaute Energierückspeisung sorgen dafür, dass die im Mittel verbrauchte Leistung nur bei 1321 W liegt. Das heißt, $\sim 38\%$ des gesamten

Energiebedarfs werden von der Grundlast benötigt. Die maximal aufgenommene Leistung liegt bei $\sim 30 \text{ kW}$ und ist damit um ein Vielfaches höher als die im Mittel aufgenommene Leistung.

Messung der kinematischen Parameter

Im Rahmen der Messungen am RBG-2 konnte auch das Beschleunigungsverhalten von Fahr- und Hubantrieb gemessen werden. In diesem Fall standen aber keine detaillierten Informationen zu den Beschleunigungen und Ruckwerten in der Steuerung zur Verfügung. Die Werte wurden deswegen mit Hilfe des gemessenen Beschleunigungssignals eingestellt. In Abbildung 6-29 ist der gemessene Beschleunigungsverlauf des Fahrwerks im Vergleich mit dem simulierten Verlauf dargestellt. Der gemessene Verlauf zeigt ein deutliches Schwingungsverhalten des Systems. Diese Schwingung kann mit dem hohen Ruckverhältnis und der deutlich schwereren Konstruktion des RBG erklärt werden.

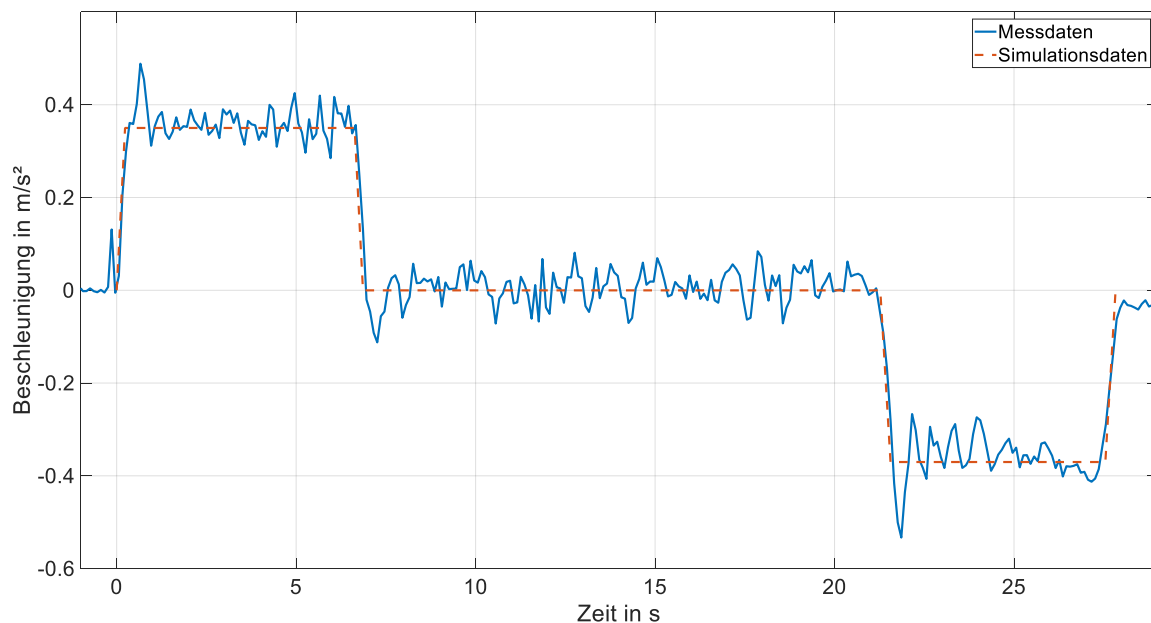


Abbildung 6-29: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Beschleunigung des Fahrwerks von RBG-2

Der Fahrtrieb ist mittels angetriebenem Laufrad ausgeführt. Dieser Antrieb lässt aus physikalischen Gründen keine hohen Maximalbeschleunigungen zu. Um jetzt die Beschleunigungszeiten in einem erträglichen Maß zu halten, wird ein hoher Anfahrtsruck benötigt. Die Fahrstrecke während der gemessenen Bewegung betrug $\sim 49 \text{ m}$. Die

nachstehende Abbildung 6-30 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf, der aus diesem Beschleunigungsverlauf resultiert.

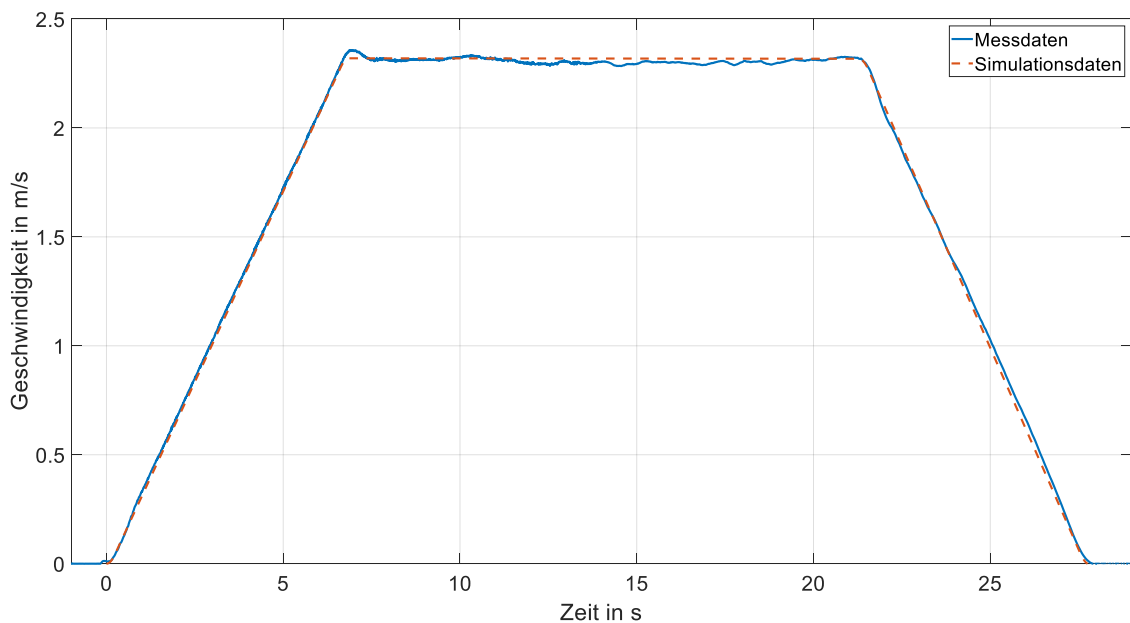


Abbildung 6-30: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Geschwindigkeit des Fahrwerks von RBG-2

Aus der starken Schwingung im Beschleunigungsverlauf resultiert eine leichte Schwankung im Geschwindigkeitsverlauf.

Der Beschleunigungsverlauf des Hubwerks ist in Abbildung 6-31 gezeigt. Auch hier zeigt sich ein deutliches Schwingungsverhalten im Beschleunigungssignal. An dieser Stelle werden in der Simulation für die Hub- und Senkbeschleunigung verschiedene Beschleunigungswerte verwendet. An dieser Stelle soll aber nur die Beschleunigung beim Hub betrachtet werden. Die Hubhöhe bei dieser Bewegung betrug $\sim 8,2\text{ m}$.

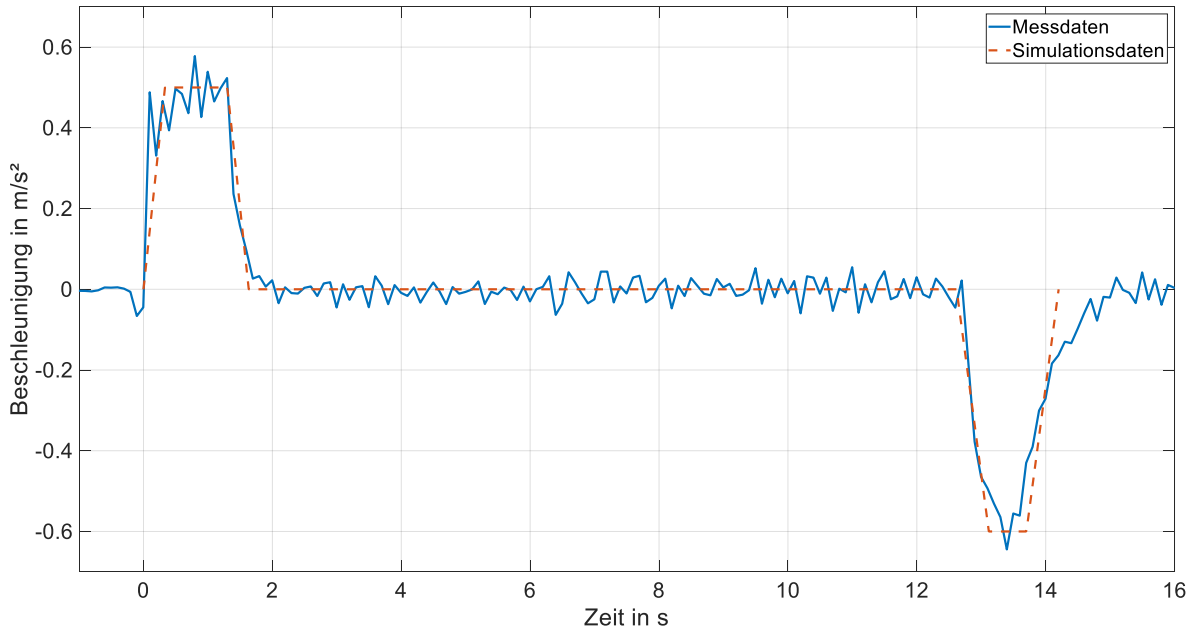


Abbildung 6-31: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Beschleunigung des Hubwerks von RBG-2

In Abbildung 6-32 ist der zugehörige Verlauf der Geschwindigkeit dargestellt. Auch hier kann eine leichte Schwankung des Geschwindigkeitsverlaufs festgestellt werden.

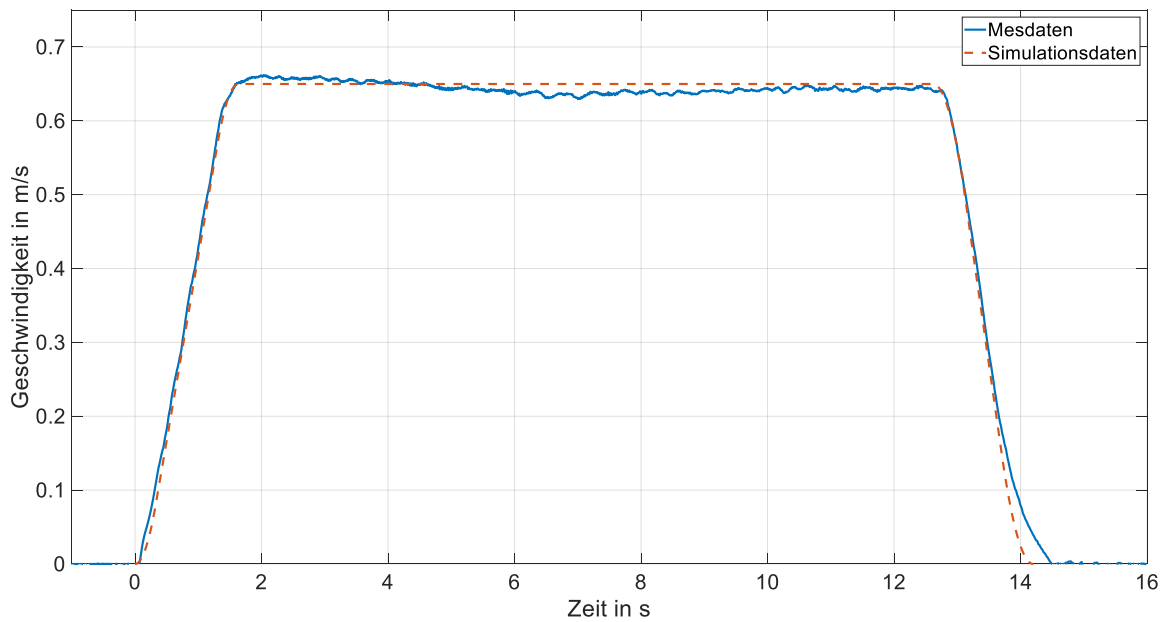


Abbildung 6-32: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Geschwindigkeit des Hubwerks von RBG-2

Die kinematischen Parameter der Antriebe sind in Tabelle 6-7 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 6-7: Kinematische Parameter des RBG-2

	Fahrtrieb	Hubtrieb
Max. Geschwindigkeit in m/s	2,3	0,64
Max. Beschleunigung in m/s ²	0,35	0,5
Max. Ruck in m/s ³	1,0	2,0
Ruckverhältnis in 1/s	2,86	4,00

Die Werte des Hubantriebs beziehen sich hier auf die Hubbewegung. Tatsächlich sind in der Steuerung für Hub- und Senkbewegung die gleichen Beschleunigungs- und Ruckwerte hinterlegt, allerdings weichen die tatsächlich gemessenen Werte beim Senkvorgang davon ab. Dies ist vermutlich durch den Einfluss der Erdbeschleunigung bedingt.

6.6 Messungen an RBG-3

Am RBG-3 konnten vor Schichtbeginn noch eine Hin- und eine Rückfahrt, eine Hub- und eine Senkbewegung und eine kombinierte Hin- und Rückfahrt gemessen werden. Dabei konnten sowohl die Leistungsaufnahme als auch die Beschleunigungswerte gemessen werden. Danach wurde die Leistungsaufnahme während des normalen Lagerbetriebs gemessen.

Messung der elektrischen Leistung

Zu Beginn wurden die einzelnen Bewegungen gemessen. Eine Wiederholung der Bewegungen zur statistischen Absicherung war ebenso wie Aufwärmfahrten nicht möglich. Einzig für die Fahrbewegungen wurde der Mittelwert aus Hin- und Rückfahrt gebildet. Für das RBG wurden dennoch exemplarisch Energiebedarfe und Wirkungsgrade (siehe Kapitel 7.1.4) für die einzelnen Fahrten ausgewertet. Die Testfahrten fanden ohne Beladung statt. Die aufgezeichneten Leistungswerte für diese Fahrten sind in Abbildung 6-33 dargestellt. In dieser und auch den nachfolgenden Abbildungen mit Leistungskurven werden jeweils vier Kurven gezeigt. Einmal die gemessene Leistung des Messgerätes als 0,5 s oder 5 s Mittelwert, die Grundlast, die mittlere Leistung und der Maximalwert der Leistung in der Aufzeichnung. Dieser Maximalwert kann noch

über dem höchsten 0,5 s Mittelwert liegen. Das Gerät besitzt eine Energierückspeicherung, deswegen befinden sich am Ende von Bewegungen auch negative Leistungsspitzen. In der ersten Abbildung sieht man im Feld (1) die zwei positiven Leistungsspitzen für die Hin- und Rückfahrt. Danach kommen eine positive und eine negative Leistungsspitze in Feld (2) für die Hub- und Senkbewegung. Abschließend sind in Feld (3) die Leistungskurven für die kombinierte Hin- und Rückfahrt gezeigt. Ausgewertet wurde der Energiebedarf der Hinfahrt, weil dieser für die spätere Bewertung relevant ist. Die gemessene Grundlast liegt bei diesem Gerät bei $\sim 600\text{ W}$. Die maximale Leistungsaufnahme lag bei $\sim 51,7\text{ kW}$.

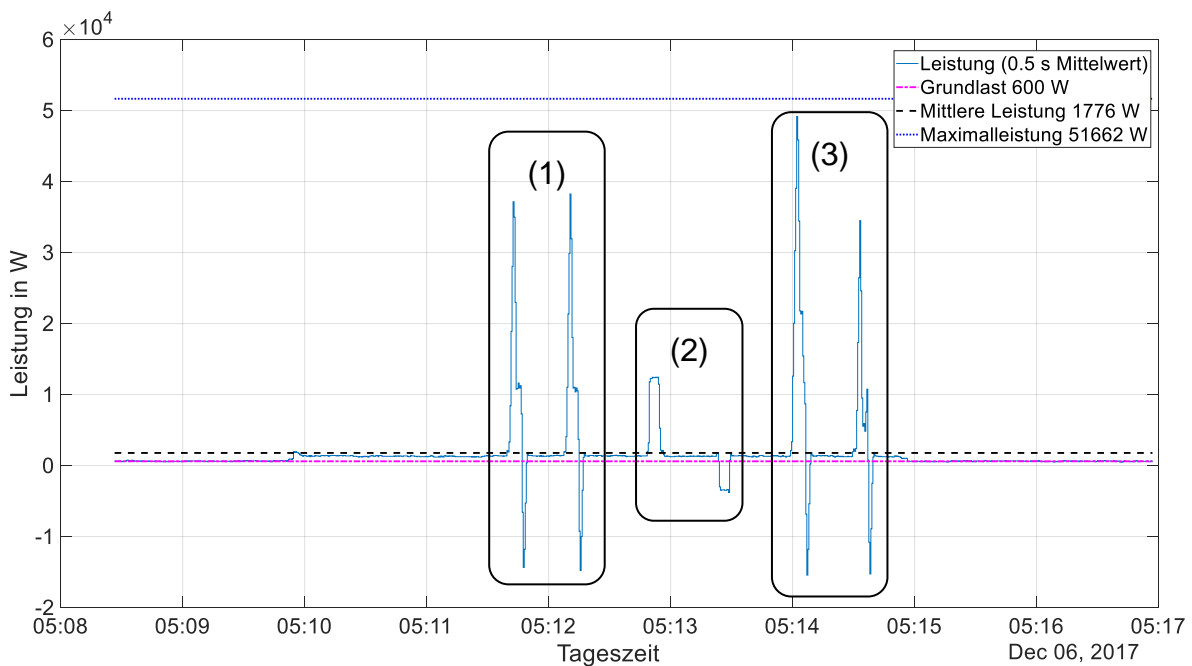


Abbildung 6-33: Leistungsaufnahme des RBG-3 während des Messintervalls 1

Abbildung 6-34 zeigt die ausgewerteten Energiebedarfe der einzelnen Bewegungen in Kartendarstellung. Diese Werte werden in Kapitel 7.1.4 für die Auswertung der Wirkungsgrade verwendet.

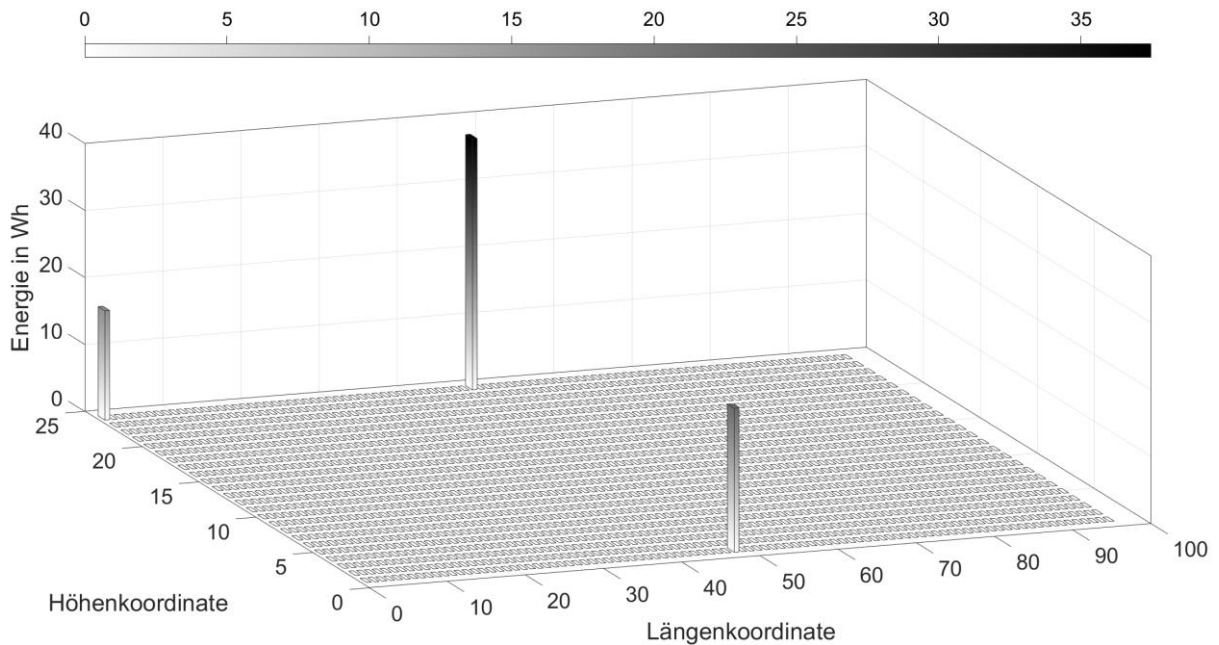


Abbildung 6-34: Energiebedarf von RBG-3 während der Messfahrten ohne Grundlast in Kartendarstellung

Die in Abbildung 6-34 dargestellten Werte können in Tabelle 6-8 nachgelesen werden.

Tabelle 6-8: Ergebnisse der Energiebedarfsmessung ohne Nutzlast und ohne Grundlast des RBG-3

Bewegung	Fahrstrecke in m	Hubhöhe in m	Energiebedarf in Wh
Fahrbewegung	36,2	0,0	21,5
Hubbewegung	0,0	10,4	16,3
Kombinierte Bewegung	36,2	10,4	37,5

Die nächsten beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Leistungsmessung für zwei Messintervalle im normalen Lagerbetrieb. Zunächst wird in Abbildung 6-35 das erste Messintervall mit 36 min Länge gezeigt. Dieses fand zu Beginn des RBG-Betriebs statt. Zu Beginn verbraucht das RBG nur seine Grundlast, während ab ca. 05:28 die Ein- und Auslagerungen anfangen. Auffällig ist, dass nach Stillstand des RBG die anliegende Leistung für einen Zeitraum, der deutlich länger als ein Lastwechsel dauert, auf einem höheren Niveau verbleibt. Dies könnte durch das elektrische Halten des LAM vor dem Einfall der Bremse erklärt werden. Die mittlere aufgenommene Leistung liegt in diesem Intervall bei $\sim 3100\text{ W}$, gleichzeitig beträgt die maximal aufgenommene Leistung $\sim 47,4\text{ kW}$. Hohe Verhältnisse zwischen maximaler Leistung und mittlerer aufgenommener Leistung sind für RBG typisch. Für die Beschleunigung auf die volle

Fahrgeschwindigkeit bei gleichzeitigem Hub ist eine hohe Leistung erforderlich. Auch hier spielt die Grundlast eine nicht unerhebliche Rolle und macht $\sim 19,4\%$ des gesamten Energiebedarfs aus.

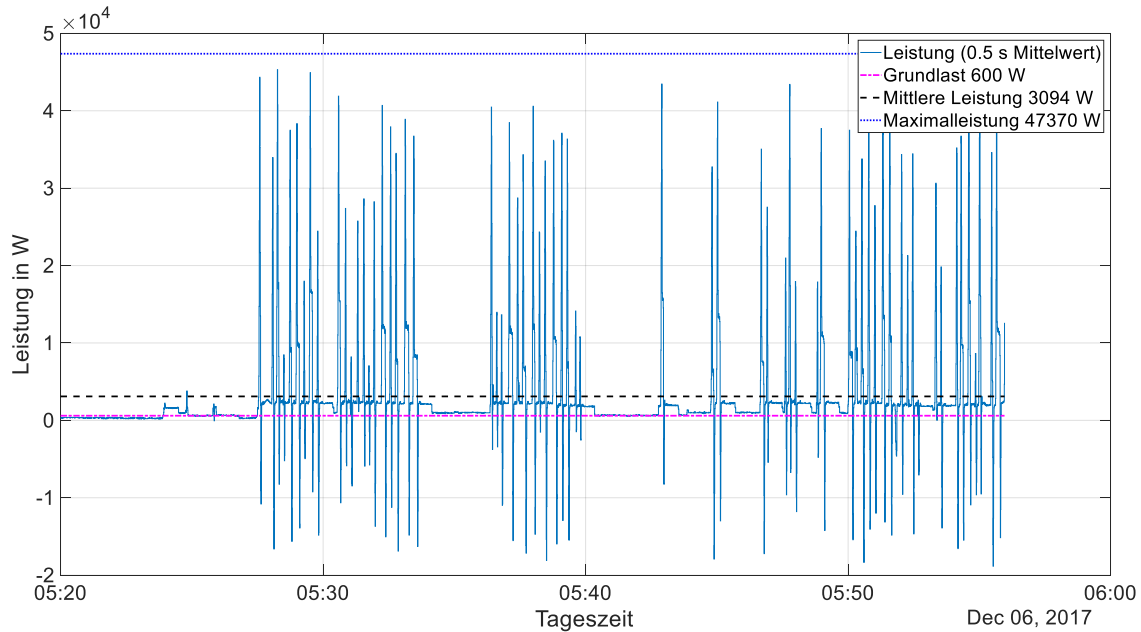


Abbildung 6-35: Leistungsaufnahme des RGB-3 während des Messintervalls 2

Abbildung 6-36 zeigt abschließend ein ca. 253 *min* dauerndes Messintervall. Das längere Messintervall dient der durchgängigen Aufzeichnung der Daten über diesen Zeitraum. Dabei erhöht sich das Aufzeichnungsintervall auf 5 *s*. In diesem Zeitraum wird das RBG mit seiner, während des Realbetriebs, üblichen Auslastung betrieben. In diesem Fall ist der 5 *s* Mittelwert der Leistung aufgetragen. Der maximal aufgezeichnete Leistungswert liegt deswegen deutlich über dem aufgezeichneten mittleren Leistungswert.

