



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM School of Engineering and Design

**Bewertung und Klassifizierung der Energieeffizienz
von Regalbediengeräten in automatischen
Hochregallagern**

Andreas Martin Rücker, M. Sc.

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design

der Technischen Universität München

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Veit Senner

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

2. Prof. Dr. techn. Georg Kartnig

Die Dissertation wurde am 21.06.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 25.10.2022 angenommen.

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München
Zugleich: Dissertation, München, Technische Universität München, 2022

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

Layout und Satz: Andreas Martin Rücker, M. Sc.
Copyright © 2022 Andreas Martin Rücker, M. Sc. Alle Rechte vorbehalten.
ISBN: 978-3-948514-25-9
Printed in Germany, 2022

Vorwort

Ich danke an dieser Stelle allen, die mich im Rahmen meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, meiner Forschungsarbeit und meiner Dissertation unterstützt haben. Das sind zusammengefasst eine ganze Menge Personen. Beginnen möchte ich bei meinen Eltern, die mir ein Studium in München überhaupt erst ermöglicht haben und ohne die diese Promotion nicht möglich gewesen wären.

Diese Arbeit entstand im besonderen Gedenken an meine Mutter Gabi, die während der Erstellung dieser Dissertation verstorben ist und ihre Fertigstellung leider nicht mehr erleben konnte. Darüber hinaus möchte ich meinen Brüdern Christoph und Michael für die Unterstützung in unserer gemeinsamen Jugend danken. Mein besonderer Dank und meine Liebe gilt meiner Frau Lydia, die mich beinahe mein ganzes Studium und die lange Zeit der Promotion begleitet hat. Besonders in Phasen des Zweifels, von denen es einige gab, war sie stets an meiner Seite und hat mich in meiner Arbeit bestärkt. Meinem Sohn Paul danke ich, dass er uns als Baby meistens gut hat schlafen lassen.

Bei Herrn Professor Fottner möchte ich mich für die Betreuung des gesamten Dissertationsvorhabens und die fachliche Unterstützung bedanken. Herrn Professor Kartnig möchte ich darüber hinaus für die Übernahme des Koreferats danken.

Meinen Kolleginnen und Kollegen danke ich für die schöne Zeit am Lehrstuhl. Der Zusammenhalt am Lehrstuhl ist seit jeher ein ganz besonderer und ich freue mich sehr, dass ich ein Teil dieser Gemeinschaft sein durfte und immer noch bin. Für das Redigieren der Arbeit danke ich an dieser Stelle besonders: Leonhard Feiner, Dirk Kauke, Josef Xu, Lukas Karzel und meinem Vater Dr. Thomas Rücker.

Im Rahmen meiner Zeit haben einige Studierende ihre Studienarbeiten bei mir geschrieben oder für mich als studentische- oder wissenschaftliche Hilfskräfte gearbeitet. Bei ihnen allen möchte ich mich für die Zusammenarbeit und die erzielten Ergebnisse bedanken. Ihre Arbeiten sind im Anhang A gelistet. Besonders bedanken möchte ich mich bei Lukas Karzel, Christian Parr und Jona Rief. Darüber hinaus möchte ich Florian Spitzer besonders für die Unterstützung im Rahmen der CAD und Maschinzeichnen Lehre danken.

Ich danke meinen Partnern in der Industrie, die mich im Rahmen des Forschungsprojekts und darüber hinaus mit ihrem Wissen und ihrer Erfahrung unterstützt haben. Besonders bedanken möchte ich mich bei denen, die mir mit ihren Kontakten und ihrer Hilfe die Messungen an Hochregallagern in der Industrie ermöglicht haben. Einen speziellen Dank möchte ich an dieser Stelle an Yusuf Isitan, für seine Hilfe bei den Messungen an RBG-2, richten.

Darüber hinaus danke ich all jenen, die in vielen Diskussionen zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meine Forschungsarbeit hat mir die meiste Zeit sehr viel Spaß gemacht, aber die meisten Doktoranden*innen kämpfen irgendwann mit dem Abschluss ihrer Arbeit. Gerade zum Schluss hinaus hinterfragt man die eigene Arbeit oft und vor allem wirft man mit jeder weiteren Untersuchung auch immer neue Fragen auf. Ein wesentlicher Bestandteil einer Dissertation besteht deshalb aus meiner Sicht auch darin, zu erkennen, welche Fragen man selbst nicht beantworten kann. Diese Fragen eröffnen dann das Feld für weitere Forschungsarbeiten.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wird eine Problemstellung aus dem Spannungsfeld der modernen Intralogistik behandelt. Die Energieeffizienz spielt im Rahmen der Herausforderungen, denen moderne Intralogistiksysteme ausgesetzt sind, eine wichtige Rolle. Verschiedene Einflussfaktoren begünstigen die Entwicklung von immer energieeffizienteren Geräten. Dabei spielen sowohl die gesetzlichen Rahmenbedingungen als auch die Forderungen von Kunden eine Rolle.

Die Arbeit befasst sich mit der Bewertung und der Klassifizierung von Regalbediengeräten in automatischen Hochregallagern. Automatische Hochregallager finden sich oft in Produktionsbetrieben und Logistikzentren. Sie dienen der Speicherung von Lagergütern. Von außen erkennt man Gebäude, die Hochregallager beinhalten, meist an ihrem rechteckigen Grundriss, der großen Höhe (bis über 40 m) und der meist fensterlosen Fassade. Ein Hochregallager besteht aus einer Anzahl von Regalzeilen mit vielen einzelnen Lagerplätzen für Kleinteilebehälter, Tablare, Paletten oder weitere Ladungsträger. Automatische Hochregallager werden mit Regalbediengeräten oder Satellitenfahrzeugsystemen betrieben. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Betrachtung von Regalbediengeräten für Kleinladungsträger oder Paletten und untersucht deren Energiebedarf und Durchsatz. Die Ergebnisse sind zum Teil auch auf Geräte für andere Ladungsträger übertragbar. Im Rahmen von Messungen wurden vier verschiedene Regalbediengeräte untersucht. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Simulationsmodell zur Untersuchung eines breiten Gerätebereichs implementiert. Auf Basis von Simulationsstudien wurde eine Bewertung und eine Klassifizierung der Energieeffizienz entwickelt.