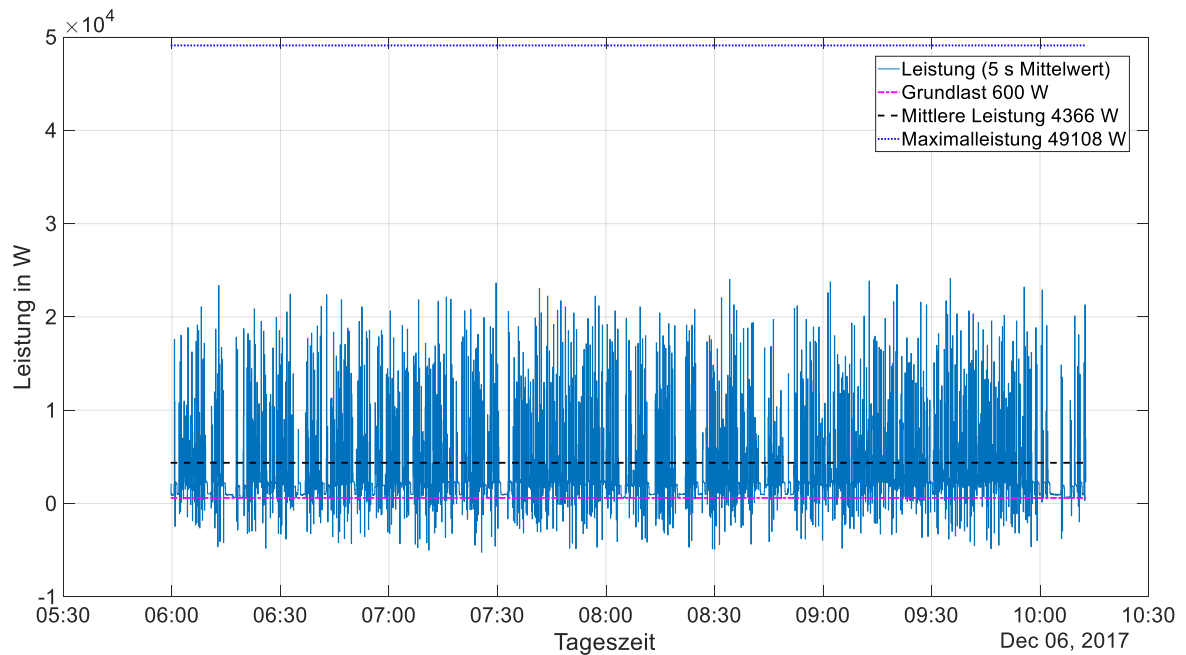


Abbildung 6-36: Leistungsaufnahme des RGB-3 während des Messintervalls 3

Der Anteil der Grundlast am Gesamtenergiebedarf liegt in diesem Fall nur noch bei $\sim 13,7\%$. Die maximal aufgenommene Leistung liegt in diesem Fall bei $\sim 49\text{ kW}$ und ist damit ca. 11 mal größer als die mittlere Leistung. Die Messergebnisse von Messintervall 2 und 3 sind in Tabelle 6-9 aufgeführt. Darin sind unter anderem der Energiebedarf und die in diesem Zeitraum zurückgespeiste Energie enthalten.

Tabelle 6-9: Zusammenfassung der Ergebnisse von Messintervall 2 und 3

Parameter	Messintervall 2	Messintervall 3
Messbeginn	05:20:00	05:59:39
Messende	5:55:58	10:12:39
Messdauer in hh:mm:ss	0:35:58	04:13:00
Messdauer in h	0,60	4,22
Messintervall in s	0,5	5,0
Energieverbrauch Netto in Wh	2106,8	19409,0
rückgespeiste Energie in Wh	245,7	920,1
Energieverbrauch Brutto in Wh	2352,5	20329,1
Anteil Energierückspeisung am Bruttoverbrauch in %	10,5	4,5
mittlere Leistung in W	3094,3	4366,4
max. verbrauchte Leistung in kW	47,37	49,11
max. rückgespeiste Leistung in kW	21,02	22,27

In diesem Fall wird als zurückgespeiste Energie nur solche bezeichnet die tatsächlich ans Netz zurückgegeben wird. Die durch die Energierückspeisung eingesparte Energie ist tatsächlich etwas größer, da ja auch die Grundlast im Zeitraum, in dem Energie zurückgespeist wird, aus der zurückgewonnenen Energie gedeckt wird. Auffällig ist, dass die Werte der zurückgespeisten Energie nur im Bereich zwischen ~ 5 bis 10 % liegen. Vermutlich ist die Energierückspeisung durch die hohen Bewegungsgeschwindigkeiten nur kurzzeitig mit hohen Spitzen beaufschlagt und kann in diesem Zeitraum weniger effizient arbeiten. Die zwei dargestellten Messintervalle stellen nur einen kleinen Ausschnitt des kompletten Betriebs des RBG dar.

Messung der kinematischen Parameter

Nachdem die ersten Fahrten zur Messung der kinematischen Parameter des RBG genutzt werden konnten, werden hier die Ergebnisse noch einmal dargestellt. Abbildung 6-37 und Abbildung 6-38 zeigen die Verläufe von Beschleunigung und Geschwindigkeit des RBG-3. Als Besonderheit an diesem RBG sind für Beschleunigungs- und Verzögerungsphase unterschiedliche Werte sowohl für die Beschleunigung als auch den Ruck hinterlegt. Dies kann am asymmetrischen Geschwindigkeitsprofil erkannt werden. Im Fahrtrieb lässt sich ein deutliches Schwingungsverhalten feststellen.

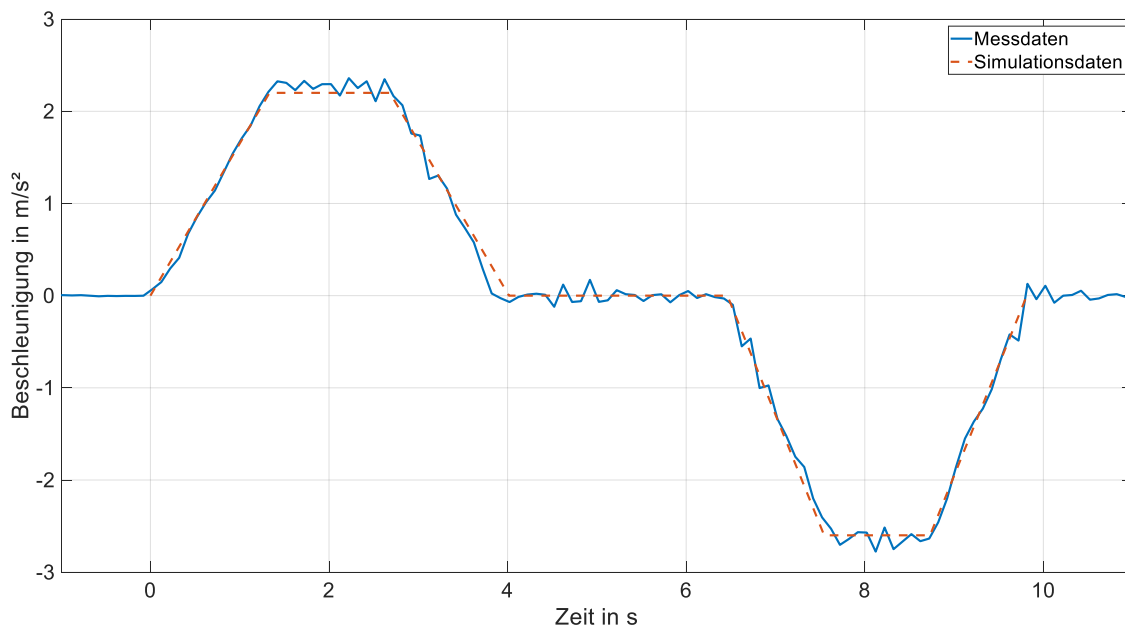


Abbildung 6-37: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Beschleunigung des Fahrtriebs von RBG-3

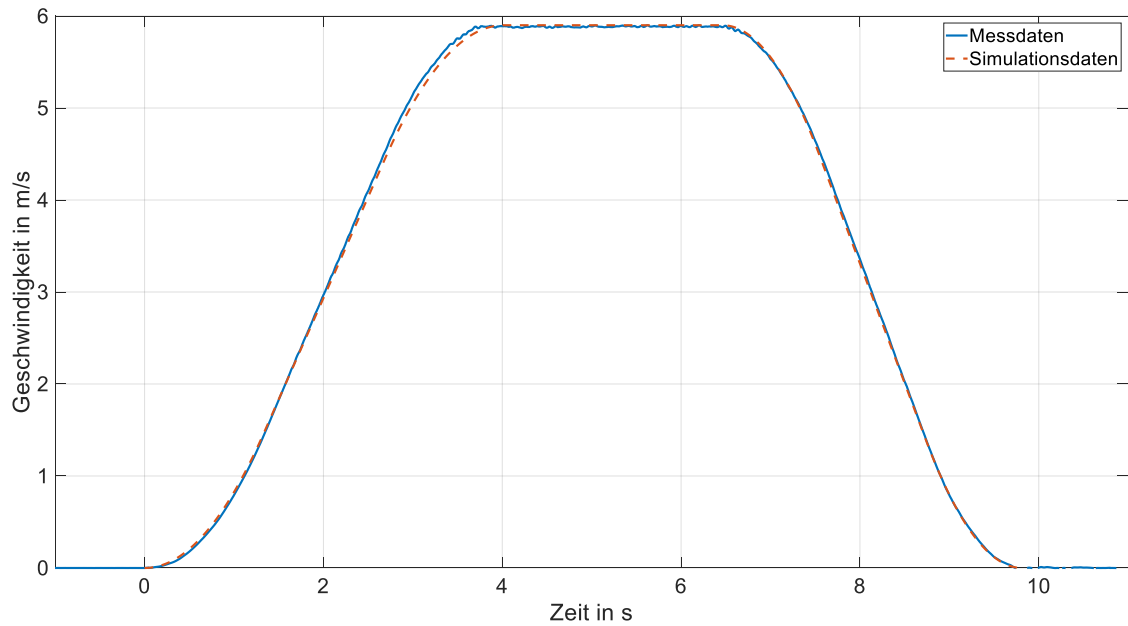


Abbildung 6-38: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Geschwindigkeit des Fahrtriebs von RBG-3

Abschließend sind in Abbildung 6-39 und Abbildung 6-40 die Messdaten des Hubwerks von RBG-3 dargestellt. Auch am Hubwerk sind minimal unterschiedliche Werte für Beschleunigung und Verzögerung bei einer Hubbewegung implementiert.

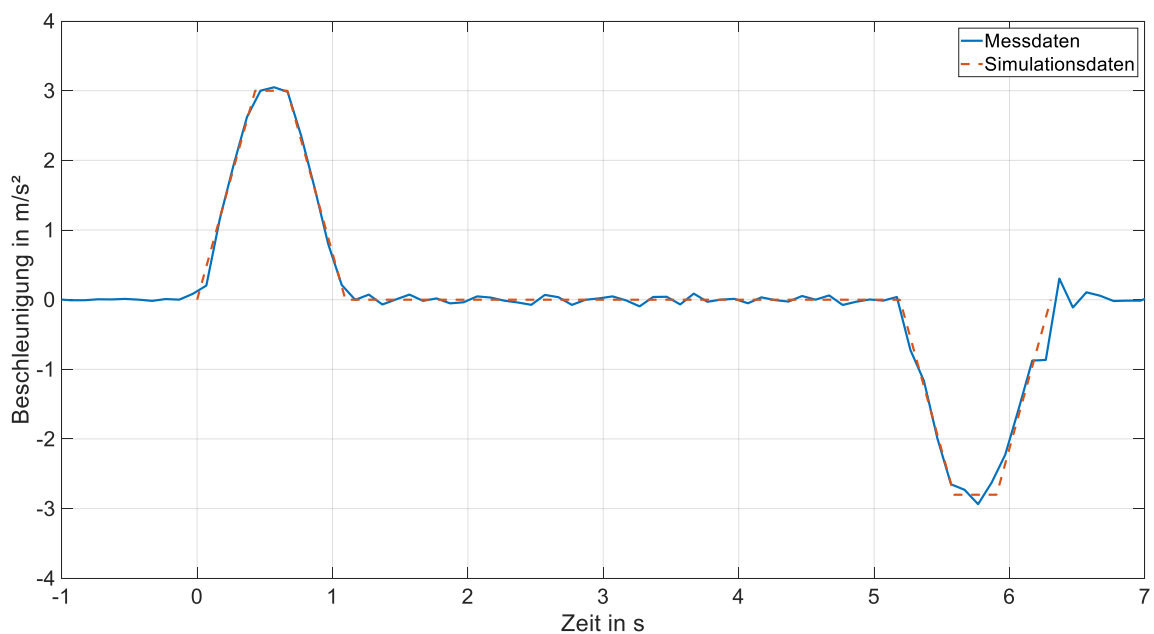


Abbildung 6-39: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Beschleunigung des Hubantriebs von RBG-3

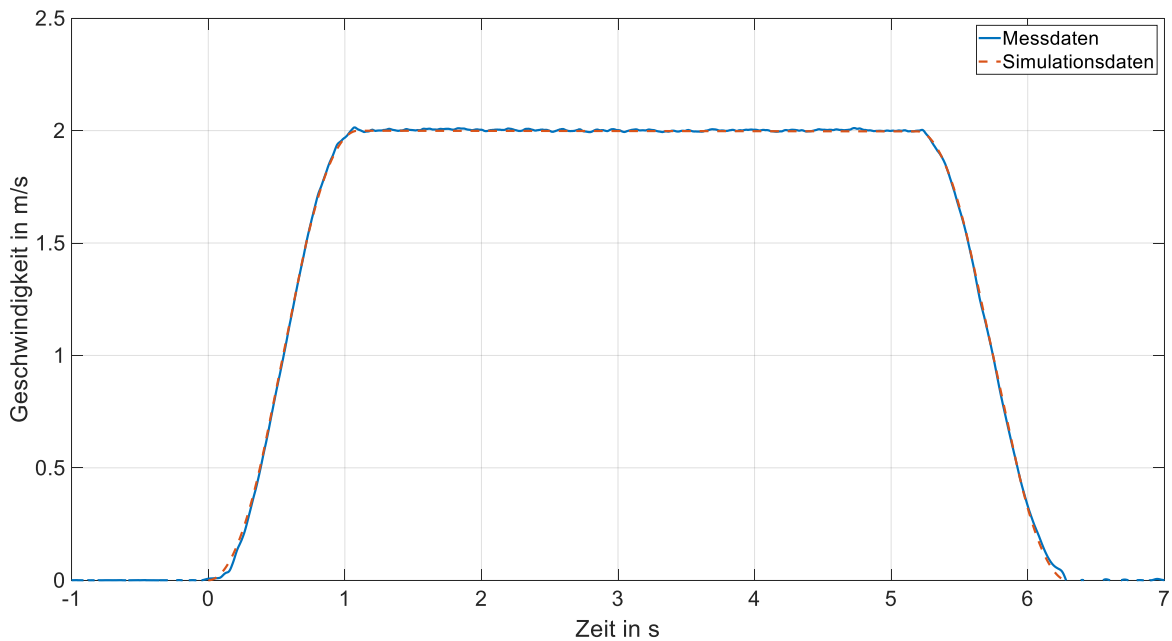


Abbildung 6-40: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Geschwindigkeit des Fahrtriebs von RBG-3

Die kinematischen Parameter der Antriebe sind in Tabelle 6-10 noch einmal zusammengefasst. Hier wird noch einmal in Beschleunigungs- und Ruckwerte für Beschleunigung und Verzögerung unterschieden.

Tabelle 6-10: Kinematische Parameter des RBG-3

	Fahrtrieb	Hubtrieb
Max. Geschwindigkeit in m/s	5,9	2,0
Max. Beschleunigung in m/s ²	2,2	3,0
Max. Ruck in m/s ³	1,7	7,0
Ruckverhältnis in 1/s	0,77	2,33
Max. Verzögerung in m/s ²	2,6	2,8
Max. Verzögerung Ruck in m/s ³	2,4	7,0
Ruckverhältnis Verzögerung in 1/s	0,92	2,5

6.7 Messungen an RBG-4

Bei RBG-4 konnte nur im Verlauf des normalen Betriebs der Leistungsverlauf des RBG gemessen werden. Es wurden keine Messungen der kinematischen Parameter durch-

geführt. Es wurden drei Messintervalle mit unterschiedlichen Messzeiten aufgezeichnet. Alle drei entstanden während des regulären Lagerbetriebs. Die aufgezeichneten Leistungskurven werden an dieser Stelle nicht noch einmal alle wiedergegeben. Exemplarisch wird in Abbildung 6-41 der Leistungsverlauf im ersten Messintervall gezeigt. Die Grundlast liegt bei diesem RBG bei $\sim 526 \text{ W}$. Die maximal aufgenommene Leistung lag im ersten Intervall bei $\sim 58 \text{ kW}$. Die mittlere aufgenommene Leistung ist mit $\sim 4100 \text{ W}$ ähnlich der mittleren Leistung von RBG-3. Auch daran ist ersichtlich, dass ein schnellaufendes AKL im Mittel einen ähnlichen Energiebedarf wie ein APL aufweist. Die Leistungsspitzen liegen aber über denen des RBG-3.

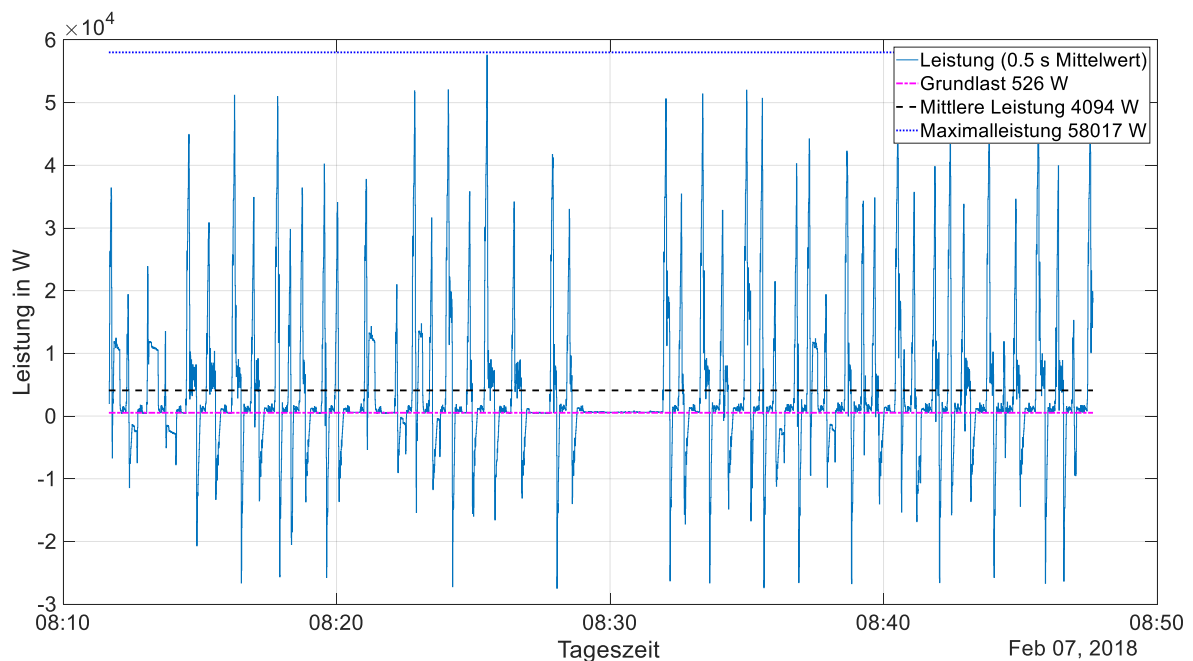


Abbildung 6-41: Leistungsaufnahme des RBG-4 während des Messintervalls 1

Die gemittelten Leistungskurven der drei Intervalle sind im Anhang F noch einmal abgebildet. In Tabelle 6-11 sind die ausgewerteten Ergebnisse der drei gemessenen Intervalle noch einmal gegenübergestellt. Die Anteile der zurückgespeisten Energie sind bei diesem RBG im Messzeitraum deutlich größer als bei RBG-3 und liegen zwischen ~ 21 und 24% . Vermutlich kann die Energierückspeisung durch die langsameren Bewegungsgeschwindigkeiten effizienter genutzt werden.

Tabelle 6-11: Zusammenfassung der Ergebnisse von RBG-4 im Messintervall 1, 2 und 3

Parameter	Messintervall 1	Messintervall 2	Messintervall 3
Messbeginn	08:11:40	08:52:04	09:31:55
Messende	08:47:39	09:28:03	11:55:51
Messdauer in hh:mm:ss	00:35:59	00:35:59	02:23:56
Messdauer in h	0,60	0,60	2,40
Messintervall in s	0,5	0,5	2,0
Energieverbrauch Netto in Wh	2460,03	1194,20	10710,40
rückgespeiste Energie in Wh	778,17	324,40	3188,60
Energieverbrauch Brutto in Wh	3238,20	1518,60	13899,00
Anteil Energierückspeisung am Bruttoverbrauch in %	24,0%	21,4%	22,9%
mittlere Leistung in W	4093,80	1986,50	4449,70
max. aufgenommene Leistung in kW	58,02	53,29	60,63
max. rückgespeiste Leistung in kW	31,40	30,20	30,20

Die drei Intervalle stellen natürlich nur einen kleinen Ausschnitt des kompletten Betriebs des RBG dar.

7 Entwicklung der Bewertungsmethodik

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Bewertungsmethodik für die EE beschrieben. Diese Methodik basiert auf den in [Rüc-2018a] und [Rüc-2018b] bereits veröffentlichten Grundlagen. In den einzelnen Unterkapiteln werden zunächst die Bewertungen der einzelnen Komponenten und zum Schluss die Gesamtbewertung des RBG vorgestellt. Die Bewertung der Komponenten wurde aus den im Rahmen der Messungen gewonnenen Erkenntnissen entwickelt.

In [Rüc-2017] wurde eine auf Basis von Expertengesprächen und einer Literaturanalyse erstellte Liste mit zentralen Anforderungen an die Bewertungsmethodik veröffentlicht. Diese Anforderungen sind:

- „die Abdeckung eines großen Spektrums von Regalbediengeräten,
- der quantifizierbare Vergleich durch die Gegenüberstellung von Nutzen und Energiebedarf,
- die Definition welche Geräte als RBG einzustufen sind,
- die Definition der elektrischen Verbraucher die dem RBG zuzuordnen sind,
- die Festlegung der Systemgrenze für die Kennzahlermittlung,
- Regelungen für den Umgang mit Sondergeräten,
- die Berücksichtigung unterschiedlicher Betriebszustände (Volllast, Teillast und Standby-Betrieb).“ siehe [Rüc-2017]

Diese Anforderungen konnten mit der entwickelten Bewertungsmethodik erfüllt werden.

7.1 Bewertung der Hauptantriebe

Im Rahmen der Untersuchungen des Energiebedarfs der Hauptantriebe wurde eine Bewertung mit Hilfe eines Wirkungsgrads für sinnvoll erachtet. Dieser Wirkungsgrad vergleicht einen idealisierten Vergleichsenergiebedarf mit einem realen Energiebedarf. Für die Bewertung der beiden Hauptantriebe eines RBG, Fahr- und Hubantrieb, wurden geeignete Vergleichsenergiebedarfe entwickelt. Da in dieser Arbeit hauptsächlich die physikalischen Einflussgrößen berücksichtigt werden, wurden im Vorfeld die wichtigsten physikalischen Einflussgrößen auf den Energiebedarf der Komponenten eines

RBG identifiziert. Für die Fahrbewegung wurden folgende Parameter als Haupteinflüsse auf den Energiebedarf identifiziert:

- Gesamtmasse des Gerätes
- Nutzlastmasse
- Geschwindigkeit des Fahrantriebs
- Fahrstrecke
- Wirkungsgrade der einzelnen elektrischen und mechanischen Komponenten
- Nutzung der Bremsenergie

Und für die Hubbewegung wurden folgende Einflussgrößen:

- Masse des Hubschlittens
- Nutzlastmasse
- Hubhöhe
- Wirkungsgrade der einzelnen elektrischen und mechanischen Komponenten
- Nutzung der Senkenergie

als Haupteinflüsse identifiziert. Auf Basis dieser Haupteinflüsse wurden die Vergleichsenergiebedarfe entwickelt. Als Grundkonzept soll gelten, dass die Grundlast aus dem realen Energiebedarf herausgerechnet wird, da diese in einer eigenen Teilbewertung berücksichtigt wird. Die Berechnung der idealen Wirkungsgrade η_{id} basiert auf Grundgleichung (7-1).

$$\eta_{id} = \frac{E_{id}}{E_{re} - E_{GL}} \quad (7-1)$$

In dieser wird der ideale Vergleichsenergiebedarf E_{id} mit dem realen Energiebedarf E_{re} abzüglich des Energiebedarfs der Grundlast E_{GL} ins Verhältnis gesetzt. Der reale Energiebedarf kann entweder mittels Messung ermittelt oder mit Hilfe eines kalibrierten Simulationsmodells bestimmt werden. Für die Bewertung der Antriebe werden definierte Testfahrten mit dem RBG gemacht. In der nachfolgenden Beschreibung wird von Fahrstrecke und Hubhöhe gesprochen. Diese Fahrten sind in Abbildung 7-1 dargestellt.

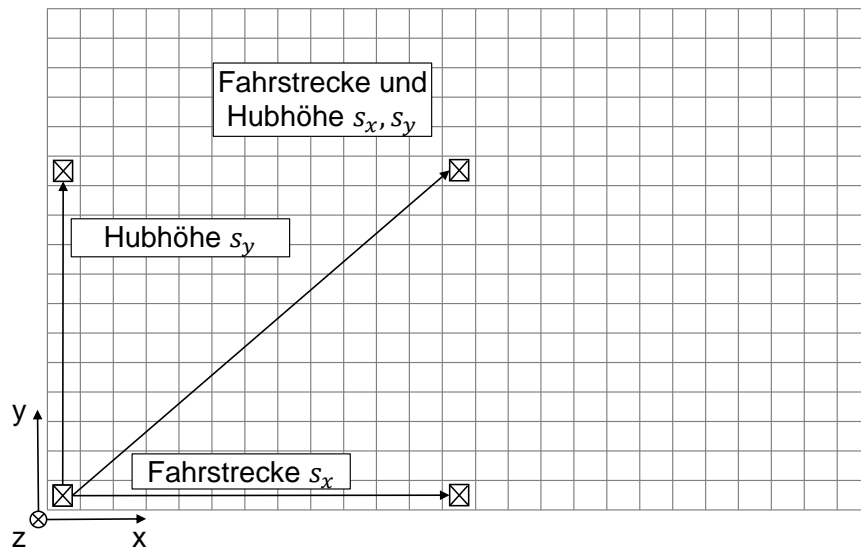


Abbildung 7-1: Fahrstrecken zur Bewertung eines RBG [Rüc-2018b]

7.1.1 Bewertung von Fahr- und Hubbewegung

Ausgehend von dieser Gleichung lassen sich für die Fahrbewegung der Wirkungsgrad $\eta_{id,x}$ und für die Hubbewegung der Wirkungsgrad $\eta_{id,+y}$ ableiten.

$$\eta_{id,x} = \frac{E_{id,x}}{E_{re,x} - E_{GL,x}} \quad (7-2)$$

$$\eta_{id,+y} = \frac{E_{id,+y}}{E_{re,+y} - E_{GL,+y}} \quad (7-3)$$

Der Energiebedarf der Grundlast berechnet sich über die Grundlastleistung P_{GL} und die Fahrzeit für eine Bewegung t_F nach Gleichung (7-4).

$$E_{GL,i} = P_{GL} \cdot t_{F,i} \quad (7-4)$$

Die Grundlast eines RBG wird in Kapitel 6.1 näher beschrieben. Die beiden Vergleichsenergiebedarfe für die Fahr- und Hubbewegung basieren auf einer Betrachtung der physikalisch idealen Energiebedarfe. Im physikalischen Sinne wird bei einer Fahrbewegung kein Potential verändert. Um die Fahrbewegung trotzdem beherrschen zu können, wird die kinetische Energie herangezogen. Für die Fahrbewegung ist im Idealfall nur die kinetische Energie aufzubringen, die benötigt wird, um die Masse des

RBG m_{RBG} und die seiner Nutzlast m_{NL} auf die maximale Fahrgeschwindigkeit v_x zu bringen.

$$E_{id,x} = \frac{(m_{RBG} + m_{NL}) \cdot v_x^2}{2} \quad (7-5)$$

Nachteil dieses Vergleichsenergiebedarfs ist, dass er für unterschiedlich lange Fahrstrecken den gleichen Wert liefert. Der reale Energiebedarf skaliert natürlich mit der Fahrstrecke und deswegen ergeben sich unterschiedliche Werte für den idealen Wirkungsgrad. Damit muss für einen Vergleich unterschiedlicher Geräte die gleiche Fahrstrecke gewählt werden. Entscheidend ist auch, dass die Fahrstrecke groß genug ist, um eine Beschleunigung auf die maximale Fahrgeschwindigkeit zu erlauben. Analog zu Abbildung 6-5 muss eine Normalfahrt durchgeführt werden. Als hinreichend große Fahrstrecke kann meist die halbe Lagerlänge verwendet werden, da diese eine gute Vergleichbarkeit ermöglicht und in den meisten Fällen eine Normalfahrt garantiert.

$$s_y = \frac{1}{2} \cdot L_{HRL} \quad (7-6)$$

Für die Hubbewegung lässt sich der Vergleichsenergiebedarf, unter Einbeziehung der Erdbeschleunigung g , über die potentielle Energie, die zum Anheben des Hubschlittens m_{HS} und der Nutzlast m_{NL} auf die Hubhöhe s_y benötigt wird, berechnen. Bei Verwendung eines Hubwerks mit Gegengewicht muss dessen Masse m_{GGW} im idealen Hubwirkungsgrad berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich die Definition für den Vergleichsenergiebedarf der Hubbewegung $E_{id,+y}$.

$$E_{id,+y} = (m_{HS} + m_{NL} - m_{GGW}) \cdot g \cdot s_{+y} \quad (7-7)$$

Da der Vergleichsenergiebedarf hier mit der Hubhöhe skaliert, ist deren Wahl weniger entscheidend, aber mittels des Regalwandfaktors RWF nach [FEM-9851] kann eine geeignete Hubstrecke abgeschätzt werden.

$$RWF = \frac{v_x}{v_y} \cdot \frac{H}{L} \quad (7-8)$$

Die Hubstrecke ergibt sich dann zu:

$$s_{+y} = \frac{s_x}{RWF} \quad (7-9)$$

Für einen Regalwandfaktor von 0,75 würde sich beispielhaft eine Hubstrecke von zweidrittel der Regalhöhe ergeben. Unter Nutzung der oben beschriebenen Zusammenhänge lassen sich der Fahr- und Hubwirkungsgrad wie folgt beschreiben:

$$\eta_{id,x} = \frac{(m_{RBG} + m_{NL}) \cdot v_x^2}{2 \cdot (E_{re,x} - P_{GL} \cdot t_{F,x})} \quad (7-10)$$

$$\eta_{id,+y} = \frac{(m_{HS} + m_{NL} - m_{GGW}) \cdot g \cdot s_{+y}}{E_{re,+y} - P_{GL} \cdot t_{F,+y}} \quad (7-11)$$

Wertet man das Wirkungsgradkennfeld des Fahrtriebs von RBG-1 aus, so gelangt man zur Darstellung in Abbildung 7-2. Analog zum Energiebedarf zeigt sich auch hier eine schwache Abhängigkeit des Wirkungsgrads von der Nutzlast. Dieser ist hauptsächlich von der maximalen Fahrgeschwindigkeit abhängig.

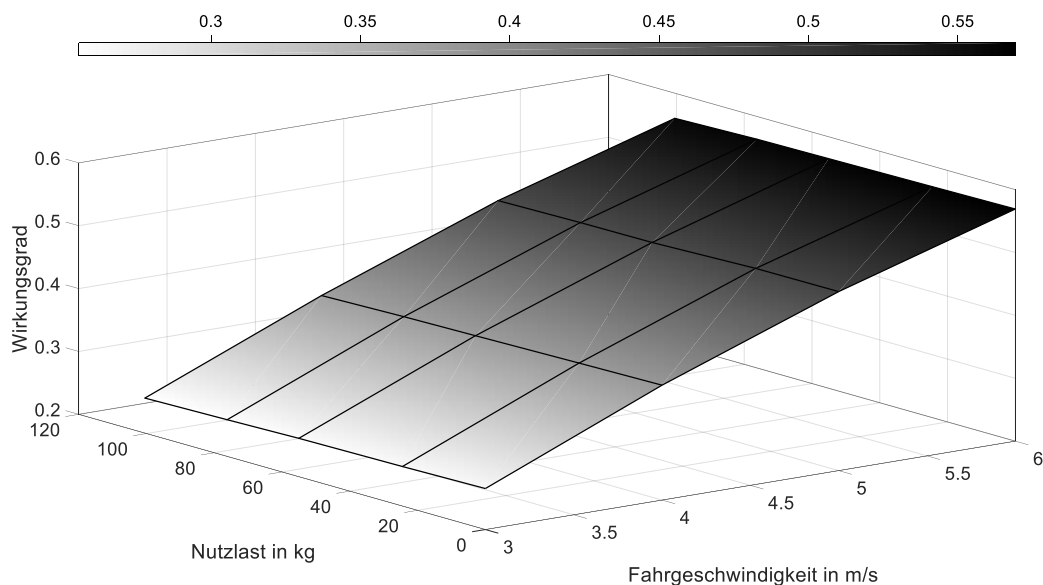


Abbildung 7-2: Wirkungsgradkennfeld des Fahrtriebs von RBG-1 [Rüc-2018a]

Analog zu dieser Darstellung ist in Abbildung 7-3 das Wirkungsgradkennfeld des Hubtriebs von RBG-1 dargestellt. Der ideale Hubwirkungsgrad schwankt über das

komplette Kennfeld nur gering und ist somit nur schwach von Nutzlast und Hubgeschwindigkeit abhängig.

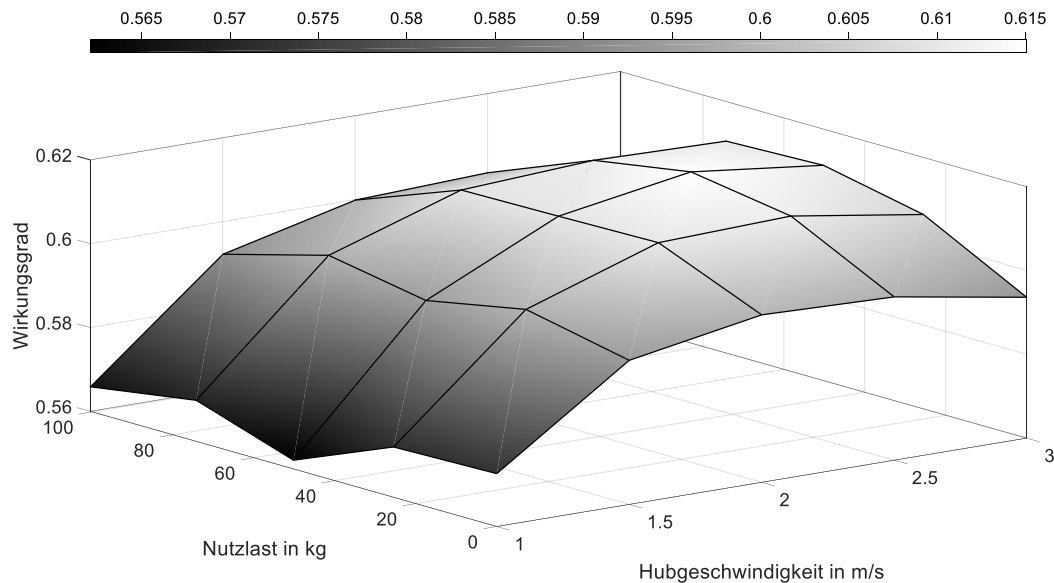


Abbildung 7-3: Wirkungsgradkennfeld des Hubantriebs von RBG-1 [Rüc-2018a]

7.1.2 Bewertung der Senkbewegung

Um jetzt eine eventuelle Nutzung der freiwerdenden Energie beim Absenken einer Last zu beurteilen, wurde der Rückspeisewirkungsgrad $\eta_{id,-y}$ entwickelt. Dazu wurde die Definition des Hubwirkungsgrades entsprechend modifiziert. Die rückgewonnene Energie $E_{re,-y}$ weist in Messungen oftmals ein negatives Vorzeichen auf und wird deswegen im Betrag genommen. Der Energiebedarf der Grundlast wird in diesem Fall auch aus der zurückgewonnenen Energie gedeckt und ist deswegen dem realen Energiebedarf hinzuzurechnen. Für die Hubbewegung wird der Energiebedarf der Fahrbewegung vom realen Energiebedarf subtrahiert und damit aus der Betrachtung herausgenommen. Um diesem Umstand bei der Senkbewegung Rechnung zu tragen, muss der Energiebedarf der Grundlast dem realen Energiebedarf hinzugerechnet werden. Bei der Ermittlung des realen Bedarfs durch ein Simulationsmodell muss dieser Umstand entsprechend berücksichtigt werden. Damit ergibt sich folgende Definition für den Rückspeisewirkungsgrad:

$$\eta_{id,-y} = \frac{|E_{re,-y}| + P_{GL} \cdot t_{F,-y}}{E_{id,-y}} \quad (7-12)$$

Wenn keine Energierückspeisung verbaut ist, dann liegt der Rückspeisewirkungsgrad nahe Null. Deswegen ist eine Bewertung in diesem Fall nicht erforderlich. Eine geringe Nutzung der Bremsenergie ist auch bei Geräten, die nicht über die Möglichkeit zur Energierückspeisung verfügen, möglich. Die Bremsenergie wird zum Teil im Zwischenkreis genutzt, um Verbraucher der Leistungselektronik im mitfahrenden Schaltschrank zu versorgen. Auf die Berechnung des Wirkungsgrades kann verzichtet werden, da er nicht sinnvoll genutzt werden kann. Die Bewertung eines Energiespeichers ist grundsätzlich mit dieser Methodik möglich, jedoch muss vor der Testfahrt ein definierter Ladungszustand vorherrschen. Die Bewertung eines Energiespeichers erfolgt aber im Zuge der Bewertung der logistischen Leistung und kann deswegen an dieser Stelle vernachlässigt werden.

7.1.3 Bewertung der Antriebskopplung

Um die Kopplung der beiden Hauptantriebe bewerten zu können, wurde der Kombinationsfaktor $\eta_{id,xy}$ eingeführt. Dieser setzt sich analog aus den beiden Wirkungsgraden für Fahr- und Hubbewegung zusammen. Die Besonderheit ist jetzt, dass hier eine Kombination aus Fahr- und Hubbewegung bewertet wird und entsprechend eine mögliche Nutzung der Bremsenergie im Zwischenkreis überprüft wird. Hier werden analog die gleichen Teststrecken wie für die Bewertung von Fahr- und Hubantrieb verwendet.

$$\eta_{id,xy} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (m_{RBG} + m_{NL}) \cdot v_x^2 + (m_{HS} + m_{NL} - m_{GGW}) \cdot g \cdot s_y}{E_{re,xy} - P_{GL} \cdot t_{F,xy}} \quad (7-13)$$

7.1.4 Beispielhafte Auswertung der Wirkungsgrade

Die oben beschriebenen Wirkungsgrade wurden für die Messergebnisse von RBG-2 und RBG-3 in einer Kartendarstellung ausgewertet. Anhand der Ergebnisse können zusätzliche Aspekte der Wirkungsgrade gezeigt werden. Zuerst ist die Auswertung der Wirkungsgrade aus den Messungen von RBG-2 in der Abbildung 7-4 dargestellt. Hieran lässt sich auch erkennen, dass der Wirkungsgrad der Fahrbewegung von der zurückgelegten Fahrstrecke abhängt. Bei einer Fahrstrecke von 17,6 m beträgt der Wirkungsgrad 83 %, wohingegen er bei einer Fahrstrecke von 30,0 m auf 55 % absinkt. Hier zeigt sich der größte Nachteil des Fahrwirkungsgrads, die Abhängigkeit von der zurückgelegten Fahrstrecke.

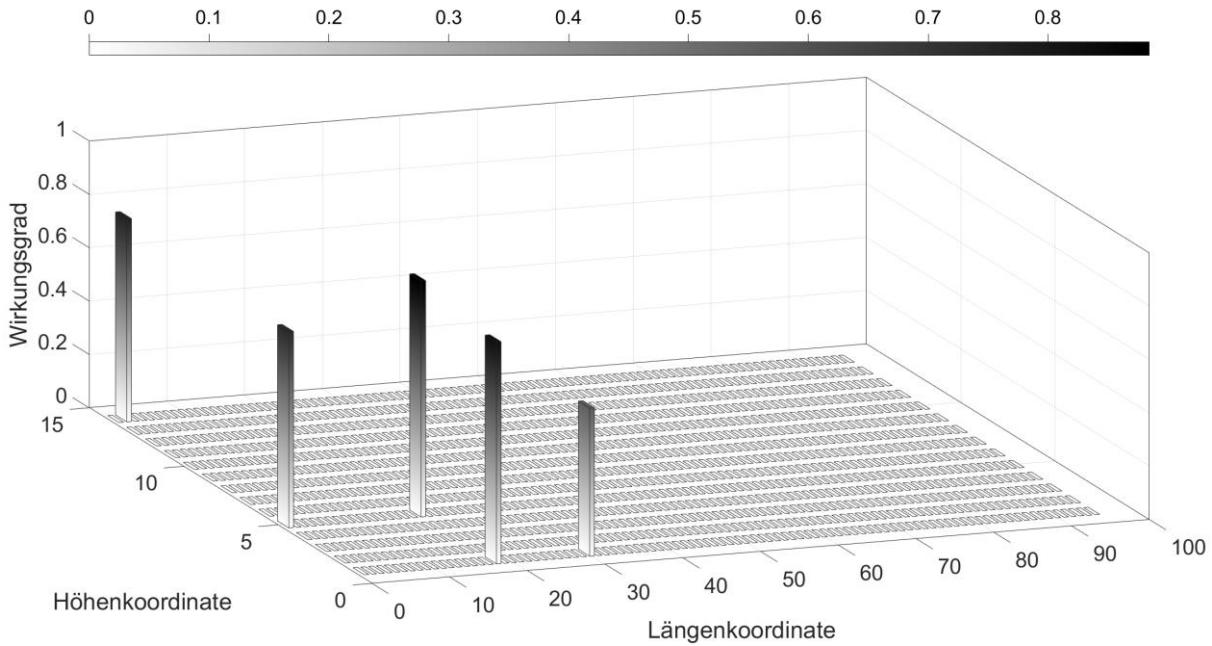


Abbildung 7-4: Wirkungsgrade des RBG-2 in Kartendarstellung (vgl. [Rüc-2018a])

Der Wirkungsgrad der Hubbewegung ist bei unterschiedlicher Hubhöhe relativ konstant. Die in Abbildung 7-4 dargestellten Werte können in Tabelle 7-1 nachgelesen werden.

Tabelle 7-1: Ergebnisse der Wirkungsgradermittlung von RBG-2

Bewegung	Fahrstrecke in m	Hubhöhe in m	Wirkungsgrad
F1	17,6	0,0	0,83
F2	30,0	0,0	0,55
H1	0,0	4,8	0,74
H2	0,0	15,8	0,76
KB	17,6	4,8	0,89

Abschließend sind noch die ausgewerteten Wirkungsgrade der Messungen von RBG-3 in Abbildung 7-5 dargestellt. Diese sollen noch einmal die Anwendbarkeit und Gültigkeit der Berechnungsmethode für ein weiteres RBG zeigen und damit das Berechnungskonzept validieren.

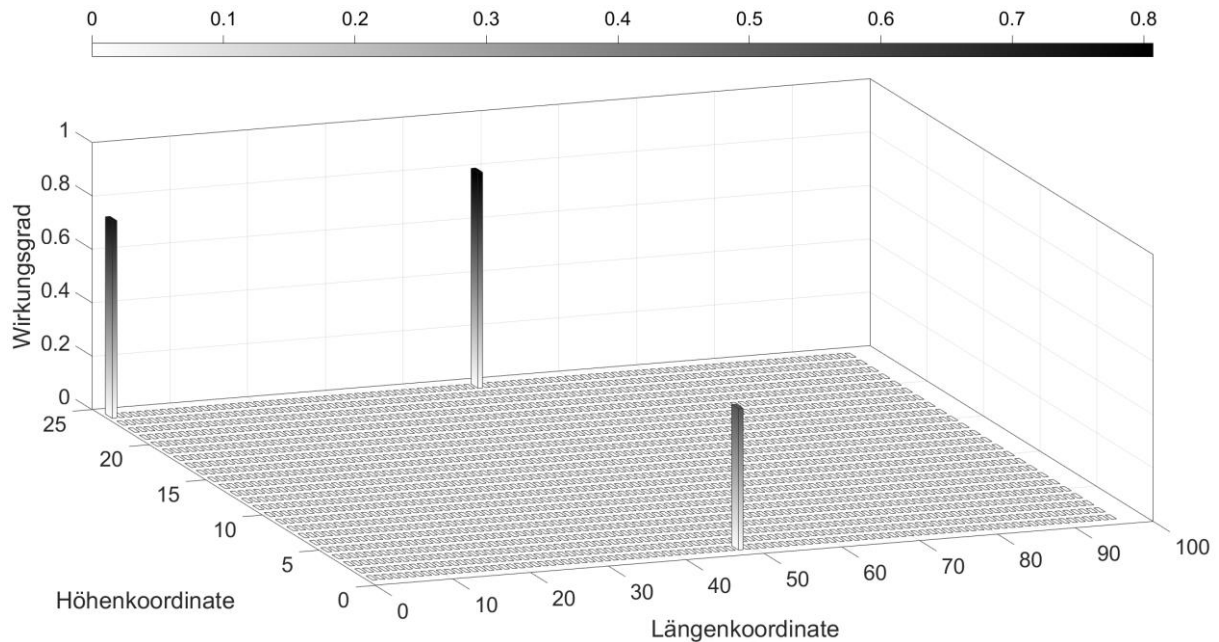


Abbildung 7-5: Wirkungsgrade des RBG-3 in Kartendarstellung

Die in Abbildung 7-5 dargestellten Werte können in Tabelle 7-2 nachgelesen werden.

Tabelle 7-2: Ergebnisse der Wirkungsgradermittlung von RBG-3

Bewegung	Fahrstrecke in m	Hubhöhe in m	Wirkungsgrad
Fahrbewegung	36,2	0,0	0,53
Hubbewegung	0,0	10,4	0,74
Kombinierte Bewegung	36,2	10,4	0,81

7.2 Bewertung des Leichtbaus

In den Bewertungen der Hauptantriebe skaliert der Vergleichsenergiebedarf mit der Gerätemasse. Daraus folgt aber auch, dass eine Veränderung der Masse des RBG keine Änderung an den idealen Wirkungsgraden erzeugt. Wenn man die Masse des gesamten RBG verändert, sollte sich auch der Wirkungsgrad ändern. Aus dieser Tatsache heraus wurden die Transportwirkungsgrade entwickelt. In diesen Wirkungsgraden wird die Masse des RBG oder des Hubschlittens aus dem Vergleichsenergiebedarf gestrichen. Dann skaliert der Vergleichsenergiebedarf nicht mehr mit der Gerätemasse und die Gerätemasse wird damit Teil der Bewertung. Damit ergibt sich für den Transportwirkungsgrad der Fahrbewegung $\eta_{T,x}$ der nachfolgende Zusammenhang.

$$\eta_{T,x} = \frac{m_{NL} \cdot v_{x,max}^2}{2 \cdot (E_{re,x} - P_{GL} \cdot t_{F,x})} \tag{7-14}$$

Als Beispiel ist in Abbildung 7-6 das Transportwirkungsgradkennfeld des Fahrtriebs von RBG-1 dargestellt. Im Vergleich zu den idealen Wirkungsgraden ist der Transportwirkungsgrad deutlich kleiner. Die kleinen Transportwirkungsgrade resultieren aus dem hohen Verhältnis von Gesamtmasse zu Nutzlast. Insbesondere wird bei einer Fahrbewegung das komplette RBG durch das HRL bewegt, um die im Verhältnis sehr leichte Nutzlast zu transportieren. Ohne Nutzlast ist der Transportwirkungsgrad definitionsgemäß gleich Null.

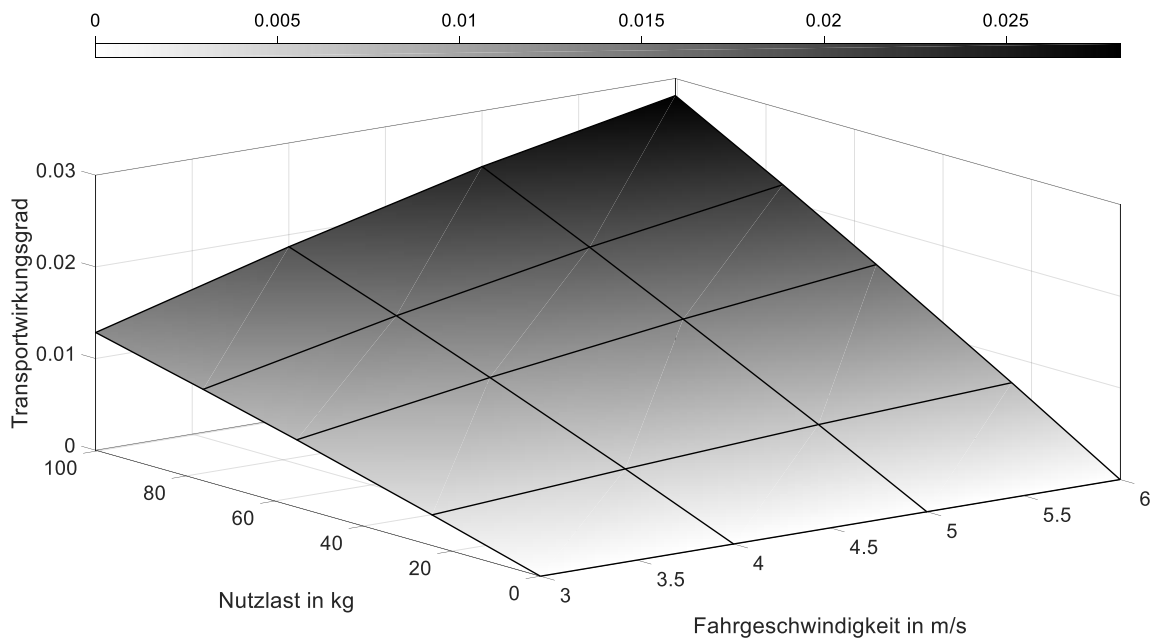


Abbildung 7-6: Transportwirkungsgrad des Fahrtriebs von RBG-1 [Rüc-2018a]

Analog lässt sich für die Hubbewegung folgender Transportwirkungsgrad definieren:

$$\eta_{T,+y} = \frac{m_{NL} \cdot g \cdot s_{+y}}{E_{re,+y} - P_{GL} \cdot t_{F,+y}} \tag{7-15}$$

Eine Auswertung des Transportwirkungsgradkennfeldes des Hubantriebs ist in Abbildung 7-7 gezeigt. Hier ergeben sich deutlich höhere Werte als beim Fahrtrieb. Der Hubschlitten ist mit seiner Masse von 300 kg im Verhältnis zur Nutzlast auch deutlich leichter.

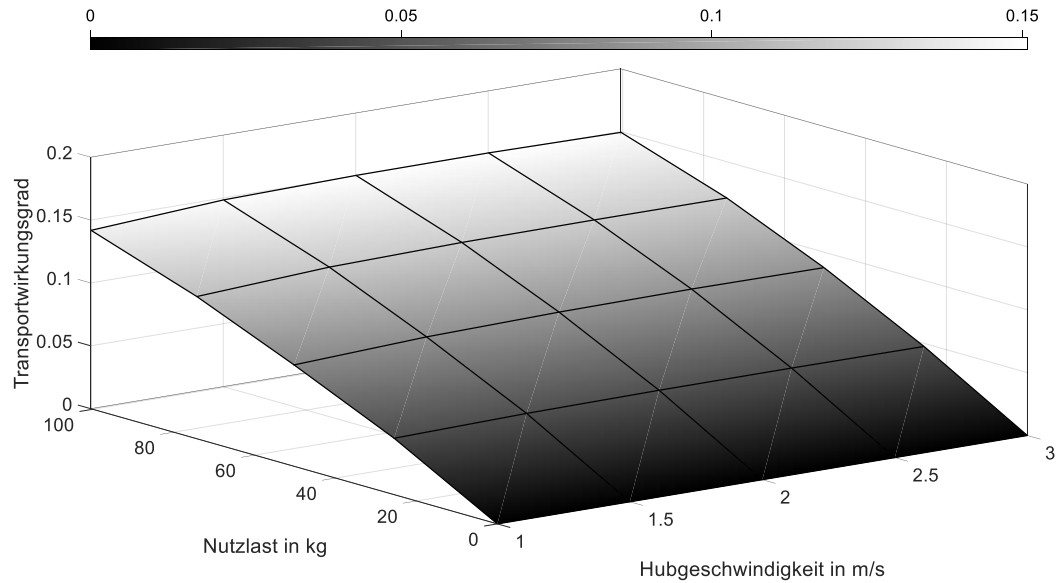


Abbildung 7-7: Transportwirkungsgradkennfeld des Hubantriebs von RBG-1 [Rüc-2018a]

Eine Definition für einen kombinierten Transportwirkungsgrad $\eta_{T,xy}$ ist natürlich möglich, aus seiner Auswertung ergeben sich allerdings keine zusätzlichen Informationen. Der kombinierte Transportwirkungsgrad wurde aber für RBG-2 ausgewertet und deswegen ist nachfolgend die entsprechende Gleichung dargestellt:

$$\eta_{T,xy} = \frac{\frac{1}{2} \cdot m_{NL} \cdot v_x^2 + m_{NL} \cdot g \cdot s_y}{E_{re,xy} - P_{GL} \cdot t_{F,xy}} \quad (7-16)$$

Abbildung 7-8 zeigt die ausgewerteten Transportwirkungsgrade von RBG-2. Auch hier liegen beim Fahrtrieb kleine Werte im einstelligen Prozentbereich vor. Nachdem der Transportwirkungsgrad aber hier nicht mit der vollen zulässigen Nutzlast von 1000 kg gemessen wurde, fallen die Werte niedriger aus.

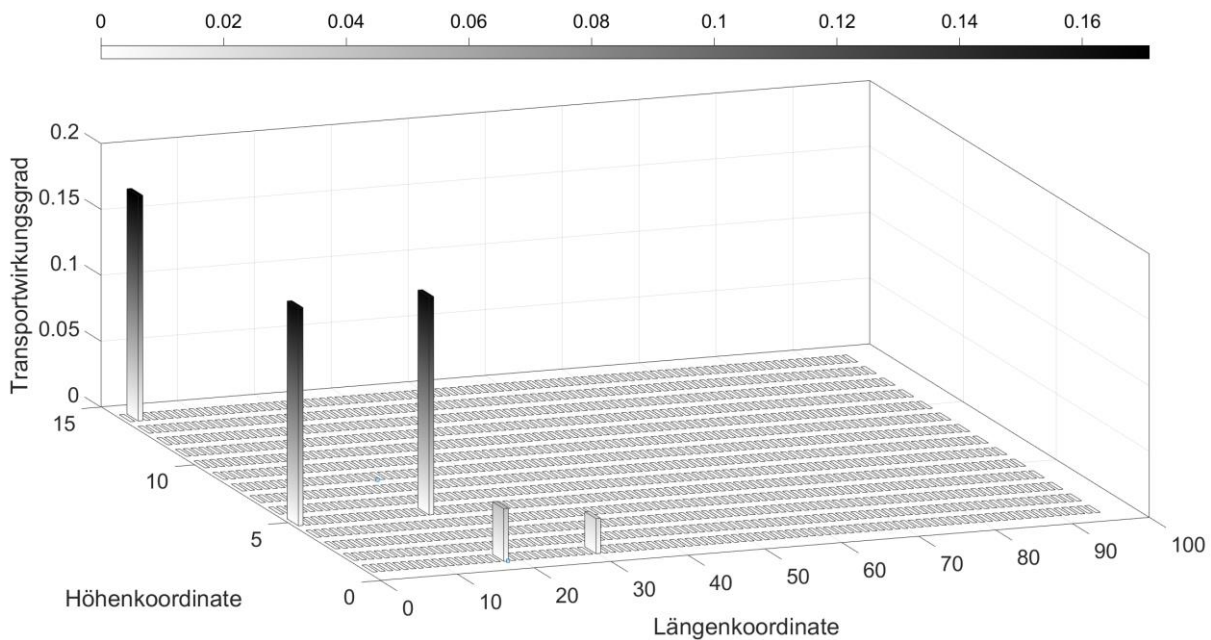


Abbildung 7-8: Transportwirkungsgrad des RBG-2 in Kartendarstellung (vgl. [Rüc-2018a])

Die in Abbildung 7-8 dargestellten Werte können in Tabelle 7-3 nachgelesen werden.

Tabelle 7-3: Ergebnisse der Transportwirkungsgradermittlung von RBG-2

Bewegung	Fahrstrecke in m	Hubhöhe in m	Transportwirkungsgrad
F1	17,6	0,0	3,99 %
F2	30,0	0,0	2,67 %
H1	0,0	4,8	16,5 %
H2	0,0	15,8	17,1 %
KB	17,6	4,8	16,5 %

Die Transportwirkungsgrade erlauben einen Vergleich unterschiedlich schwerer Konstruktionslösungen, bzw. erlauben eine Bewertung der Effizienz der Konstruktion.

7.3 Bewertung des Lastwechsels

Zur Bewertung des Lastwechsels wurde eine Untersuchung des Energiebedarfs bei der Ein- oder Auslagerung einer Ladung durchgeführt. Zunächst wurde eine Wirkungsgradbewertung analog zum Fahrtrieb des RBG angedacht. Diese erwies sich aber als nicht zielführend, weil keine sinnvollen Vergleichsfaktoren ermittelt werden konnten. Deswegen wurde auf die Bewertung mittels eines Referenzwertes zurückgegriffen.

Der Referenzwert $\bar{E}_{z,Ref}$ steht für einen mittleren Vergleichsenergiebedarf für einen Ein- oder Auslagervorgang. Dieser Referenzwert muss, damit die Kennzahlen zwischen 0 und 1 liegen, für eine Bewertung größer als der größte mittlere Energiebedarf des Lastwechsel der zu bewertenden LAM sein. Ein Ein- oder Auslagervorgang wird nachfolgend auch als Lastwechsel bezeichnet. Zur Bewertung, wird unter Verwendung des mittleren Energiebedarfs eines Lastwechsels \bar{E}_z , der Lastwechselfaktor n_{LW} definiert.

$$n_{LW} = 1 - \frac{\bar{E}_z}{\bar{E}_{z,Ref}} \quad (7-17)$$

Ein LAM operiert üblicherweise bei unterschiedlichen Nutzlasten und unterschiedlichen Einlagertiefen. Die zurückgelegten Strecken sind aber wesentlich kleiner als bei Fahr- und Hubantrieb. Deswegen muss ein geeigneter Mittelwert für den durchschnittlichen Energiebedarf eines Lastwechsels definiert werden. Dazu werden die Energiebedarfe für unterschiedliche Einlagertiefen und Nutzlasten entsprechend der relativen zeitlichen Häufigkeit ihres Auftretens h_i gemittelt.

$$\bar{E}_z = \sum_{i=1}^n \bar{E}_{z,i} \cdot h_i \quad (7-18)$$

In erster Näherung, bzw. wenn keine detaillierteren Informationen vorliegen, kann eine Gleichverteilung der Zustände angenommen werden. Damit ergibt sich für eine Anzahl an Lastwechselzuständen N_z folgender Zusammenhang für die Berechnung des mittleren Energiebedarfs als arithmetisches Mittel.

$$\bar{E}_z = \frac{1}{N_z} \cdot \sum_{i=1}^{N_z} \bar{E}_{z,i} \quad (7-19)$$

Für RBG-1 wurde ein mittlerer Energiebedarf von $\bar{E}_{z,RGB-1} = 1,135 \text{ Wh}$ und bei RBG-2 ein mittlerer Energiebedarf von $\bar{E}_{z,RGB-2} = 1,162 \text{ Wh}$ ermittelt. Bei einem Referenzwert von $\bar{E}_{z,Ref} = 2 \text{ Wh}$ würden sich somit folgende Lastwechselfaktoren ergeben:

- $n_{LW,RGB-1} = 0,433$
- $n_{LW,RGB-2} = 0,420$

Der Wert für RBG-2 ist nicht mit genügend Messdaten unterlegt, weil nur eine Nutzlast, die in etwa der halben Maximallast entspricht, untersucht werden konnte. [Rüc-2018b]

7.4 Bewertung der Grundlast

In den Messungen und Untersuchungen der vier RBG konnte kein Zusammenhang zwischen der Grundlast P_{GL} und anderen Auslegungsaspekten, wie der Nennleistung der Motoren oder der Zuladung festgestellt werden. Deswegen wird als Vergleichsgröße analog zur Bewertung des LAM ein fixer Referenzwert für die Leistung P_{Ref} verwendet. Für einen Vergleich verschiedener RBG kann der Referenzwert erst einmal beliebig gewählt werden, solange er größer als die maximal zu bewertende Grundlast ist. Für die im Projekt untersuchten Geräte wurde ein Referenzwert von $P_{Ref} = 1500 \text{ W}$ gewählt. Für eine Bewertung in der Praxis kann der Referenzwert gleich der höchsten zu bewertenden Grundlast gesetzt werden. Der gesamte Grundlastfaktor $n_{GF,ges}$ berechnet sich damit nach folgender Gleichung:

$$n_{GF,ges} = 1 - \frac{P_{GL}}{P_{Ref}} \quad (7-20)$$

Mit dieser Definition ergeben sich Grundlastfaktoren, die kleiner als 1,0 sind. Teilweise ist die Grundlast bei RBG nicht konstant. Besonders bei Geräten, deren Fahrzeit im Verhältnis zu ihrer Betriebszeit klein ist, kann die Grundlast im Stillstand deutlich kleiner sein, weil zum Beispiel Lüftermotoren nicht in Betrieb sind. Vereinzelt kommen Abschaltvorrichtungen zum Einsatz, die bei längeren Stillstandphasen Teile des RBG abschalten und das Gerät damit in einen Ruhemodus versetzen. Aus diesem Grund wird die Grundlastleistung P_{GL} nach Gleichung (7-21) als Summe der einzelnen Leistungen $P_{GL,i}$ verknüpft und mit ihren Betriebszeiten t_i im Verhältnis zur gesamten Betriebszeit t_{ges} zusammengesetzt. [Rüc-2018b]

$$P_{GL} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{GL,i} \cdot t_i}{t_{ges}} \quad (7-21)$$

In Tabelle 7-4 sind die gemessenen Grundlasten und die ausgewerteten Grundlastfaktoren für die vier gemessenen RBG verzeichnet.

Tabelle 7-4: Grundlast und Grundlastfaktoren für RBG-1, 2, 3 und 4

Wirkungsgrad	RBG-1	RBG-2	RBG-3	RBG-4
Referenzwert in W	1500	1500	1500	1500
Grundlast in W	475	500	600	526
Grundlastfaktor	0,683	0,667	0,60	0,649

7.5 Auswertung der Einzelkennzahlen

Aus den Messungen von RBG-1, 2 und 3 wurden exemplarisch einige Einzelkennzahlen ausgewertet. Für alle drei RBG konnten Fahr-, Hubwirkungsgrad und Grundlastfaktor ausgewertet werden. Zusätzlich wurde für RBG-1 der Kombinationsfaktor und für RBG-2 und RBG-3 der Rückspeisewirkungsgrad ausgewertet. Die gesammelten Einzelkennzahlen sind in Abbildung 7-9 dargestellt. Für Geräte mit Energierückspeisung muss der Kombinationsfaktor nicht ausgewertet werden, da die Antriebskopplung eine geringere Rolle spielt, wenn Bremsenergie rückgespeist werden kann. Nachdem die Bewegungen gemessen wurden, wurden auch für RBG-2 und RBG-3 die Kombinationsfaktoren ausgewertet. Diese liegen auf Grund der Energierückspeisung deutlich über dem Kombinationsfaktor von RBG-1. Für Geräte ohne Energierückspeisung wird der Rückspeisewirkungsgrad nicht ausgewertet. Bei RBG-4 wurden keine einzelnen Fahrbewegungen gemessen und deswegen konnten außer dem Grundlastfaktor auch keine Einzelkennzahlen ausgewertet werden.

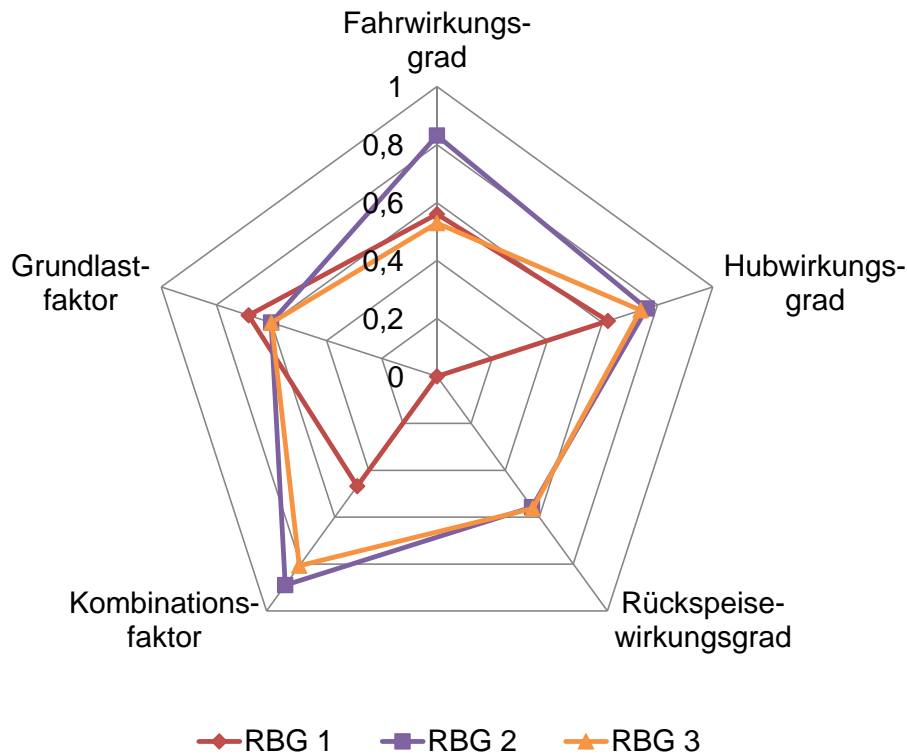


Abbildung 7-9: Darstellung der ausgewerteten Einzelkennzahlen von RBG-1, RBG-2 und RBG-3 [Rüc-2018b]

Die in Abbildung 7-9 dargestellten Kennzahlen sind in Tabelle 7-5 dargestellt.

Tabelle 7-5: Ausgewertete Einzelkennzahlen für RBG-1, 2 und 3

Wirkungsgrad	RBG-1	RBG-2	RBG-3
Fahrwirkungsgrad	0,56	0,83	0,53
Hubwirkungsgrad	0,62	0,76	0,74
Rückspeisewirkungsgrad	-	0,56	0,56
Kombinationsfaktor	0,47	0,89	0,81
Grundlastfaktor	0,68	0,60	0,60

Die Fahrwirkungsgrade von RBG-1 und RBG-3 liegen in einem ähnlichen Bereich, RBG-2 ist effizienter. Nachdem die Fahrstrecken in den drei Messungen aber nicht gleich waren, können die Wirkungsgrade nicht direkt verglichen werden. Die Hubwirkungsgrade lassen sich besser vergleichen, da der Hubwirkungsgrad nicht so stark von der Hubhöhe abhängt. Die Rückspeisewirkungsgrade liegen sehr nahe beisammen.

7.6 Bewertung der logistischen Leistung

Die logistische Leistung soll mit Hilfe des in Kapitel 5 vorgestellten Referenzzyklus erfolgen. Die logistische Leistung beschreibt den Nutzen eines RBG bezogen auf seine Aufgaben und Funktionen im HRL. Die Gesamtbewertung des RBG erfolgt mit Hilfe der von *Ertl* entwickelten Definition für Energieeffizienz [Ert-2016, S. 168ff.]. Der Energiebedarf wird ins Verhältnis zur logistischen Leistung LL gesetzt. Diese ist in Gleichung (7-22) mit der Regalwandfläche A_{RW} , dem Durchsatz an Lagergütern \dot{n} und der mittleren transportierten Masse \bar{m} definiert.

$$LL = A_{RW} \cdot \dot{n} \cdot \bar{m} \quad (7-22)$$

Diese Faktoren beschreiben den Nutzen, der beim Betrieb eines RBG im Lager für den Betreiber entsteht. Die Effizienzkennzahl K_{EE} wird nach der folgenden grundlegenden Berechnungsvorschrift als Verhältnis aus mittlerem Energiebedarf \bar{E} und logistischer Leistung berechnet.

$$K_{EE} = \frac{\bar{E}}{LL} \quad (7-23)$$

Um unterschiedliche Betriebszustände zu berücksichtigen, wurde die Definition von *Ertl* noch um verschiedene Betriebszustände erweitert. Ein Betriebszustand geht dann mit seiner Betriebszeit t_i im Verhältnis zur Gesamtzeit T_{ges} in die Berechnung ein. Daraus ergibt sich dann die Definition nach Gleichung (7-24).

$$K_{EE} = \frac{1}{A_{RW} \cdot T_{ges}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\bar{E}_i \cdot t_i}{\dot{n}_i \cdot \bar{m}_i} \quad (7-24)$$

Mit Hilfe der in Kapitel 5.3 entwickelten Referenzfahanfahrten kann die Effizienzkennzahl einfach berechnet werden. Dazu muss nur der mittlere Energiebedarf der Referenzfahanfahrt \bar{E}_{Ref} mit der mittleren Spielzeit \bar{t}_{Ref} , die nach FEM (siehe [FEM-9851]) ermittelt werden kann, der Regalwandfläche und der mittleren Transportmasse pro Spiel verknüpft werden. Dann ergibt sich für einen Betriebszustand die Gleichung (7-25) zur Berechnung der EE-Kennzahl.

$$K_{EE} = \frac{\bar{E}_{Ref} \cdot \bar{t}_{Ref}}{A_{RW} \cdot \bar{m}_S} \quad (7-25)$$

Eine kleinere EE-Kennzahl bedeutet also eine höhere Energieeffizienz. Nachfolgend werden einige Auswertungen der EE-Kennzahl für die simulierten Konfigurationen aus Kapitel 5 gezeigt. Dabei werden die EE-Kennzahlen für die simulierten Konfigurationen über die Konfigurationsnummer geplottet. Die Kennzahlen werden für Einzel-, Doppel- und Vierfachspielbetrieb im AKL und für Einzel- und Doppelspielbetrieb im APL dargestellt. Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11 zeigen die Effizienzkennzahlen für die 55 simulierten Konfigurationen für Einzel- und Doppelspielbetrieb im AKL.

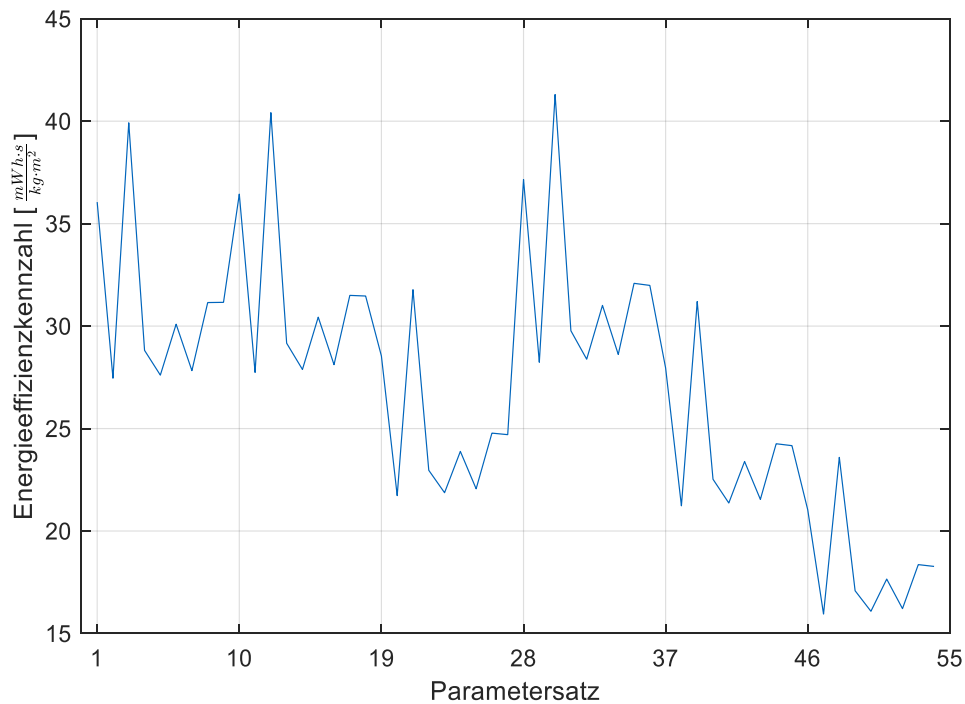


Abbildung 7-10: Zusammenstellung der Effizienzkennzahl für den Einzelspielbetrieb der simulierten AKL Konfigurationen [Rie-2018]

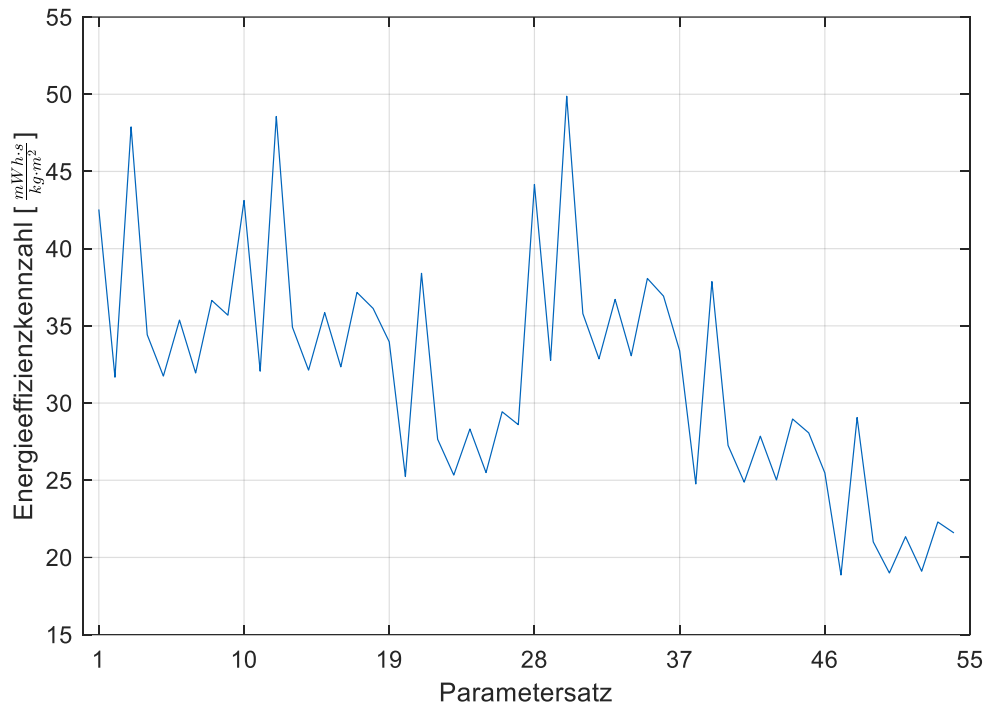


Abbildung 7-11: Zusammenstellung der Effizienzkennzahl für den Doppelspielbetrieb der simulierten AKL Konfigurationen [Rie-2018]

Auffällig ist, dass die Kennzahlen für den Einzel- und Doppelspielbetrieb zwar relativ ähnlich verlaufen, aber parallel verschoben sind. Der Einzelspielbetrieb ist nach der Kennzahl energieeffizienter. Beim Wechsel von Einzel- auf Doppelspielbetrieb steigt der Energiebedarf stärker als der Durchsatz an. Diese Tatsache ist ein Anhaltspunkt, dass die EE-Kennzahl weiter präzisiert werden muss. In Abbildung 7-12 ist die EE-Kennzahl für die 324 simulierten Konfigurationen im Vierfachspielbetrieb gezeigt.

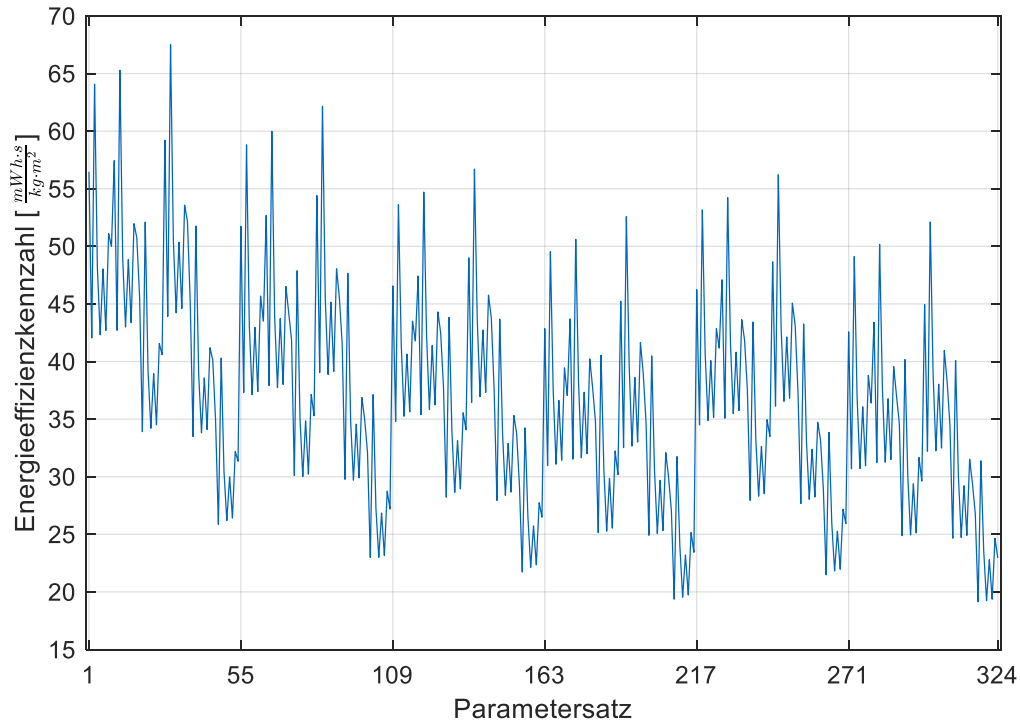


Abbildung 7-12: Zusammenstellung der Effizienzkennzahl für den Vierfachspielbetrieb der simulierten AKL Konfigurationen [Rie-2018]

Auf Grund der Vielzahl an simulierten Konfigurationen ergibt sich ein differenziertes Bild mit einer Bandbreite an Effizienzkennzahlen. Abbildung 7-13 und Abbildung 7-14 zeigen abschließend die ausgewerteten Kennzahlen für Einzel- und Doppelspielbetrieb der simulierten APL Konfigurationen. Die EE-Kennzahl liegt deutlich unter denen der simulierten AKL. Das spiegelt die höhere Effizienz beim Transport größerer Massen durch das Lager wieder. Durch ein besseres Gesamtmasse zu Nutzlast Verhältnis im APL Bereich ergibt sich eine höhere EE.

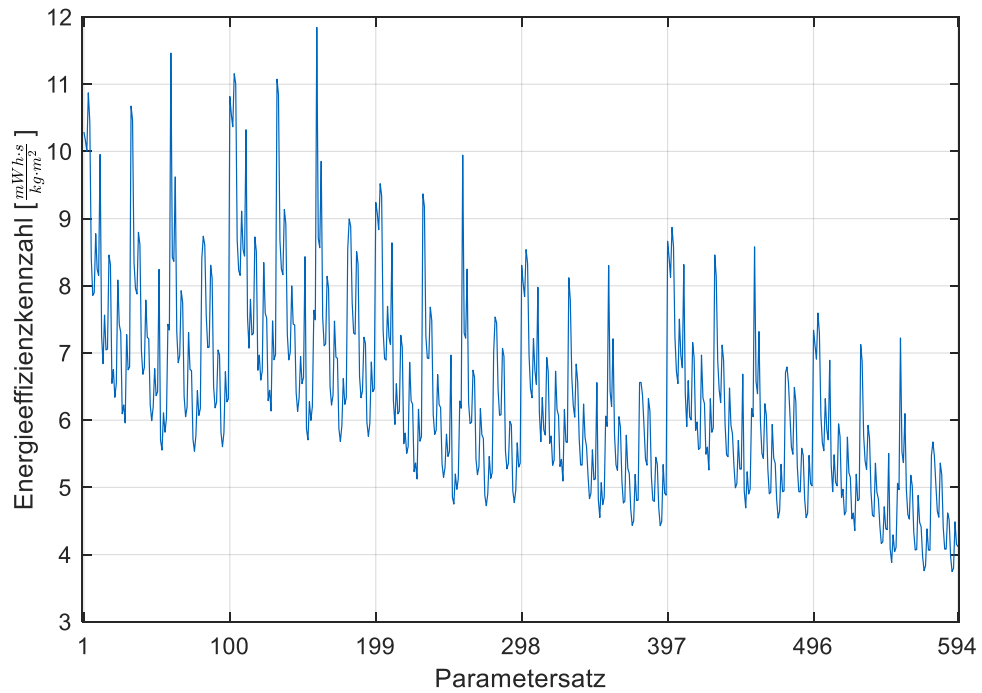


Abbildung 7-13: Zusammenstellung der Effizienzkennzahl für den Einzelspielbetrieb der simulierten APL Konfigurationen [Rie-2018]

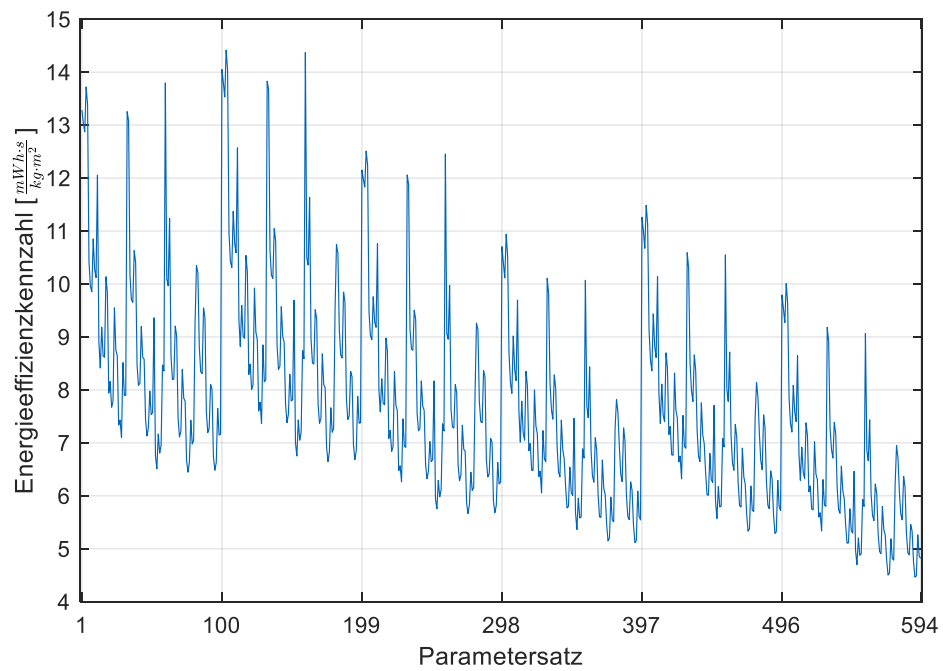


Abbildung 7-14: Zusammenstellung der Effizienzkennzahl für den Doppelspielbetrieb der simulierten APL Konfigurationen [Rie-2018]

8 Implementierung eines Softwaredemonstrators

Um die gewonnenen Erkenntnisse für den Anwender einfach zugänglich zu machen, sollte ein einfacher Softwaredemonstrator implementiert werden. Dieser wurde in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss in Microsoft Excel umgesetzt. Im nachfolgenden Text wird der Softwaredemonstrator vereinfacht Tool genannt. Dieser beinhaltet die vorgefertigten Berechnungstabellen und Eingabefelder, mit deren Hilfe die EE eines Gerätes ausgewertet werden kann oder direkt die EE mehrerer Geräte verglichen werden kann. Das Tool gliedert sich in drei Blätter in Excel. Im ersten Blatt „Berechnung“ werden sämtliche Eingabeparameter definiert und damit die Berechnung der Kennzahlen realisiert. Im zweiten Blatt „Diagramme“ befinden sich die Auswertungsdiagramme und im dritten Blatt „Feste Parameter“ sind die Referenzwerte definiert.

8.1 Eingabe der Parameter

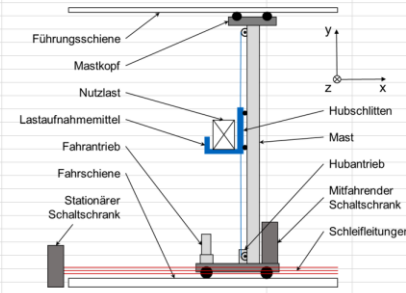
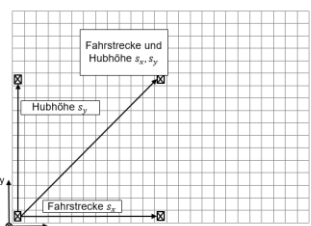
Das Berechnungsblatt ist in zwei Hauptteile gegliedert. Im linken Bereich ist eine Beschreibung des Tools mit Erklärungen welche Parameter für die Berechnung eingegeben werden müssen. Zusätzlich sind Abbildungen zur Verdeutlichung der Erklärungen enthalten. Die Parameter für ein RBG sind in einer einzigen Spalte einzugeben. Per Makro können neue Spalten für weitere RBG hinzugefügt werden. Damit lassen sich verschiedene RBG miteinander vergleichen. Testweise sind drei RBG mit fiktiven Daten angelegt. Die Grundstruktur des Blattes ist in Abbildung 8-1 dargestellt.

Bewertung der Energieeffizienz eines RBG

Beschreibung
 Dieses Tool berechnet die Kennwerte zur Bewertung mehrerer RBG. Dafür sind zunächst im Eingabeblock verschiedene Angaben zu machen. Anschließend werden die Kennwerte für die Einzelkennzahlen und die Gesamtbewertung berechnet.

1. Lager/RBG Kennwerte
 Hier werden die Grundeigenschaften, wie Massen, Abmaße und Geschwindigkeiten der RBG eingetragen. Eine schematische Darstellung eines RBG und seiner Komponenten ist rechts zu sehen.

2. Fahrzeiten und Fahrstrecken
 Hier sind die Fahrzeiten und Fahrstrecken der Testfahrten einzutragen. Die Fahrstrecken sind schematisch in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Eingabeparameter:						
Namen der Regalbediengeräte						
1. Lager/RBG Kennwerte						
	Einheit	Formelzeichen	RBG1	RBG2	RBG3	
Maximale Nutzlastmasse	kg	m_NL	100	1000	100	
Masse Regalbediengerät	kg	m_RBG	2230	7500	2230	
Masse Hubschlitten inklusive LAM	kg	m_HS	300	1200	300	
Masse Gegengewicht	kg	m_GGW	0	400	0	
maximale Fahrgeschwindigkeit	m/s	v_x	6	6	6	
maximale Hubgeschwindigkeit	m/s	v_y	3	3	3	
Regalwandlänge	m	L	20,978	20,978	20,978	
Regalwandhöhe	m	H	7,95	7,95	7,95	

Abbildung 8-1: Hauptstruktur des Berechnungsblattes im Tool

Die im Eingabeblock einzugebenden Parameter sind nachfolgend beschrieben. Mit diesen werden anschließend die Kennwerte für die Einzelkennzahlen und die Gesamtbewertung berechnet. Nachfolgend werden die einzelnen Eingabesektionen und die Abbildungen im Tool beschrieben.

1. Lager/RBG Kennwerte

1. Lager/RBG Kennwerte						
	Einheit	Formelzeichen	RBG1	RBG2	RBG3	
Maximale Nutzlastmasse	kg	m_NL	100	1000	100	
Masse Regalbediengerät	kg	m_RBG	2230	7500	2230	
Masse Hubschlitten inklusive LAM	kg	m_HS	300	1200	300	
Masse Gegengewicht	kg	m_GGW	0	400	0	
maximale Fahrgeschwindigkeit	m/s	v_x	6	6	6	
maximale Hubgeschwindigkeit	m/s	v_y	3	3	3	
Regalwandlänge	m	L	20,978	20,978	20,978	
Regalwandhöhe	m	H	7,95	7,95	7,95	

Abbildung 8-2: Eingabesektion 1 - Lager/RBG Kennwerte

Die Grundeigenschaften, wie Massen, Abmaße und Geschwindigkeiten der RBG werden hier eingetragen. Eine schematische Darstellung eines RBG und seiner Komponenten ist in Abbildung 8-3 zu sehen.

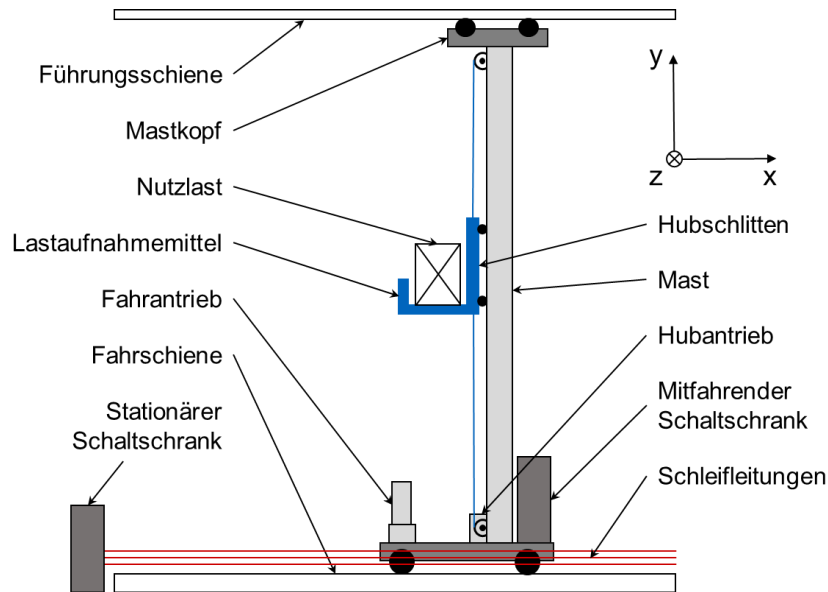


Abbildung 8-3: Nomenklatur und Aufbau eines RBG im Tool (vgl. [Rüc-2018a; Rüc-2018b])

2. Fahrzeiten und Fahrstrecken

2. Fahrzeiten und Fahrstrecken						
Hubhöhe	m	s_y		6,6	6,6	6,6
Fahrstrecke	m	s_x		10,5	10,5	10,5
benötigte Fahrzeit für Fahrbewegung	s	t_x		7	8	7
benötigte Fahrzeit für Hubbewegung	s	t_{+y}		4	4	4
benötigte Fahrzeit für Senkbewegung	s	t_{-y}		4	4	4
Fahrzeit für kombinierte Fahr- und Hubbewegung	s	t_{xy}		8	9	8

Abbildung 8-4: Eingabesektion 2 - Fahrzeiten und Fahrstrecken

In diesem Abschnitt werden die Fahrzeiten und Fahrstrecken der Messfahrten eingetragen. Die Fahrstrecken sind schematisch in Abbildung 8-5 dargestellt.

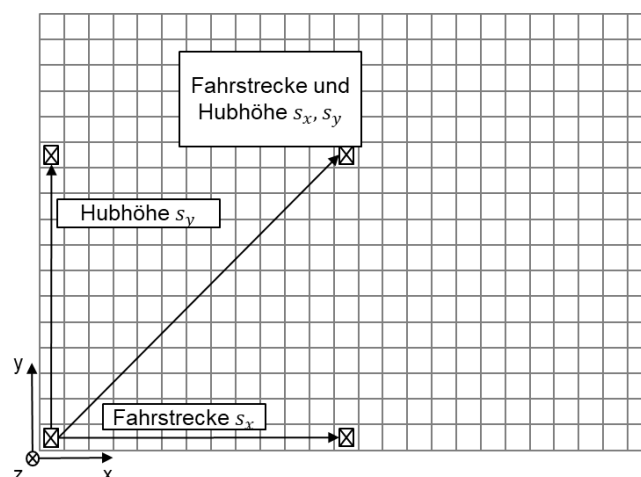


Abbildung 8-5: Fahrstrecken der Messfahrten im Tool [Rüc-2018b]

3. gemessener oder simulierter Energiebedarf

3. gemessener oder simulierter Energiebedarf					
realer Energiebedarf einer Fahrbewegung	Wh	E_re,x	38	80	26
realer Energiebedarf eines Hubs	Wh	E_re,+y	32	76	30
zurückgewonnene Energie einer Senkbewegung	Wh	E_re,-y	0	15	4
Energiebedarf kombinierte Fahrt	Wh	E_re,xy	75	120	45
Grundlast während der Fahrbewegungen	W	P_GL	644	397	644

Abbildung 8-6: Eingabesektion 3 - gemessener oder simulierter Energiebedarf

Hier werden die realen Energiebedarfe für die Messfahrten eingetragen. Diese können entweder aus einem Simulationsmodell oder aus einer Messung gewonnen werden. Zusätzlich muss die Grundlast, die während der Fahrbewegungen auftritt, angegeben werden.

4. mittlerer Energieverbrauch Lastwechsel

4. mittlerer Energieverbrauch Lastwechsel		Wh	E_Z	1,14	1,768	1,14
E_Z,i Gleichverteilt? Ja/Nein				Ja	Ja	Ja
			E_Z,1 * h_n_1	0,95	1,70	0,95
			E_Z,2 * h_n_2	1,07	1,50	1,07
			E_Z,3 * h_n_3	1,17	1,98	1,17
			E_Z,4 * h_n_4	1,12	1,56	1,12
			E_Z,5 * h_n_5	1,21	2,10	1,21
			E_Z,6 * h_n_6	1,32		1,32
			E_Z,7 * h_n_7			
			E_Z,8 * h_n_8			
			E_Z,9 * h_n_9			
			E_Z,10*h_n_10			

Abbildung 8-7: Eingabesektion 4 – mittlerer Energieverbrauch Lastwechsel

In diesem Bereich werden die Energiebedarfe unterschiedlicher Lastwechselbewegungen angegeben. Daraus wird der mittlere Energiebedarf eines Lastwechsels bestimmt. Wenn die Angabe zur Gleichverteilung "Ja" gesetzt wird, dann wird ein arithmetisches Mittel aus allen Angaben gebildet. Bei "Nein" müssen die Energiebedarfs-werte mit ihrer zeitlichen Häufigkeit multipliziert angegeben werden, da am Schluss nur noch eine Summenbildung erfolgt.

5. Mittlere Grundlast

5. Mittlere Grundlast			W	P_GL,ges	383,33333	480,4167	383,3333
Grundlast während der einzelnen Betriebszustände	W * h		P_GL,1 * t_1	4000	5000	3200	
			P_GL,2 * t_2	1200	4200	1200	
			P_GL,3 * t_3	4000	2330	4800	
			P_GL,4 * t_4				
			P_GL,5 * t_5				
			P_GL,6 * t_6				
			P_GL,7 * t_7				
			P_GL,8 * t_8				
			P_GL,9 * t_9				
			P_GL,10*t_10				
Gesamte Betriebsdauer	h		t_ges	24	24	24	

Abbildung 8-8: Eingabesektion 5 - Mittlere Grundlast

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Grundlastwerte multipliziert mit der Zeitspanne in der sie auftreten angegeben. Zusätzlich muss die Gesamtzeit, in der diese Grundlastleistungen auftreten, angegeben werden. Daraus wird eine zeitlich gemittelte Grundlast berechnet. Die Grundlast ist jene elektrische Leistung, die von den Verbrauchern, die in der Abbildung 8-9 gezeigt werden, bei Stillstand des RBG verbraucht wird.

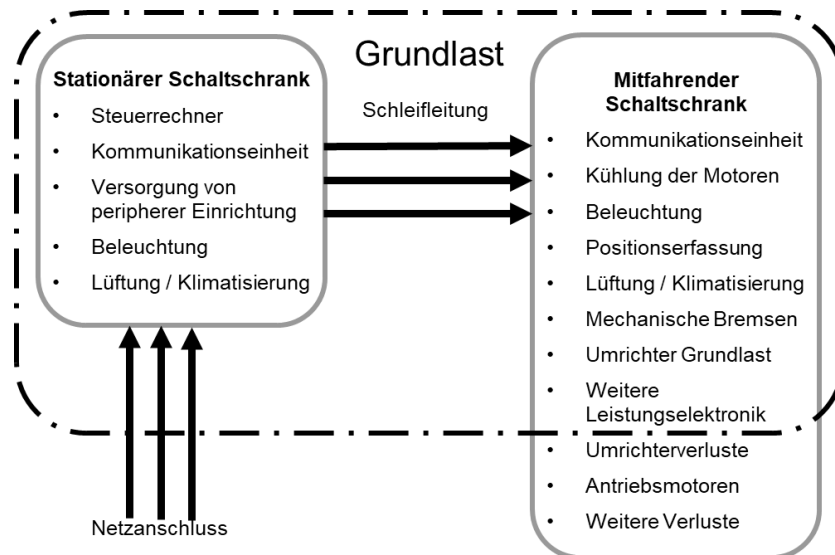


Abbildung 8-9: Grundlastverbraucher am RBG [Rüc-2018b]

6. gesamte Energieeffizienz während der Betriebsphase

6. gesamte Energieeffizienz während der Fahrphase	mWh / (kg/s*m²)	K_EE	8,46	7,10	10,38
		(E_1 * t_Spiel,1 * t_1) / m_1	18,37	12,80	12,85
		(E_2 * t_Spiel,2 * t_2) / m_2	12,20	5,36	3,34
		(E_3 * t_Spiel,3 * t_3) / m_3	3,30	10,24	25,36
		(E_4 * t_Spiel,4 * t_4) / m_4			
		(E_5 * t_Spiel,5 * t_5) / m_5			
		(E_6 * t_Spiel,6 * t_6) / m_6			
		(E_7 * t_Spiel,7 * t_7) / m_7			
		(E_8 * t_Spiel,8 * t_8) / m_8			
		(E_9 * t_Spiel,9 * t_9) / m_9			
		(E_10 * t_Spiel,10 * t_10) / m_10			
Gesamte Fahrdauer	h	T_ges	24	24	24

Abbildung 8-10: Eingabesektion 6 - gesamte Energieeffizienz während der Fahrphase

Zur Berechnung der gesamten EE während der Betriebsphase müssen für unterschiedliche Betriebszustände die entsprechenden Werte angegeben werden. Hier wird für jeden Betriebszustand betrachtet werden soll, die mittlere Transportmasse multipliziert mit der Dauer des Betriebszustandes in h und dividiert durch den Energiebedarf in Wh für ein Referenzspiel und die mittlere Spielzeit in s angegeben. Die mittlere Spielzeit kann über das FEM Norm-Doppelspiel ermittelt werden, während der mittlere Energiebedarf über das Referenzdoppelspiel bestimmt werden kann. Exemplarisch ist noch einmal das Referenzdoppelspiel für AKL in Abbildung 8-11 dargestellt.

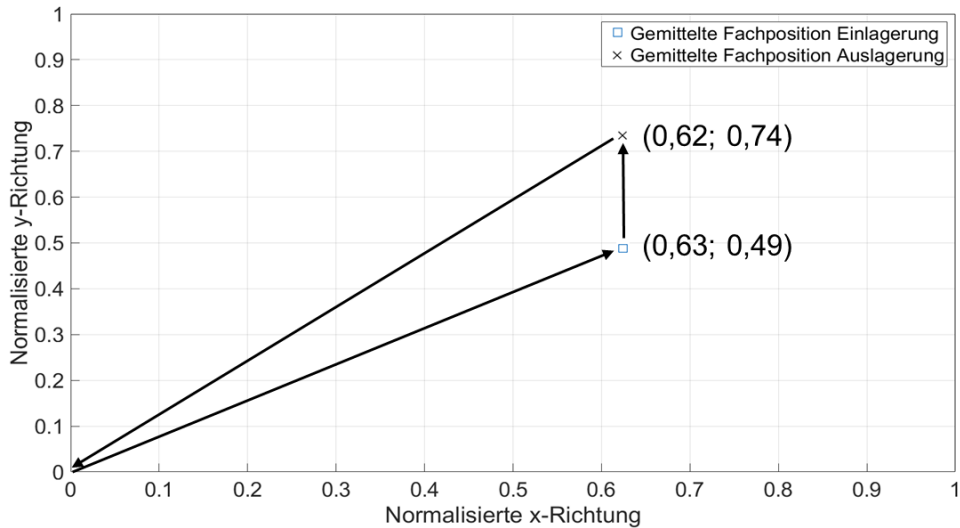


Abbildung 8-11: Darstellung des Referenzdoppelspiels für AKL

8.2 Darstellung der Ergebnisse

Aus den Eingaben werden im Ergebnisteil die in Kapitel 7 definierten Kennzahlen berechnet. Die Ergebnisberechnung ist in Abbildung 8-12 dargestellt. Ausgehend von den eingegebenen Parametern werden die Vergleichsenergiebedarfe und die Wirkungsgrade und Faktoren für die Bewertung berechnet.

Ergebnisse	Einheit	Formelzeichen	RBG1	RBG2	RBG3
Regalwandfaktor	1	a	0,758	0,758	0,758
Lagerfläche	m ²	A	166,775	166,775	166,775
berechnete Energiebedarfe [Wh]					
idealer Vergleichsenergiebedarf einer Fahrbewegung	Wh	E_id,x	11,650	42,500	11,650
Transportvergleichsenergiebedarf einer Fahrbewegung	Wh	E_T,x	0,500	5,000	0,500
idealer Vergleichsenergiebedarf einer Hubbewegung	Wh	E_id,y	7,194	32,373	7,194
Transportvergleichsenergiebedarf einer Hubbewegung	Wh	E_T,y	1,799	17,985	1,799
idealer Vergleichsenergiebedarf einer Senkbewegung	Wh	E_id,-y	7,194	32,373	7,194
Energiebedarf eines Lastwechsels	Wh	E_Z	1,140	1,768	1,140
Wirkungsgrade/Faktoren					
idealer Fahrwirkungsgrad (FWG)	1	eta_id,x	0,317	0,537	0,471
Transportwirkungsgrad Fahrtrieb	1	eta_T,x	0,014	0,063	0,020
idealer Hubwirkungsgrad (HWG)	1	eta_id,y	0,230	0,428	0,246
Transportwirkungsgrad Hubtrieb	1	eta_T,y	0,057	0,238	0,061
Rückspeisungswirkungsgrad (RWG)	1	eta_id,-y	0,099	0,477	0,655
Kombinationsfaktor (KF)	1	eta_id,xy	0,256	0,630	0,427
Grundlastfaktor (GF)	1	n_Gf	0,744	0,680	0,744
Lastwechselfaktor (LWF)	1	n_LW	0,430	0,116	0,430
gesamte Energieeffizienz	mWh / (kg/s*m ²)	K_EE	8,461	7,095	10,382

Abbildung 8-12: Ergebnisberechnung im Tool

Zusätzlich sind einige Diagramme vorformatiert, die die wichtigsten Informationen graphisch aufbereiten. Abbildung 8-13 zeigt exemplarisch das Spinnendiagramm, in dem die Einzelkennzahlen dargestellt werden.

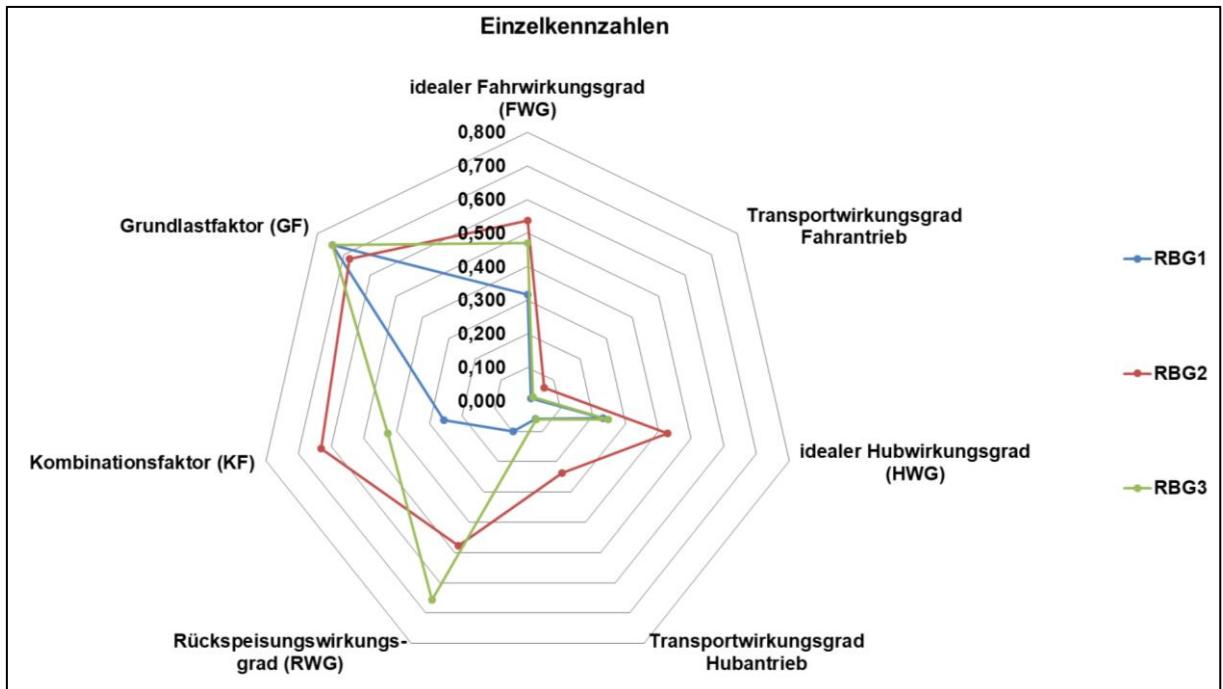


Abbildung 8-13: Darstellung der Einzelkennzahlen im Tool

Analog zu diesem Diagramm sind noch Diagramme für die Gesamtkennzahl und für den Massenvergleich enthalten.

9 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

In diesem Kapitel werden die erzielten Forschungsergebnisse noch einmal zusammengefasst und ein Ausblick auf die in Zukunft möglichen Forschungsarbeiten gegeben.

9.1 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung einer Bewertungsmethodik für die EE von RBG, die von Herstellern und Betreibern der Geräte einfach verwendet werden kann. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine solche Bewertungsmethodik entwickelt und in einem Softwaredemonstrator umgesetzt. Zunächst wurden dazu umfassende Recherchen zum Stand der Forschung und den Einflussfaktoren auf Energiebedarf und Nutzen eines RBG durchgeführt. Aus den Erkenntnissen dieser Recherche wurde ein simulativer Ansatz zur Untersuchung des Energiebedarfs von RBG entwickelt und implementiert. Mit diesem Ansatz ist die Untersuchung unterschiedlichster Bauformen von RBG möglich. Unter anderem können AKL- und APL-RBG, Geräte mit oder ohne Energierückspeisung und verschiedenste Konfigurationen von LAM-Kapazität, LAM-Anzahl und Lagertiefe abgebildet werden. Zusätzlich wurden parallel Messungen an Realanlagen durchgeführt, um die Parameter für das Simulationsmodell zu ermitteln. Mit dem Simulationsmodell wurde eine Simulationsstudie durchgeführt, mit deren Hilfe repräsentative Fachanfahrten für die unterschiedlichen RBG-Konfigurationen im AKL und APL Bereich gefunden wurden. Aus den repräsentativen Fachanfahrten aller Konfigurationen wurden Referenzspiele für den Betrieb von RBG entwickelt.

Mit den Ergebnissen aus den Messungen konnten Erkenntnisse zum Einfluss verschiedener Faktoren auf den Betrieb und den Energiebedarf von RBG gesammelt werden. Aus diesen Erkenntnissen wurden Bewertungen für die einzelnen Komponenten eines RBG entwickelt. Mit den Einzelbewertungen können die Hauptantriebe, die Gerätekonstruktion, das LAM und die Grundlast des RBG einzeln bewertet werden. Um die gesamte Energieeffizienz eines RBG im Betrieb bewerten zu können, wurde die Bewertung der logistischen Leistung entwickelt. Diese Bewertung kann mit Hilfe der entwickelten Referenzfachanfahrten einfach durchgeführt werden.

Abschließend wurde ein Softwaredemonstrator in Form eines Excel Tools entwickelt. Dieses Tool ermöglicht den Herstellern und Betreibern von RBG die einfache Anwendung der entwickelten Bewertungsmethodik. Das angestrebte Forschungsziel ist damit erreicht worden.

9.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Die im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse sind für Hersteller, Planer, Generalunternehmer und Betreiber von RBG nutzbar. Im Rahmen der Planung kann die Bewertungsmethodik benutzt werden, um die vom Kunden geforderte Berücksichtigung der EE umzusetzen. Hersteller können die Bewertungsmethodik nutzen, um die EE ihrer Geräte transparent auszuweisen. Damit können die Hersteller die innovative Konstruktionen und Entwicklungen liefern, die Vorteile ihrer Geräte gegenüber einer Standardfördertechnik darstellen.

Hersteller können die Methodik zusätzlich im Rahmen des Entwicklungsprozesses ihrer Geräte benutzen. Mit Hilfe der Einzelkennzahlen und der Bewertung der logistischen Leistung lassen sich einzelne Aspekte und die Gesamtleistung des RBG gezielt bewerten. Zusätzlich können Verbesserungen bestehender Konstruktionen evaluiert werden.

Durch die transparente Bewertung der EE von RBG wird eine größere Verbreitung energieeffizienter Geräte erwartet. Dadurch kann ein wichtiger Beitrag zu einer ressourcenschonenden Fördertechnik geleistet werden.

Der Softwaredemonstrator wurde den Mitgliedern des PA nach Abschluss des Projekts zur Verfügung gestellt. Nach einer ersten Testphase bei den Mitgliedern werden die Rückmeldungen und Verbesserungsvorschläge in den Demonstrator eingearbeitet. Danach soll der Demonstrator öffentlich zur Verfügung gestellt werden. Die im Rahmen der weiteren Forschungsarbeiten erzielten Ergebnisse sollen nach und nach auch in den Softwaredemonstrator eingearbeitet werden.

9.3 Ausblick

Die im Rahmen des Projekts erarbeiteten Ergebnisse können bereits in der Praxis eingesetzt werden. Trotzdem sind zusammen mit den Mitgliedern des PA bereits Punkte für mögliche Verbesserungen identifiziert worden.

In Zusammenarbeit mit dem PA wurde relativ früh die Einschränkung getroffen, nur die physikalischen Einflussfaktoren zu untersuchen. Der Fokus der Bewertung wurde deswegen auf die physikalischen Aspekte und deren Einfluss auf die EE gelegt. Der wichtigste Ausgangspunkt für die Untersuchung weiterer Aspekte sollte deswegen die Bewertung strategischer Einflüsse sein. Besonders wichtig sind vor allem Aspekte der Lagerplatzzonierung, da diese in fast allen HRL Anwendung finden. In einem der nächsten Schritte soll das in Kapitel 5 vorgestellte Simulationsmodell deswegen um eine Möglichkeit zur Berücksichtigung von Lagerplatzstrategien erweitert werden. Zusätzlich ist auch die Berücksichtigung von Aspekten der Betriebsstrategie geplant. Mit Hilfe von Methoden aus der statistischen Versuchsplanung sollen die betrachteten Konfigurationen von AKL und APL sinnvoll erweitert werden.

Auf Grund der Auswertungen der Effizienzkennzahlen in Kapitel 7.6 soll die Definition der Effizienzkennzahl noch einmal überdacht werden. Gerade weil der Doppel- und Mehrfachspielbetrieb, im Vergleich mit dem Einzelspielbetrieb, weniger energieeffizient erscheint, soll die Definition um Faktoren oder Exponenten erweitert werden. Im Zuge der Überarbeitung sollen zuerst Parameterstudien, die den Einfluss einzelner Parameter auf die EE-Kennzahl darstellen, durchgeführt werden. Mit Hilfe der Ergebnisse soll die Definition dann angepasst werden.

Im Rahmen der Untersuchung von repräsentativen Fachanfahrten wurden Umlagerungen zuerst einmal noch nicht berücksichtigt. Beim Einsatz mehrfachtiefer, nicht sortenreiner Lagerung sind Umlagerungen aber in einem normalen Lagerbetrieb üblich. Deswegen soll das Simulationsmodell hinsichtlich der Berücksichtigung von Umlagerungen erweitert werden. Die Auswertung der Simulation der Effizienzkennzahl soll zusätzlich erweitert werden. Mit Hilfe der Simulation können die Einflüsse einzelner Parameter bestimmt werden.

Aktuell ist für die Anwendung der Bewertungsmethodik noch die detaillierte Kenntnis des zu bewertenden RBGs nötig. Für die Realenergiebedarfe muss entweder ein kalibriertes Simulationsmodell vorhanden sein oder die Daten müssen mittels Messung erhoben werden. An dieser Stelle soll die Anwendbarkeit durch zur Verfügung stellen

eines Prognosemodells für die Energieeffizienz weiter verbessert werden. Mit Hilfe des Prognosemodells soll eine Bewertung der Energieeffizienz in frühen Planungsphasen verbessert werden.

In Zukunft wird die Umsetzung der Bewertungsmethodik im Rahmen einer VDI Richtlinie angestrebt. Damit soll eine größere Verbreitung und Akzeptanz der Bewertungsmethodik und damit eine insgesamt größere Steigerung der Ressourceneffizienz erreicht werden.

Die weitergehende Forschung soll teilweise im Rahmen eines Dissertationsvorhabens des Autors stattfinden.

10 Verzeichnis der Veröffentlichungen

Energiebedarf und Nutzen – Bewertungsmethodik für die Klassifizierung von Regalbediengeräten

Hebezeuge Fördermittel 4 / 2017

[Rüc-2017]

Bestimmung spezifischer Wirkungsgrade von Hub- und Fahrtrieb eines Regalbediengerätes

Kranfachtagung Dresden 2018

[Rüc-2018a]

Forschungsansatz zur Bestimmung der Energieeffizienz von Fördermitteln der Intralogistik

Logistikwerkstatt Graz 2018

[Rüc-2018c]

Markstudie Hochregallager

Materialfluss 6/2018

[Rüc-2018d]

Entwicklung einer mehrkomponentigen Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten

WGTL Kolloquium 2018; Logistics Journal Proceedings 2018

[Rüc-2018b]

11 Verzeichnis der studentischen Arbeiten

Entwicklung eines Systems zur Beschleunigungsmessung an Regalbediengeräten auf Arduino Basis

Bachelorarbeit von Lukas Karzel
[Kar-2017]

Modellierung des elektrischen Antriebssystems von Regalbediengeräten

Semesterarbeit von Alexander Geffel
[Gef-2017]

Wirkungsgradbestimmung von Hub- und Fahrtrieb eines Regalbediengerätes durch Energiebedarfsmessungen

Semesterarbeit von Ying Shen
[She-2017]

Ermittlung von repräsentativen Fachanfahrten für den mittleren Energiebedarf eines Regalbediengerätes mit Hilfe von Simulationsreihen

Bachelorarbeit von Christian Parr
[Par-2017b]

Analyse des Antriebsverhaltens eines Doppelkufensystems

Semesterarbeit von Gregor Kolls
[Kol-2018]

Simulation des Energiebedarfs von Doppel-Lastaufnahmemitteln an Regalbediengeräten

Semesterarbeit von Jona Rief
[Rie-2018]

Analyse der Verlustleistung eines Regalbediengerätes mittels Thermografie

Semesterarbeit von Sebastian Preis

[Pre-2018]

Entwicklung einer Bewertung für die Energieeffizienz von Lastaufnahmemitteln bei Regalbediengeräten

Semesterarbeit von Johannes Jung

[Jun-2018]

Studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte

Folgende studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte haben, zum Teil über Studienarbeiten hinausgehend, zusätzlich am Projekt mitgearbeitet

- Fawad Ahmad
- Philipp Gauß
- Lukas Karzel
- Sajjad Oomro
- Christian Parr
- Muhammad Umer
- Benjamin Zhou

An dieser Stelle möchte ich allen Studierenden, die im Rahmen des Projekts Studienarbeiten oder hilfswissenschaftliche Tätigkeiten ausgeführt haben, herzlich für ihre Arbeit und ihren Einsatz danken.

Literaturverzeichnis

- [Ali-2018] Alias, C.; Nikolaev, I.; Magallanes, E.; Noche, B.: An Overview of Warehousing Applications based on Cable Robot Technology in Logistics (2018)
- [Atz-2016] Atz, T.: Eine algorithmenbasierte Methode zur ganzheitlichen Systemplanung automatischer Hochregallager. Dissertation, Technische Universität München, München, München, 2016.
- [Azz-2011] Azzi, A.; Battini, D.; Faccio, M.; Persona, A.; Sgarbossa, F.: Innovative travel time model for dual-shuttle automated storage/retrieval systems. In: Computers & Industrial Engineering, Jg. 61 (2011) Nr. 3, S. 600–607.
- [Boy-2016] Boysen, N.; Stephan, K.: A survey on single crane scheduling in automated storage/retrieval systems. In: European Journal of Operational Research, Jg. 254 (2016) Nr. 3, S. 691–704.
- [Boz-1984] Bozer, Y. A.; White, J. A.: Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems. In: IEE Transactions (1984) Nr. 37, S. 329–338.
- [Bra-2012] Braun, M.; Schönung, F.; Furmans, K.: Betrachtung der Umweltaspekte im System Lagertechnik. In: HF Hebezeuge und Fördermittel (2012) Nr. 9, S. 472–474.
- [Bra-2016] 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.
- [DIN-779] Deutsches Institut für Normung: Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumlufttechnik – Bestimmung der Filterleistung. DIN EN Nr. 779, 2012.
- [ECC-RS4] Eurovent Certita Certification: Rating Standard for the Certification of Air Filters. ECC Nr. RS4/C/001-2015, 2015.
- [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.: Energiebedarfsermittlung und Energieeffizienzbewertung von Regalbediengeräten in automatischen Kleinteilelagern. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2016.

-
- [Eur-2009a] Europäisches Parlament: EG-Verordnung 640/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates – 640/2009. Europäisches Parlament, 2009.
- [Eur-2009b] Europäisches Parlament: Richtlinie zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energie-verbrauchsrelevanter Produkte – 2009/125/EG, 2009.
- [FEM-9101] Federation Europeenne de la Manutention: Terminologie - Regalbediengeräte - Definitionen. FEM Nr. 9101, 1997.
- [FEM-9311] Federation Europeenne de la Manutention: Berechnungsgrundlagen für Regalbediengeräte - Tragwerke. FEM Nr. 9311, 1978.
- [FEM-9512] Federation Europeenne de la Manutention: Berechnungsgrundlagen für Regalbediengeräte - Triebwerke. FEM Nr. 9512, 1997.
- [FEM-9831] Federation Europeenne de la Manutention: Berechnungsgrundlagen für Regalbediengeräte Toleranzen, Verformungen und FreimaBe im Hochregallager. FEM Nr. 9831, 1995.
- [FEM-9832] Federation Europeenne de la Manutention: Berechnungsgrundlagen für Regalbediengeräte - Toleranzen, Verformungen und FreimaBe im automatischen Kleinteilelager. FEM Nr. 9832, 2001.
- [FEM-9851] Federation Europeenne de la Manutention: Leistungsnachweis für Regalbediengeräte - Spielzeiten. FEM Nr. 9851, 2003.
- [FEM-9865] Federation Europeenne de la Manutention: Energy consumption - determination methods (ECoDeMISE). FEM Nr. 9865, 2017.
- [Flu-2006] Fluke Europe: Bedienungshandbuch Fluke Power Logger 1735. <https://www.fluke.com/de-de/produkt/elektrische-pruefungen/power-und-energie-logger/dreiphasige-power-und-energie-logger/fluke-1735>, Aufruf am 09.10.2018.
- [Gef-2017] Geffel, A.: Modellierung des elektrischen Antriebssystems von Regalbediengeräten. Semesterarbeit. Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2017.
- [Gri-2015] Griemert, R.; Römisch, P.: Fördertechnik – Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [Hah-2017] Hahn-Woernle, P.; Günthner, W. A.: Power-load management reduces energy-dependent costs of multi-aisle mini-load automated storage and retrieval systems. In: International journal of production research, Jg. 56 (2017) Nr. 3, S. 1269–1285.

-
- [Hom-2007] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Nagel, L.: Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik ;. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [Jun-2018] Jung, J.: Entwicklung einer Bewertung für die Energieeffizienz von Lastaufnahmemitteln bei Regalbediengeräten – Vorläufige Version. Semesterarbeit. Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2018.
- [Kar-2017] Karzel, L.: Entwicklung eines Systems zur Beschleunigungsmessung an Regalbediengeräten auf Arduino Basis. Bachelorarbeit. Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2017.
- [Kol-2018] Kolls, G.: Analysis of the Movement Characteristics of a Double-Tine System. Semesterarbeit. Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2018.
- [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)
- [Lot-2016] Lottersberger, F.: Beitrag zu einer energieeffizienten Materialflusstechnik - Grundlagen zur Ermittlung, zum Vergleich und zur Steigerung der Energieeffizienz, Graz, 2016.
- [Mar-2009] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik – Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik ; mit 39 Tabellen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009.
- [Men-2011] Meneghetti, A.; Monti, L.: Energy Efficient Dual Command Cycles in Automated Storage and Retrieval Systems (2011)
- [Men-2013] 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.
- [Par-2017a] Parr, C.: Ermittlung von repräsentativen Fachanfahrten für den mittleren Energiebedarf eines Regalbediengerätes mit Hilfe von Simulationsreihen. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2017.
- [Par-2017b] Parr, C.: Ermittlung von repräsentativen Fachanfahrten für den mittleren Energiebedarf eines Regalbediengerätes mit Hilfe von Simulationsreihen. Bachelorarbeit. Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2017.
- [Pfe-1977] Pfeifer, H.: Grundlagen der Fördertechnik. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1977.

-
- [Pre-2018] Preis, S.: Analyse der Verlustleistung eines Regalbediengerätes mittels Thermografie. Semesterarbeit. Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2018.
- [Rie-2018] Rief, J.: Simulation des Energiebedarfs von Doppel-Lastaufnahmemitteln an Regalbediengeräten. Semesterarbeit. Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2018.
- [Roo-2009] Roodbergen, K. J.; Vis, I. F.A.: A survey of literature on automated storage and retrieval systems. In: European Journal of Operational Research, Jg. 194 (2009) Nr. 2, S. 343–362.
- [Rüc-2017] Rücker, A.; Fottner, J.: Energiebedarf und Nutzen – Bewertungsmethodik für die Klassifizierung von Regalbediengeräten. In: HF Hebezeuge und Fördermittel (2017) Nr. 4, S. 48–50.
- [Rüc-2018a] 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.
- [Rüc-2018b] Rücker, A.; Fottner, J.: Entwicklung einer mehrkomponentigen Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten. In: logistics journal proceedings (2018)
- [Rüc-2018c] Rücker, A.: Forschungsansatz zur Bestimmung der Energieeffizienz von Fördermitteln der Intralogistik. In: Landschützer, C.; Schedler, M. (Hrsg.): Energiebedarf und Effizienz in der Intralogistik, 2018, S. 237–266.
- [Rüc-2018d] Rücker, A.; Gauß, P.; Fottner, J.: Marktstudie Hochregallager. In: Materialfluss (2018) Nr. 6, S. 9–10.
- [Sch-2012a] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Der Einfluss kinematischer Parameter auf den Energiebedarf eines Regalbediengerätes. In: logistics journal (2012)
- [Sch-2012b] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Isoenergetic Shelves of Automatic Small Parts Warehouses. In: logistics journal (2012)
- [See-2018] Seek Thermal Inc: CompactPRO Website, Aufruf am 24.11.2018.
- [She-2017] Shen, Y.: Wirkungsgradbestimmung von Hub- und Fahrtrieb eines Regalbediengerätes durch Energiebedarfsmessungen. Semesterarbeit. Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2017.
- [Stö-2018] Stöhr, T.; Schadler, M. Hafner, N.: Energy efficiency benchmarking concept for diverse automated storage and retrieval systems. In: Conference: XXII International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics - MHCL 2017 (2018)

-
- [Stu-2014] Sturm, C.; Bruckmann, T.: Seilbasierter Roboter als Regalbediengerät – Prototyp im Test. In: HF Hebezeuge und Fördermittel, Jg. 54 (2014) Nr. 9
- [VDI-2690] Verband Deutscher Ingenieure: Material- und Datenfluß im Bereich von automatisierten Hochregallagern - Grundlagen. VDI Nr. 2690, 1994.
- [VDI-3561] Verband Deutscher Ingenieure: Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen. VDI Nr. 3561, 1973.
- [VDI-4707a] Verband Deutscher Ingenieure: Aufzüge - Energieeffizienz Blatt 1. VDI Nr. 4707, 2009.
- [VDI-4707b] Verband Deutscher Ingenieure: Aufzüge - Energieeffizienz von Komponenten Blatt 2. VDI Nr. 4707, 2013.
- [Wah-2014] Wahle, A.: Neuartiges Tragwerk für AKL-Bediengeräte – Spann den Bogen. In: HF Hebezeuge und Fördermittel, Jg. 54 (2014) Nr. 9
- [Xu-2014] Xu, X.; Shen, G.; Yu, Y.; Huang, W.: Travel time analysis for the double-deep dual-shuttle AS/RS. In: International journal of production research, Jg. 53 (2014) Nr. 3, S. 757–773.
- [Zad-2014] Zadek, H.; Schulz, R.; Monecke, J.: Eneff Lager - Energieeffiziente Lagerstrategien und Lastverteilung – Schlussbericht zum IGF Vorhaben. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2014.
- [Zha-2016] Zhakov, A.; Schmidt, T.; Dannemann, M.; Modler, N.: Einsatz faser- bzw. textilverstärkter Verbundwerkstoffe zur Schwingungsdämpfung bei Hubmasten von Regalbediengeräten, 2016.
- [Zha-2017] Zhakov, A.; Filippatos, A.; Schmidt, T.; Modler, N.: Hohe Dämpfung auch in großer Höhe – Einsatz von Faserverbundwerkstoffen für RBG-Hubmasten (2017) Nr. 10

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Umsetzungskreislauf für EE Maßnahmen [Rüc-2018b]	1
Abbildung 1-2: Arbeitspakete des Forschungsprojekts	4
Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines HRL [Atz-2016, S. 9]	6
Abbildung 2-2: Schematischer Aufbau eines RBG (vgl. [Rüc-2018a; Rüc-2018b])	8
Abbildung 2-3: Bauformvariation von automatischen HRL mit RBG (vgl. [Boy-2016; Rüc-2017])	9
Abbildung 3-1: Einflussfelder auf den Energiebedarf (vgl. [Rüc-2018b])	13
Abbildung 3-2: Ebenen innerhalb eines Lagersystems (vgl. [Rüc-2018c] und [Lot-2016, S. 42])	14
Abbildung 3-3: Wärmebildkamera Seek Thermal CompactPro [Pre-2018, S. 20]	21
Abbildung 3-4: Thermografieaufnahme des Hubwerk-Getriebes [Pre-2018, S. 43]	21
Abbildung 3-5: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Fahrtriebs [Pre-2018, S. 37]	22
Abbildung 3-6: Zeit-Temperatur-Diagramm: Fahrtrieb x-Richtung [Pre-2018, S. 39]	23
Abbildung 3-7: Thermografieaufnahme der Führungsrolle des Fahrwerks [Pre-2018, S. 42]	24
Abbildung 3-8: Thermografieaufnahme einer Führungsrolle des Hubschlittens [Pre-2018, S. 48]	24
Abbildung 4-1: Bewertungsszenario 1: Projektspezifische Bewertung	29
Abbildung 4-2: Bewertungsszenario 2: Referenzzyklus	30
Abbildung 4-3: Bewertungsszenario 3: Messwoche	31
Abbildung 4-4: Bewertungsszenario 4: Allgemeiner Bewertungskatalog	32
Abbildung 4-5: Bewertungsszenario 5: Wirkungsgradkatalog	33
Abbildung 4-6: Bewertungsszenario 6: Referenzgerät	34
Abbildung 5-1: Exemplarisches Einzel-, Doppel- und Vierfachspiel [Rüc-2018b]	35
Abbildung 5-2: Ablauf der Simulationsstudie	37
Abbildung 5-3: Aktivitätsdiagramm des Simulationsprogramms [Rie-2018, S. 34]	38

Abbildung 5-4: Exemplarisches Ergebnis für eine Einzelspielsimulation (vgl. [Rie-2018])	42
Abbildung 5-5: Zusammenfassung der Ergebnisse für Einzelspiele bei AKL	42
Abbildung 5-6: Zusammenfassung der Ergebnisse für Doppelspiele bei AKL	43
Abbildung 5-7: Referenzfachanfahrt für ein Einzelspiel im AKL	45
Abbildung 5-8: Referenzfachanfahrten für ein Doppelspiel im AKL	46
Abbildung 5-9: Referenzfachanfahrten für ein Vierfachspiel im AKL (vgl. [Rie-2018, S. 69])	47
Abbildung 5-10: Referenzfachanfahrt für ein Einzelspiel im APL	48
Abbildung 5-11: Referenzfachanfahrten für ein Doppelspiel im APL	49
Abbildung 6-1: Schema der Leistungselektronik eines RBG [Rüc-2018a]	51
Abbildung 6-2: Verbraucher an einem RBG [Rüc-2018b]	52
Abbildung 6-3: Fluke 1735 Messgerät im stationären Schaltschrank	53
Abbildung 6-4: Einsatz des Beschleunigungssensors (vgl. [Kar-2017])	55
Abbildung 6-5: Verlauf der kinematischen Parameter bei einer Normalfahrt [Rüc-2018a]	56
Abbildung 6-6: Verlauf der Beschleunigung bei unterschiedlichen Ruckverhältnissen	57
Abbildung 6-7: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Kinematik des Fahrtriebs von RBG-3	58
Abbildung 6-8: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Kinematik des Hubtriebs von RBG-3	58
Abbildung 6-9: Mast und LAM des RBG-1 in der Versuchshalle des fml	60
Abbildung 6-10: Hubschlitten und LAM mit HRL des RBG-2 im Hintergrund	61
Abbildung 6-11: Mittlere Leistungsaufnahme und Warmlaufverhalten des RBG-1 bei Dauerbetrieb des Fahrtriebs (vgl. [Rüc-2018a])	64
Abbildung 6-12: Mittlere Leistungsaufnahme und Warmlaufverhalten des RBG-1 bei Dauerbetrieb des Hubtriebs	64
Abbildung 6-13: Bewegung des Fahrtriebs von RBG1 in der Versuchshalle (vergleiche [Rüc-2018a])	65
Abbildung 6-14: Bewegung des Hubtriebs von RBG1 in der Versuchshalle (vergleiche [Rüc-2018a])	66
Abbildung 6-15: Leistungsaufnahme des Fahrtriebs von RBG-1 bei einer Messreihe (vgl. [Rüc-2018a])	67
Abbildung 6-16: Energiebedarf der einzelnen Fahrten von RBG-1 bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten	68

Abbildung 6-17: Mittlerer Energiebedarf und Standardabweichung über Fahrgeschwindigkeit bei RBG-1	69
Abbildung 6-18: Energiebedarf des Fahrtriebs von RBG-1 ohne Grundlast [Rüc-2018a]	70
Abbildung 6-19: Energiebedarf des Hubtriebs ohne Grundlast [Rüc-2018a]	71
Abbildung 6-20: Einfluss der Beschleunigung auf den Energiebedarf des Fahrtriebs	72
Abbildung 6-21: Energiebedarf für einen Lastwechsel des LAM von RBG-1 [Rüc-2018b]	73
Abbildung 6-22: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Beschleunigung des Fahrtriebs von RBG-1	74
Abbildung 6-23: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Beschleunigung des Hubtriebs von RBG-1	75
Abbildung 6-24: Energiebedarf des Fahrtriebs von RBG-2 bei den Bewegungen F1 und F2	77
Abbildung 6-25: Energiebedarf des Hubtriebs von RBG-2 bei den Bewegungen H1 und H2	78
Abbildung 6-26: Zusammenstellung des Energiebedarfs der Bewegungen von RBG-2 in Kartendarstellung	78
Abbildung 6-27: Energiebedarf der Lastwechsel des LAM von RBG-2	79
Abbildung 6-28: Ergebnisse einer Langzeitmessung an RBG-2 [Rüc-2018b]	81
Abbildung 6-29: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Beschleunigung des Fahrwerks von RBG-2	82
Abbildung 6-30: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Geschwindigkeit des Fahrwerks von RBG-2	83
Abbildung 6-31: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Beschleunigung des Hubwerks von RBG-2	84
Abbildung 6-32: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Geschwindigkeit des Hubwerks von RBG-2	84
Abbildung 6-33: Leistungsaufnahme des RBG-3 während des Messintervalls 1	86
Abbildung 6-34: Energiebedarf von RBG-3 während der Messfahrten ohne Grundlast in Kartendarstellung	87
Abbildung 6-35: Leistungsaufnahme des RGB-3 während des Messintervalls 2	88
Abbildung 6-36: Leistungsaufnahme des RGB-3 während des Messintervalls 3	89
Abbildung 6-37: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Beschleunigung des Fahrtriebs von RBG-3	90
Abbildung 6-38: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Geschwindigkeit des Fahrtriebs von RBG-3	91

Abbildung 6-39: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Beschleunigung des Hubantriebs von RBG-3	91
Abbildung 6-40: Vergleich von Simulations- und Messdaten der Geschwindigkeit des Fahrantriebs von RBG-3	92
Abbildung 6-41: Leistungsaufnahme des RBG-4 während des Messintervalls 1	93
Abbildung 7-1: Fahrstrecken zur Bewertung eines RBG [Rüc-2018b]	97
Abbildung 7-2: Wirkungsgradkennfeld des Fahrantriebs von RBG-1 [Rüc-2018a]	99
Abbildung 7-3: Wirkungsgradkennfeld des Hubantriebs von RBG-1 [Rüc-2018a]	100
Abbildung 7-4: Wirkungsgrade des RBG-2 in Kartendarstellung (vgl. [Rüc-2018a])	102
Abbildung 7-5: Wirkungsgrade des RBG-3 in Kartendarstellung	103
Abbildung 7-6: Transportwirkungsgrad des Fahrantriebs von RBG-1 [Rüc-2018a]	104
Abbildung 7-7: Transportwirkungsgradkennfeld des Hubantriebs von RBG-1 [Rüc-2018a]	105
Abbildung 7-8: Transportwirkungsgrad des RBG-2 in Kartendarstellung (vgl. [Rüc-2018a])	106
Abbildung 7-9: Darstellung der ausgewerteten Einzelkennzahlen von RBG-1, RBG-2 und RBG-3 [Rüc-2018b]	110
Abbildung 7-10: Zusammenstellung der Effizienzkenzahl für den Einzelspielbetrieb der simulierten AKL Konfigurationen [Rie-2018]	112
Abbildung 7-11: Zusammenstellung der Effizienzkenzahl für den Doppelspielbetrieb der simulierten AKL Konfigurationen [Rie-2018]	113
Abbildung 7-12: Zusammenstellung der Effizienzkenzahl für den Vierfachspielbetrieb der simulierten AKL Konfigurationen [Rie-2018]	114
Abbildung 7-13: Zusammenstellung der Effizienzkenzahl für den Einzelspielbetrieb der simulierten APL Konfigurationen [Rie-2018]	115
Abbildung 7-14: Zusammenstellung der Effizienzkenzahl für den Doppelspielbetrieb der simulierten APL Konfigurationen [Rie-2018]	115
Abbildung 8-1: Hauptstruktur des Berechnungsblattes im Tool	118
Abbildung 8-2: Eingabesektion 1 - Lager/RBG Kennwerte	118

Abbildung 8-3: Nomenklatur und Aufbau eines RBG im Tool (vgl. [Rüc-2018a; Rüc-2018b])	119
Abbildung 8-4: Eingabesektion 2 - Fahrzeiten und Fahrstrecken	119
Abbildung 8-5: Fahrstrecken der Messfahrten im Tool [Rüc-2018b]	119
Abbildung 8-6: Eingabesektion 3 - gemessener oder simulierter Energiebedarf	120
Abbildung 8-7: Eingabesektion 4 – mittlerer Energieverbrauch Lastwechsel	120
Abbildung 8-8: Eingabesektion 5 - Mittlere Grundlast	120
Abbildung 8-9: Grundlastverbraucher am RBG [Rüc-2018b]	121
Abbildung 8-10: Eingabesektion 6 - gesamte Energieeffizienz während der Fahrphase	121
Abbildung 8-11: Darstellung des Referenzdoppelspiels für AKL	122
Abbildung 8-12: Ergebnisberechnung im Tool	122
Abbildung 8-13: Darstellung der Einzelkennzahlen im Tool	123
Abbildung A-1: Ishikawa Diagramm der Einflussfaktoren auf den Energiebedarf (vgl. [Rüc-2018c])	A-1
Abbildung D-1: Detailliertes Ergebnis für eine Einzelspielsimulation (vgl. [Rie-2018])	D-6
Abbildung D-2: Detailliertes Ergebnis für eine Doppelspielsimulation bei AKL (vgl. [Rie-2018])	D-6
Abbildung F-1: Mittlere Leistungsaufnahme des RBG-4 während des Messintervalls 1	F-14
Abbildung F-2: Mittlere Leistungsaufnahme des RBG-4 während des Messintervalls 2	F-14
Abbildung F-3: Mittlere Leistungsaufnahme des RBG-4 während des Messintervalls 3	F-15

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Ermittelte Anforderungen an ein Bewertungsszenario	27
Tabelle 5-1:	Variierte Parameter im AKL (vgl. [Rie-2018, S. 39])	40
Tabelle 5-2:	Zusammensetzung der betrachteten AKL Regalwandfaktoren (nach [Par-2017a, S. 33], [Rie-2018, S. 38])	40
Tabelle 5-3:	Ausgewählte Parameter bei der Simulation der APL	40
Tabelle 5-4:	Mittlere Anzahl der transportierten Ladeeinheiten in Abhängigkeit von der LAM-Kapazität, dem Spieltyp und des HRL Typs	44
Tabelle 6-1:	Untersuchte Regalbediengeräte	59
Tabelle 6-2:	Zuladungen und Antriebsgeschwindigkeiten für die Messreihen an RBG-1 (vergleiche [Rüc-2018a])	63
Tabelle 6-3:	Kinematische Parameter des RBG-1	75
Tabelle 6-4:	Gemessene Fahrbewegungen des RBG-2	76
Tabelle 6-5:	Ergebnisse der Energiebedarfsmessung mit Nutzlast des RBG-2	79
Tabelle 6-6:	Ergebnisse der Energiebedarfsmessung des LAM von RBG-2	80
Tabelle 6-7:	Kinematische Parameter des RBG-2	85
Tabelle 6-8:	Ergebnisse der Energiebedarfsmessung ohne Nutzlast und ohne Grundlast des RBG-3	87
Tabelle 6-9:	Zusammenfassung der Ergebnisse von Messintervall 2 und 3	89
Tabelle 6-10:	Kinematische Parameter des RBG-3	92
Tabelle 6-11:	Zusammenfassung der Ergebnisse von RBG-4 im Messintervall 1, 2 und 3	94
Tabelle 7-1:	Ergebnisse der Wirkungsgradermittlung von RBG-2	102
Tabelle 7-2:	Ergebnisse der Wirkungsgradermittlung von RBG-3	103
Tabelle 7-3:	Ergebnisse der Transportwirkungsgradermittlung von RBG-2	106
Tabelle 7-4:	Grundlast und Grundlastfaktoren für RBG-1, 2, 3 und 4	109
Tabelle 7-5:	Ausgewertete Einzelkennzahlen für RBG-1, 2 und 3	110
Tabelle B-1:	Ausgewählte Parameter bei der Simulation der AKL [Rie-2018, S. 37]	B-2
Tabelle B-2:	Ausgewählte Parameter bei der Simulation der APL	B-3
Zusammenstellung der Einflussfaktoren		

Anhang A Zusammenstellung der Einflussfaktoren

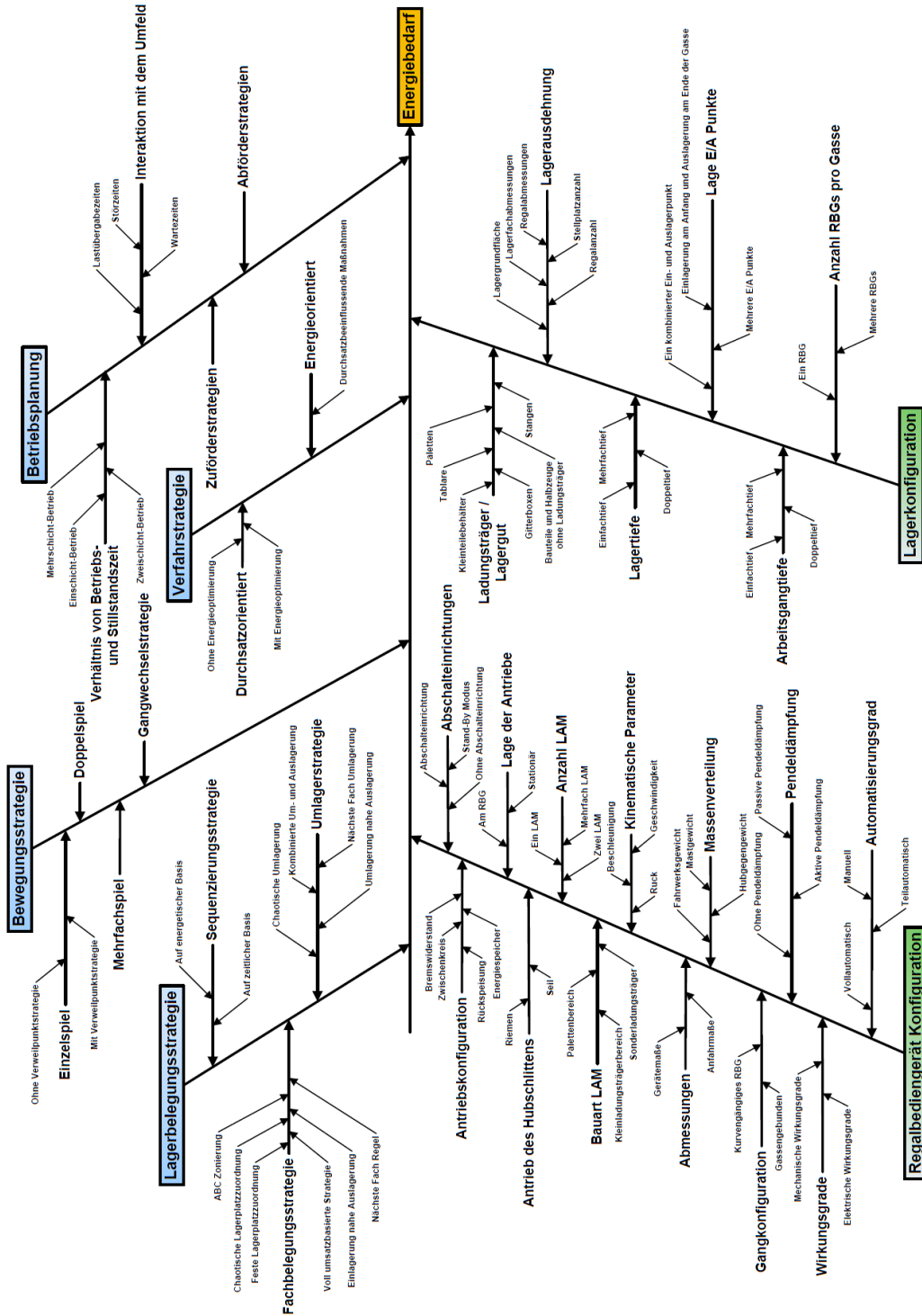


Abbildung A-1: Ishikawa Diagramm der Einflussfaktoren auf den Energiebedarf (vgl. [Rüc-2018c])

Anhang B Parameter des Simulationsmodells

In Tabelle B-1 sind die Parameter des Simulationsmodells für die simulierten AKL Konfigurationen dargestellt.

Tabelle B-1: *Ausgewählte Parameter bei der Simulation der AKL [Rie-2018, S. 37]*

Parameter	Wert	Einheit
Abstand der Regalspalten	0,57	m
Abstand der Regalebenen	0,50	m
Füllungsgrad des Regals	0,75	–
Masse einer LE	50	kg
Masse des Fahrwagens	1600	kg
Längenbezogene Masse des Mastes	44	kg/m
Masse des Hubschlittens	300	kg
Masse eines LAM	100	kg
Maximale Beschleunigung des Fahrwerks	3	m/s ²
Mittlere Beschleunigung des Fahrwerks	1,5	m/s ²
Maximale Beschleunigung des Hubwerks	3	m/s ²
Mittlere Beschleunigung des Hubwerks	1,5	m/s ²
Wirkungsgrad des Fahrwerks	0,60	–
Wirkungsgrad des Hubwerks	0,70	–
Wirkungsgrad des Zwischenkreises	0,90	–
Wirkungsgrad der Rückspeiseeinheit	0,80	–
Grundleistung des RBG	650	W
Grundleistung der Rückspeiseeinheit	200	W
Leistungsbedarf eines LAM	900	W

In Tabelle B-2 sind die Parameter des Simulationsmodells für die simulierten AKL Konfigurationen dargestellt.

Tabelle B-2: Ausgewählte Parameter bei der Simulation der APL

Parameter	Wert	Einheit
Abstand der Regalspalten	1,05	m
Abstand der Regalebenen	1,83	m
Füllungsgrad des Regals	0,75	–
Masse einer LE	1000	kg
Masse des Fahrwagens	3000	kg
Längenbezogene Masse des Mastes	400	kg/m
Masse des Hubschlittens	2200	kg
Masse eines LAM	500	kg
Maximale Beschleunigung des Fahrwerks	1	m/s ²
Mittlere Beschleunigung des Fahrwerks	0,5	m/s ²
Maximale Beschleunigung des Hubwerks	1	m/s ²
Mittlere Beschleunigung des Hubwerks	0,5	m/s ²
Wirkungsgrad des Fahrwerks	0,60	–
Wirkungsgrad des Hubwerks	0,75	–
Wirkungsgrad des Zwischenkreises	0,90	–
Wirkungsgrad der Rückspeiseeinheit	0,80	–
Grundleistung des RBG	600	W
Grundleistung der Rückspeiseeinheit	200	W
Leistungsbedarf eines LAM	1500	W

Anhang C Annahmen des Simulationsmodells

Die getroffenen Annahmen für die Simulation lauten nach [Rie-2018, S. 35f.] wie folgt:

- Fokus der Simulation ist eine Regalgasse, in der sich genau ein RBG befindet. Die Lagervorzone wird nicht betrachtet. (vgl. [Bra-2016, S. 133])
- Alle Lagerplätze haben identische technische Eigenschaften (vgl. [Bra-2016, S. 133]).
- Alle LE haben identische technische Eigenschaften.
- Die Belegungsstrategie des betrachteten Systems ist eine freie Lagerplatzanordnung mit gleichverteilter Zonierung.
- Die in jedem Spiel anzufahrenden Punkte werden von außen vorgegeben. Eine zyklenübergreifende Optimierung der Anfahrtspunkte findet nicht statt.
- Die Übergabepunkte der beiden LAM liegen in (1,1) und (2,1). Das LAM führt jeweils eine vollständige Bewegung zur Abgabe der auszulagernden LE und zur Übernahme der einzulagernden LE aus.
- Die LAM sind horizontal im Abstand zweier benachbarter Lagerkanäle angeordnet.
- Zu Beginn der Beobachtung befindet sich das RBG am Übergabepunkt.
- Eine Wartezeit aufgrund von Staus von LE am Übergabepunkt tritt nicht auf [Bra-2016, S. 133].
- Das Fahrwerk und die Hubeinrichtung des RBG verfahren in einer 3-Phasen-Bewegung.
- Die LAM können erst dann agieren, wenn Fahrwerk und Hubeinrichtung stillstehen (vgl. [Bra-2016, S. 133]).
- Der Energiebedarf eines RBG ist allein von der zwischen Start- und Zielpunkt zurückgelegten Strecke abhängig. Die Position von Start- oder Zielpunkt haben keinen Einfluss auf den Energiebedarf. Ein „Heben nach Senken“ wie bspw. bei *Ertl* beschrieben findet nicht statt [Ert-2016, S. 66ff.]. Im Regal sind daher maximal $(N_{Col} + 1)$ unterschiedliche Horizontal- und $(2 \cdot N_{Lev} - 1)$ unterschiedliche Vertikalfahrten möglich.
- Die effektive Beschleunigung des RBG in x- und y-Richtung beträgt jeweils 50 % der möglichen Maximalbeschleunigung. Dieser Wert wurde vom Betreuer in mehreren Messungen ermittelt und verifiziert.

-
- Bei der Berechnung der Beschleunigungsleistung werden die Trägheitsmomente rotierender Bauteile vernachlässigt.
 - Alle angesetzten Wirkungsgrade werden als konstant und lastunabhängig angenommen (vgl. [Bra-2016, S. 133]).
 - Der Leistungsbedarf von Sensoren, Steuerungen, Umrichtern und sonstigen Verbrauchern wird über eine Grundlast berücksichtigt.
 - Der Energiebedarf der LAM wird mit einer Pauschalleistung berücksichtigt [Par-2017].
 - Bei Horizontalbewegungen wird der Fahrwiderstand nach *Fottner* betrachtet. Luftreibung wird nicht betrachtet. Die Hubeinrichtung verfährt reibungsfrei.
 - Einfluss von Verschleiß und Temperatur werden nicht untersucht [Bra-2016, S. 133].

Anhang D Simulationsergebnisse

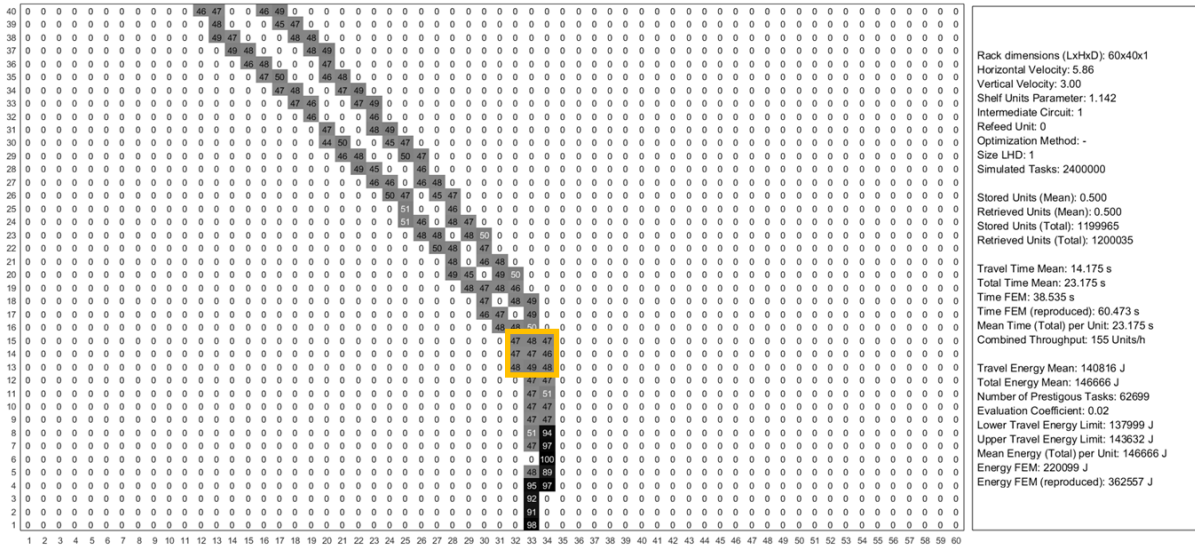


Abbildung D-1: Detailliertes Ergebnis für eine Einzelspielsimulation (vgl. [Rie-2018])

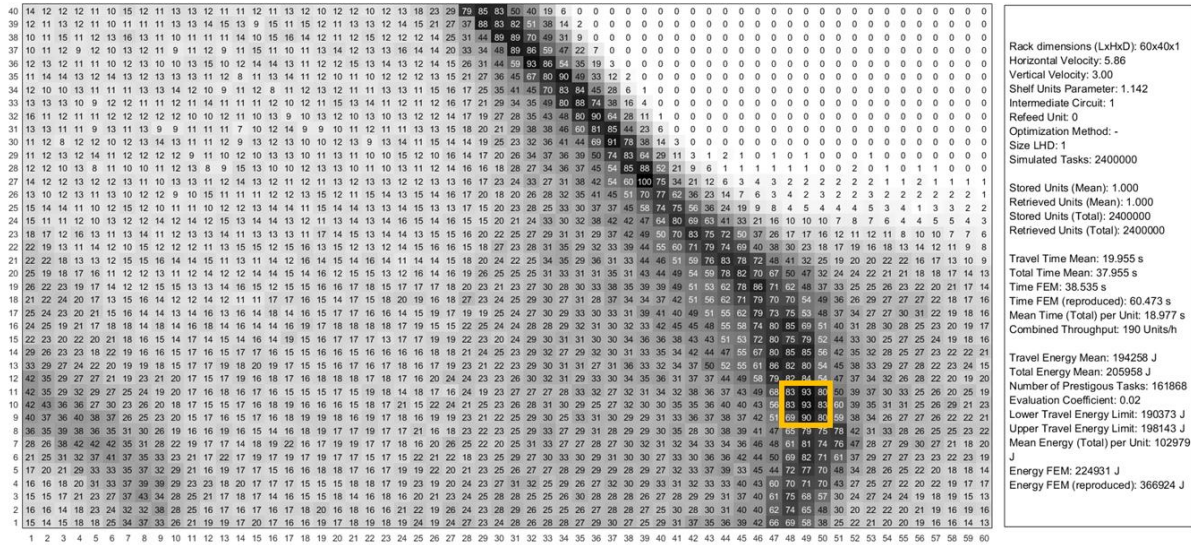


Abbildung D-2: Detailliertes Ergebnis für eine Doppelspielsimulation bei AKL (vgl. [Rie-2018])

Anhang E Kalibrierdokumente Fluke 1735



Kalibrierschein

Datentyp: FOUND-LEFT

Kalibrierschein Nr:1895449

Instrument	Gegenstand	POWER LOGGER - ANALYST
	Hersteller	FLUKE
	Modell	FLUKE-1735
	Seriennummer	S094300516B6
	Inventarnummer	-
Auftraggeber	Name	LEHRSTUHL FML
	Ort	GARCHING
	Site Nummer	6059832
Auftragsnummer	RMA Nummer	613107777
Umgebungsbedingungen	Temperatur	(23 ± 1.0) °C
	Luftfeuchte	(50 ± 10) %rh
Kalibrierprozedur	Fluke_1735_Cal_ISO17025 (4.1)	
Kalibrierergebnis	Zum Zeitpunkt der Kalibrierung erfüllte der Prüfling die angegebenen Herstellerspezifikationen, sofern nichts anders vermerkt. Die Messergebnisse finden Sie auf den Seiten 4 bis 7.	
Datum der Kalibrierung	17 Jul 2017	Ausgabedatum: 17 Jul 2017
Nächste Kalibrierung	17 Jul 2019	
Ort der Kalibrierung	Cologne	
Techniker	T. Klosa	M. Bremmers Leiter des Kalibrierlaboratoriums

Die Kalibrierung wurde durch ein ISO 9001:2008 zertifiziertes Labor durchgeführt und entspricht den Erfordernissen der ISO-17025. Es wurde gegen Normale kalibriert, deren Genauigkeit auf nationale oder internationale Normale rückführbar ist oder durch Ableitung aus Kalibriertechniken erreicht wurde. Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.

Fluke Kalibrierlaboratorium

E-mail

Telefon

Rev 170622

Heinrich-Pesch-Straße 9-11, 50739 Köln

service.de@fluke.com

+49 69 2 2222 0210

Seite 1 von 7

Kalibrierschein

Datentyp: FOUND-LEFT

Kalibrierschein Nr:1895449

Konformitätsaussage

Die folgenden Seiten enthalten die Kalibrierergebnisse. Zwei zusätzliche Spalten weisen auf das Verhalten des Instruments in Bezug auf die Spezifikation hin.

Die Spalte mit der Überschrift „% of Tol“ enthält die prozentuale Ausnutzung der Fehlergrenzen ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit.

Die Spalte mit der Überschrift „Anmerkung“ enthält einen Indikator für die Einhaltung oder Nichteinhaltung der Spezifikation unter Berücksichtigung der Messunsicherheit. Es gibt fünf mögliche Indikatoren:

Anzeige Erklärung

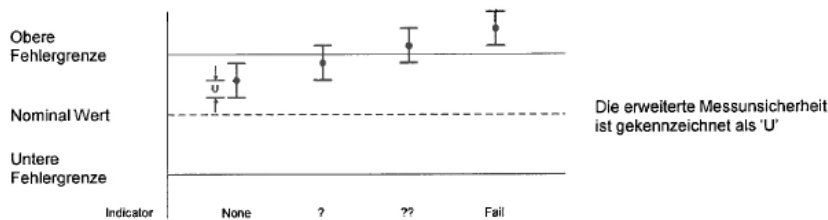
Leer, kein Zeichen Das Instrument hält die veröffentlichte Spezifikation, die geprüft wurde unter der Berücksichtigung der Messunsicherheit ein.

? Das Messergebnis ist innerhalb der Fehlergrenzen. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit kann keine Aussage über die Einhaltung der Spezifikation gemacht werden. Die Wahrscheinlichkeit der Einhaltung der Spezifikation ist größer als die Nichteinhaltung.

?? Das Messergebnis liegt außerhalb der Fehlergrenzen. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit kann keine Aussage über die Einhaltung der Spezifikation gemacht werden. Die Wahrscheinlichkeit der Einhaltung der Spezifikation ist kleiner als die Nichteinhaltung.

Fail Das Messergebnis ist größer als die Fehlergrenze. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit hält das Instrument die veröffentlichte Spezifikation nicht ein.

* Es ist nicht möglich eine Konformitätsaussage zu treffen.



Messunsicherheit

Die absolute Messunsicherheit basiert auf der Standardunsicherheit multipliziert mit dem Vertrauensfaktor $k=2$ (entspricht ca. 95%). Die Standardunsicherheit wurde gemäß EA-4/02 ermittelt.

Die in der Messwerttabelle aufgeführten Unsicherheitswerte enthalten alle Faktoren, die zur Unsicherheit der Messung beitragen, wie z.B. die Messwertauflösung und die Kurzzeitstabilität des zu kalibrierenden Gerätes.

Kalibrierschein

Datentyp: FOUND-LEFT

Kalibrierschein Nr:1895449

Anmerkungen

- Erläuterung des Datentyps:

As-Found : Kalibrierdaten aufgenommen vor Justage und / oder Instandsetzung des Prüflings
 As-Left : Kalibrierdaten aufgenommen nach Justage und / oder Instandsetzung des Prüflings
 Found-Left : Kalibrierdaten aufgenommen ohne dass Justage und / oder Instandsetzung durchgeführt wurde(n)

- Sollte der Prüfling unter extremen Umgebungsbedingungen eingesetzt werden, empfehlen wir das Kalibrierintervall zu verkürzen. Die Einhaltung einer entsprechenden Kalibrierfrist liegt in der Zuständigkeit des Anwenders;

- Sofern der Prüfling netzbetrieben ist, wurde eine Prüfung nach DGUV Vorschrift 3 (DIN VDE 0701/0702) durchgeführt.

Verwendete Normale und Messgeräte

Modell	Serien Nr	Inventar Nr	Kalibriert bis	Zertifikat Nr
5520A/1GHZ	8180003	SL00377	02 Jan 2018	1761520
5500A/COIL	20141015	SL00946	19 Sep 2017	057213

Kalibrierschein

Datentyp: FOUND-LEFT

Kalibrierschein Nr:1895449

Nominal Wert	Messbereich	Untere Fehlergrenze	Messwert	Obere Fehlergrenze	Einheit	% of Tol	Erweiterte Unsicherheit	Anmerkung	
IDENTIFICATION									
Serial Number : S094300516B6									
Firmware Level: V01.10_5370									
Wechselspannung / AC Voltage									
Konfiguration: Stern / Configuration: Wye									
L1									
50.00	V	50 Hz	400	49.4	49.8	50.6	V	33	5.8e-002 V
110.00	V	50 Hz	400	109.3	109.7	110.7	V	42	6.0e-002 V
220.00	V	50 Hz	400	219.1	219.5	220.9	V	53	6.7e-002 V
380.00	V	50 Hz	400	378.7	379.3	381.3	V	56	1.1e-001 V
L2									
50.00	V	50 Hz	400	49.4	49.8	50.6	V	33	5.8e-002 V
110.00	V	50 Hz	400	109.3	109.8	110.7	V	28	6.0e-002 V
220.00	V	50 Hz	400	219.1	219.6	220.9	V	43	6.7e-002 V
380.00	V	50 Hz	400	378.7	379.4	381.3	V	48	1.1e-001 V
L3									
50.00	V	50 Hz	400	49.4	49.8	50.6	V	33	5.8e-002 V
110.00	V	50 Hz	400	109.3	109.7	110.7	V	42	6.0e-002 V
220.00	V	50 Hz	400	219.1	219.5	220.9	V	53	6.7e-002 V
380.00	V	50 Hz	400	378.7	379.2	381.3	V	64	1.1e-001 V
Konfiguration: Dreieck / Configuration: Delta									
L1-L2									
630.00	V	50 Hz	690	628.2	628.8	631.8	V	68	1.6e-001 V
L2-L3									
630.00	V	50 Hz	690	628.2	629.0	631.8	V	57	1.6e-001 V
L3-L1									
630.00	V	50 Hz	690	628.2	628.9	631.8	V	63	1.6e-001 V
Frequenz / Frequency									
50.000	Hz	230	V	54	49.85	50.00	Hz	0	5.8e-003 Hz
60.000	Hz	230	V	64	59.83	59.99	Hz	6	5.8e-003 Hz
Wechselstrom / AC Current									
Messungen bei 50Hz / Measured by 50Hz									
Modell: FlexiCT, 4PH; SN: X075037E									
Model: FlexiCT, 4PH; SN: X075037E									
10.000	A	L1	15	9.70	10.11	10.30	A	36	6.7e-002 A
10.000	A	L2	15	9.70	10.15	10.30	A	50	6.7e-002 A
10.000	A	L3	15	9.70	10.05	10.30	A	17	6.7e-002 A
10.000	A	N	15	9.70	10.12	10.30	A	40	6.7e-002 A
Wechselstrom / AC Current									
Messungen bei 50Hz / Measured by 50Hz									
Modell: FlexiCT, 4PH; SN: X075037E									
Model: FlexiCT, 4PH; SN: X075037E									
10.000	A	L1	15	9.70	10.11	10.30	A	36	6.7e-002 A
10.000	A	L2	15	9.70	10.14	10.30	A	46	6.7e-002 A
10.000	A	L3	15	9.70	10.04	10.30	A	13	6.7e-002 A

Datum der Kalibrierung: 17 Jul 2017

Seite 4 von 7

Kalibrierschein

Datentyp: FOUND-LEFT

Kalibrierschein Nr:1895449

Nominal Wert		Messbereich		Untere Fehlergrenze	Messwert	Obere Fehlergrenze	Einheit	% of Tol	Erweiterte Unsicherheit	Anmerkung
10.000	A	N	15	9.70	10.11	10.30	A	36	6.7e-002 A	
15.000	A	L1	15	14.60	15.17	15.40	A	42	8.9e-002 A	
15.000	A	L2	15	14.60	15.22	15.40	A	54	8.9e-002 A	
15.000	A	L3	15	14.60	15.07	15.40	A	17	8.9e-002 A	
15.000	A	N	15	14.60	15.18	15.40	A	45	8.9e-002 A	
37.50	A	L1	150	35.7	37.9	39.3	A	23	3.7e-001 A	
37.50	A	L2	150	35.7	38.0	39.3	A	28	3.7e-001 A	
37.50	A	L3	150	35.7	37.6	39.3	A	6	3.7e-001 A	
37.50	A	N	150	35.7	37.9	39.3	A	23	3.7e-001 A	
75.00	A	L1	150	72.5	75.9	77.5	A	36	5.3e-001 A	
75.00	A	L2	150	72.5	76.1	77.5	A	44	5.3e-001 A	
75.00	A	L3	150	72.5	75.3	77.5	A	12	5.3e-001 A	
75.00	A	N	150	72.5	76.0	77.5	A	40	5.3e-001 A	
150.00	A	L1	150	146.0	151.8	154.0	A	45	1.4e+000 A	
150.00	A	L2	150	146.0	152.3	154.0	A	57	1.4e+000 A	
150.00	A	L3	150	146.0	150.8	154.0	A	20	1.4e+000 A	
150.00	A	N	150	146.0	152.0	154.0	A	50	1.4e+000 A	
0.5000	kA	L1	3	0.480	0.505	0.520	kA	23	3.0e+000 A	
0.5000	kA	L2	3	0.480	0.506	0.520	kA	31	3.0e+000 A	
0.5000	kA	L3	3	0.480	0.501	0.520	kA	5	3.0e+000 A	
0.5000	kA	N	3	0.480	0.506	0.520	kA	30	3.0e+000 A	
1.0000	kA	L1	3	0.970	1.009	1.030	kA	31	5.2e+000 A	
1.0000	kA	L2	3	0.970	1.013	1.030	kA	43	5.2e+000 A	
1.0000	kA	L3	3	0.970	1.003	1.030	kA	9	5.2e+000 A	
1.0000	kA	N	3	0.970	1.013	1.030	kA	42	5.2e+000 A	
Wirkleistung										
Active Power										
Gemessen bei 230V/50Hz, 3kW, PF 1										
Measured by 230V/50Hz, 3kW, PF 1										
3.0000	kW	L1	3.45	2.919	3.012	3.081	kW	15	2.4e+001 W	
3.0000	kW	L2	3.45	2.918	3.025	3.082	kW	31	2.4e+001 W	
3.0000	kW	L3	3.45	2.919	2.995	3.081	kW	6	2.4e+001 W	
Messspannung 230V/50Hz, 30kW, PF 1										
Measured by 230V/50Hz, 30kW, PF 1										
30.000	kW	L1	34.5	29.18	30.30	30.82	kW	37	2.3e+002 W	
30.000	kW	L2	34.5	29.18	30.40	30.82	kW	49	2.3e+002 W	
30.000	kW	L3	34.5	29.19	30.09	30.81	kW	11	2.3e+002 W	
Gemessen bei 230V/50Hz, 200kW, PF 1										
Measured by 230V/50Hz, 200kW, PF 1										
200.00	kW	L1	690	194.1	201.1	205.9	kW	19	1.4e+003 W	
200.00	kW	L2	690	194.1	202.2	205.9	kW	37	1.4e+003 W	
200.00	kW	L3	690	194.1	200.1	205.9	kW	2	1.4e+003 W	
Gemessen bei 230V/50Hz, 3kW, PF 0.5										
Measured by 230V/50Hz, 3kW, PF 0.5										
1.5000	kW	L1	3.45	1.452	1.515	1.548	kW	31	1.3e+001 W	
1.5000	kW	L2	3.45	1.451	1.525	1.549	kW	52	1.3e+001 W	
1.5000	kW	L3	3.45	1.452	1.507	1.548	kW	15	1.3e+001 W	

Kalibrierschein

Datentyp: FOUND-LEFT

Kalibrierschein Nr:1895449

Nominal Wert	Messbereich		Untere Fehlergrenze	Messwert	Obere Fehlergrenze	Einheit	% of Tol	Erweiterte Unsicherheit	Anmerkung	
Gemessen bei 230V/50Hz, 30kW, PF 0,5										
Measured by 230V/50Hz, 30kW, PF 0.5										
15.000	kW	L1	34.5	14.51	15.28	15.49	kW	58	1.2e+002 W	
15.000	kW	L2	34.5	14.51	15.38	15.49	kW	78	1.2e+002 W ?	
15.000	kW	L3	34.5	14.52	15.20	15.48	kW	41	1.2e+002 W	
Gemessen bei 230V/50Hz, 200kW, PF 0,5										
Measured by 230V/50Hz, 200kW, PF 0.5										
100.00	kW	L1	690	96.3	101.9	103.7	kW	51	7.4e+002 W	
100.00	kW	L2	690	96.2	102.6	103.8	kW	69	7.4e+002 W	
100.00	kW	L3	690	96.3	101.3	103.7	kW	35	7.4e+002 W	
Leistungsfaktor										
Power Factor										
Gemessen bei 230V/50Hz, 10kW Kapazitiv										
Measured by 230V/50Hz, 10kW capacitive										
0.9000		L1	1	0.890	0.902	0.910		20	8.3e-004	
0.9000		L2	1	0.890	0.903	0.910		30	8.3e-004	
0.9000		L3	1	0.890	0.902	0.910		20	8.3e-004	
0.6000		L1	1	0.590	0.603	0.610		30	1.2e-003	
0.6000		L2	1	0.590	0.605	0.610		50	1.2e-003	
0.6000		L3	1	0.590	0.604	0.610		40	1.2e-003	
0.3000		L1	1	0.290	0.305	0.310		50	1.4e-003	
0.3000		L2	1	0.290	0.305	0.310		50	1.4e-003	
0.3000		L3	1	0.290	0.306	0.310		60	1.4e-003	
Gemessen bei 230V/50Hz, 10kW Induktiv										
Measured by 230V/50Hz, 10kW inductive										
0.9000		L1	1	0.890	0.898	0.910		20	8.3e-004	
0.9000		L2	1	0.890	0.897	0.910		30	8.3e-004	
0.9000		L3	1	0.890	0.898	0.910		20	8.3e-004	
0.6000		L1	1	0.590	0.595	0.610		50	1.2e-003	
0.6000		L2	1	0.590	0.594	0.610		60	1.2e-003	
0.6000		L3	1	0.590	0.595	0.610		50	1.2e-003	
0.3000		L1	1	0.290	0.294	0.310		60	1.4e-003	
0.3000		L2	1	0.290	0.293	0.310		70	1.4e-003	
0.3000		L3	1	0.290	0.293	0.310		70	1.4e-003	
Modell: CCP, 5A/50A Clamp PQ4; SN: E479036A										
Model: CCP, 5A/50A Clamp PQ4; SN: E479036A										
1.0000	A	50	Hz	5	0.980	1.001	1.020	A	5	1.0e-002 A
1.0000	A	50	Hz	5	0.980	1.001	1.020	A	5	1.0e-002 A
1.0000	A	50	Hz	5	0.980	1.000	1.020	A	0	1.0e-002 A
1.0000	A	50	Hz	5	0.980	1.000	1.020	A	0	1.0e-002 A
3.0000	A	50	Hz	5	2.960	3.011	3.040	A	27	3.0e-002 A ?
3.0000	A	50	Hz	5	2.960	3.006	3.040	A	15	3.0e-002 A
3.0000	A	50	Hz	5	2.960	3.003	3.040	A	7	3.0e-002 A
3.0000	A	50	Hz	5	2.960	3.009	3.040	A	22	3.0e-002 A
5.0000	A	50	Hz	5	4.940	5.021	5.060	A	35	5.0e-002 A ?
5.0000	A	50	Hz	5	4.940	5.012	5.060	A	20	5.0e-002 A ?
5.0000	A	50	Hz	5	4.940	5.006	5.060	A	10	5.0e-002 A
5.0000	A	50	Hz	5	4.940	5.015	5.060	A	25	5.0e-002 A ?
10.0000	A	50	Hz	50	9.80	10.02	10.20	A	10	1.0e-001 A
10.0000	A	50	Hz	50	9.80	10.00	10.20	A	0	1.0e-001 A
10.0000	A	50	Hz	50	9.80	9.99	10.20	A	5	1.0e-001 A
10.0000	A	50	Hz	50	9.80	10.00	10.20	A	0	1.0e-001 A
30.0000	A	50	Hz	50	29.60	30.10	30.40	A	25	3.0e-001 A
30.0000	A	50	Hz	50	29.60	30.03	30.40	A	7	3.0e-001 A
30.0000	A	50	Hz	50	29.60	30.00	30.40	A	0	3.0e-001 A

Kalibrierschein

Datentyp: FOUND-LEFT

Kalibrierschein Nr:1895449

Nominal Wert		Messbereich			Untere Fehlergrenze	Messwert	Obere Fehlergrenze	Einheit	% of Tol	Erweiterte Unsicherheit	Anmerkung
30.000	A	50	Hz	50	29.60	30.05	30.40	A	13	3.0e-001 A	
50.000	A	50	Hz	50	49.40	50.16	50.60	A	27	5.0e-001 A	?
50.000	A	50	Hz	50	49.40	50.08	50.60	A	13	5.0e-001 A	
50.000	A	50	Hz	50	49.40	50.01	50.60	A	2	5.0e-001 A	
50.000	A	50	Hz	50	49.40	50.03	50.60	A	5	5.0e-001 A	

Anhang F Messergebnisse RBG-3

In diesem Kapitel sind die gemittelten Leistungskurven der Messungen an RBG-3 enthalten.

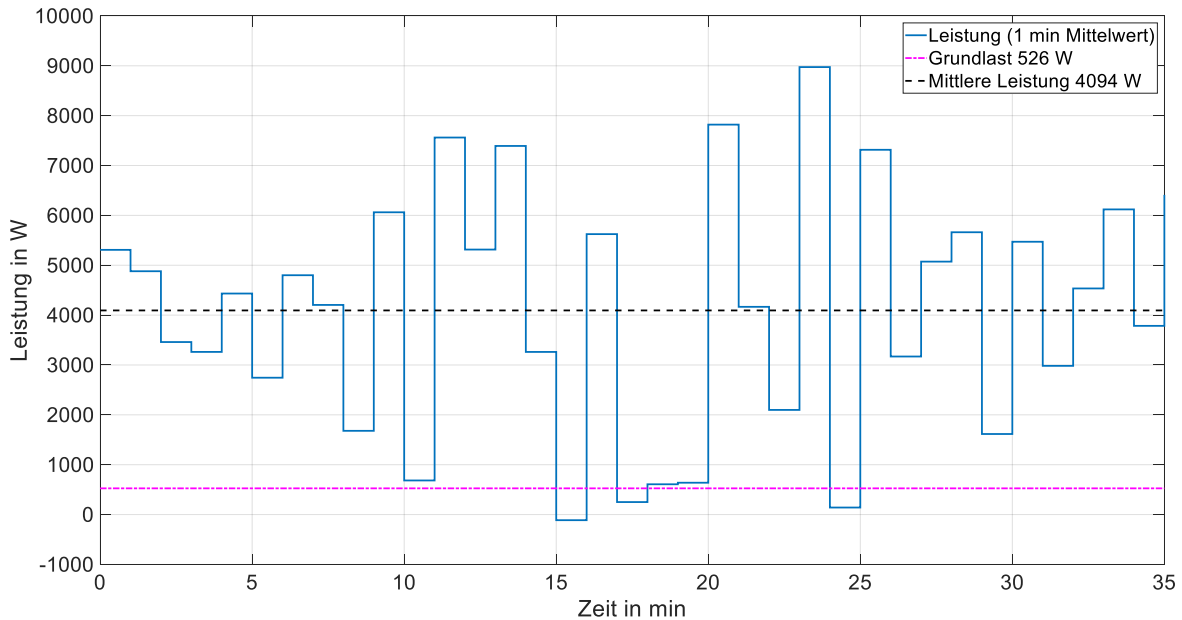


Abbildung F-1: Mittlere Leistungsaufnahme des RBG-4 während des Messintervalls 1

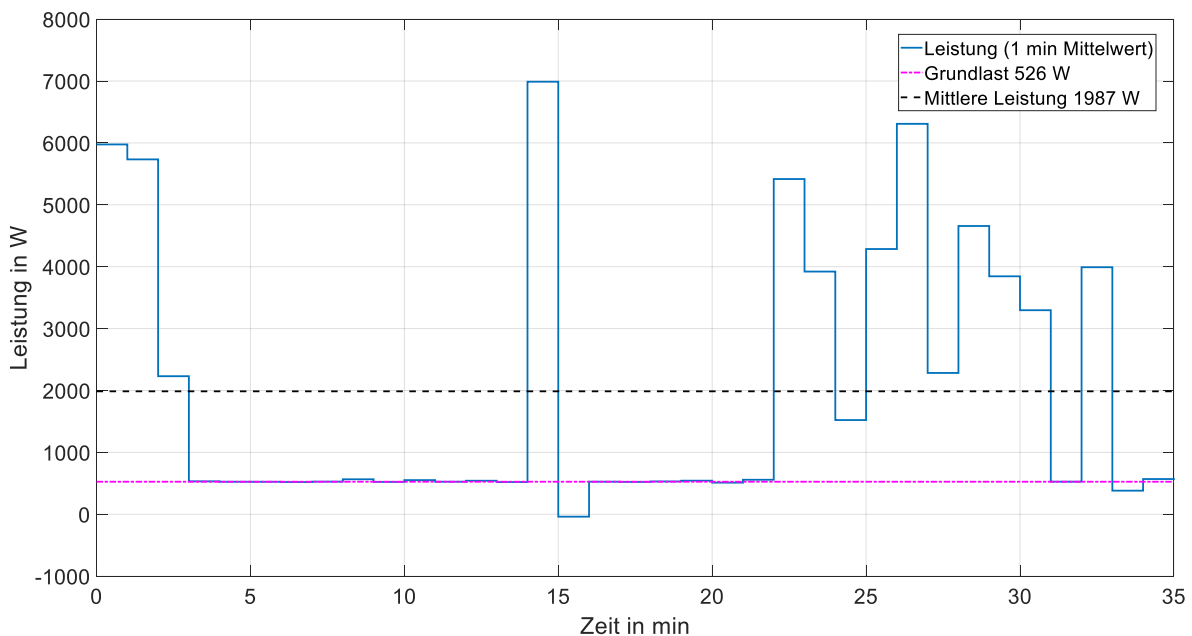


Abbildung F-2: Mittlere Leistungsaufnahme des RBG-4 während des Messintervalls 2

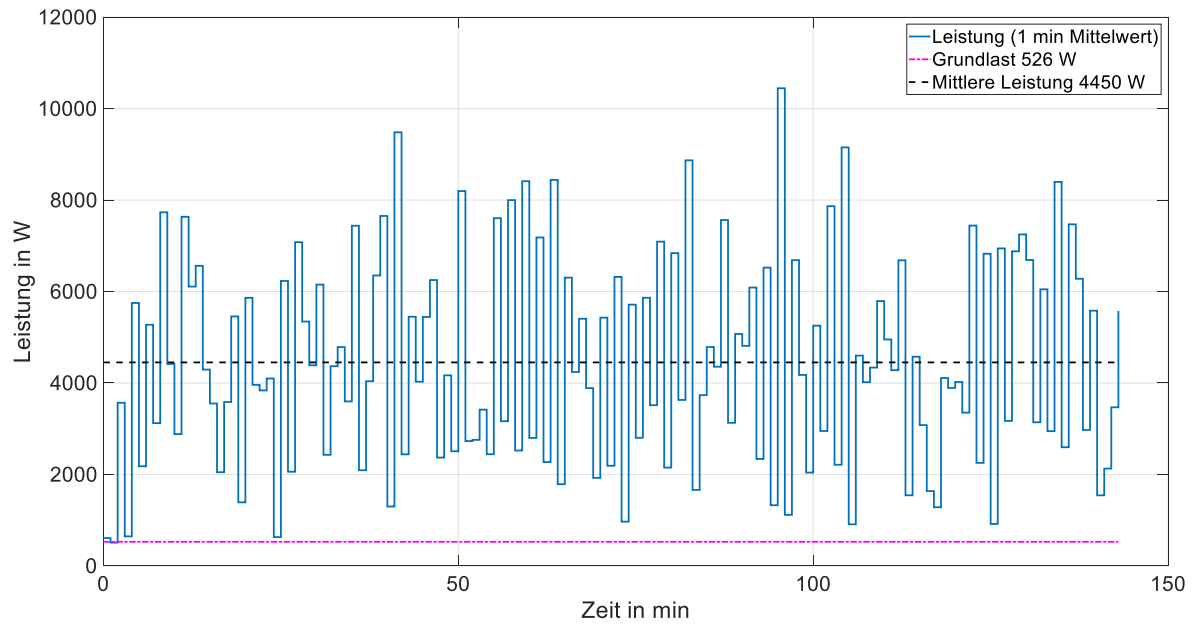


Abbildung F-3: Mittlere Leistungsaufnahme des RBG-4 während des Messintervalls 3