Die Arbeit stellt einen ersten Versuch zur Bewertung von Geräten innerhalb der Intralogistik auf Basis der Gesamtheit ihrer physikalischen Eigenschaften dar. Am Beispiel eines Regalbediengeräts wird eine mögliche Umsetzung und die Verwendung einer solchen Bewertung gezeigt. Eine Bewertung stellt die Grundlage für die Einführung von Verbesserungen dar. Eine initiale Bewertung deckt Verbesserungspotenziale auf. Diese Potenziale können anschließend gezielt ausgeschöpft und die Verbesserungen im Nachgang evaluiert werden. Die Arbeit zeigt darüber hinaus mögliche Einsparpotenziale, die im Rahmen der Untersuchungen festgestellt wurden, auf.

Abstract

This thesis deals with a problem from the field of tension of modern intralogistics. Energy efficiency plays an important role in the context of the challenges facing modern intralogistics systems. Various influencing factors favour the development of increasingly energy-efficient equipment. Both the legal framework and the demands of customers play a role here.

The thesis deals with the evaluation and classification of stacker cranes in automatic high-bay warehouses. Automatic high-bay warehouses are often found in production plants and logistics centres. They are used for the storage of stored goods. From the outside, buildings containing high-bay warehouses can usually be recognised by their rectangular layout, great height (up to over 40 m) and usually windowless facade. A high-bay warehouse consists of a number of rows of racks with many individual storage spaces for small parts containers, trays, pallets or other load carriers. Automatic high-bay warehouses are operated with stacker cranes or satellite vehicle systems. This paper is limited to the consideration of stacker cranes for small load carriers or pallets and examines their energy demand and throughput. Some of the results can also be applied to stacker cranes for other load carriers. Within the scope of measurements, four different stacker cranes were examined. With the help of the knowledge gained, a simulation model was implemented to investigate a broader range of stacker cranes. Based on simulation studies, an evaluation and classification of energy efficiency has been developed.

The work represents a first attempt to evaluate equipment within intralogistics based on the totality of its physical properties. Using the example of a stacker crane, a possible implementation and a use case of such an assessment is shown. An assessment provides the basis for the introduction of improvements. An initial assessment reveals potential for improvement. These can then be specifically improved and the improvements evaluated afterwards. The work also shows potential savings identified in the course of the investigations.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	XIII
Formelzeichenverzeichnis	XV
1 Einleitung – Bedeutung der modernen Intralogistik	1
1.1 Ausgangslage – Steigende Anforderungen an die Energieeffizienz in der Intralogistik	2
1.2 Problemstellung und Zielsetzung – Fehlende Möglichkeiten zur Bewertung und Klassifizierung von Regalbediengeräten	4
1.3 Vorgehensweise bei der Entwicklung der Bewertung und Klassifizierung	6
2 Theoretische Grundlagen und Stand der Wissenschaft	9
2.1 Automatische Hochregallager mit Regalbediengeräten	9
2.1.1 Aufbau	13
2.1.2 Elektrische Antriebe und Verbraucher	15
2.1.3 Spielarten beim Betrieb eines RBG	19
2.1.4 Kinematik	21
2.2 Energieeffizienz im relevanten Kontext der Intralogistik	25
2.3 Ableitung der Forschungslücke und der Forschungsfrage	29
3 Methodisches Vorgehen zur Entwicklung der Bewertung und Klassifizierung	33
4 Untersuchung des Energiebedarfs über Leistungsmessungen	37
4.1 Beschreibung der untersuchten RBG	37
4.2 Grundlagen der Leistungsmessungen	39
4.3 Messungen an RBG-1	40
4.3.1 Warmlaufverhalten	42
4.3.2 Einfluss der Geschwindigkeit und der Nutzlast	43
4.3.3 Einfluss der Beschleunigung und des Rucks	47
4.3.4 Beschleunigungsmessung	51
4.4 Messungen an RBG-2	52
4.4.1 Einzelfahrten	52
4.4.2 Beschleunigungsmessungen	55
4.4.3 Langzeitmessungen	56
4.5 Messungen an RBG-3	58
4.6 Messungen an RBG-4	61
4.7 Fazit der Messungen	63
5 Untersuchung von Durchsatz und Energiebedarf über Simulation	65
	IX

5.1	Grundlagen des Simulationsmodells	65
5.1.1	Modellarchitektur	67
5.1.2	Getroffene Annahmen und Einschränkungen	68
5.2	Simulation der Energie- und Zeitbedarfe	70
5.2.1	Grundlagen	70
5.2.2	Berechnung der Leistungsverläufe	72
5.2.3	Assemblierung der Fahrten	73
5.2.4	Generierung von Auftragslisten	75
5.3	Validierung mit Messdaten	76
5.3.1	Validierung mit Messdaten von RBG-1	77
5.3.2	Validierung mit Messdaten von RBG-2	82
5.3.3	Fazit der Validierung	83
5.4	Durchführung der Simulationsstudien	83
5.4.1	Studie 1 - Basisparameter	84
5.4.2	Studie 2 - Erweiterte Parameter	87
6	Simulationsergebnisse	89
6.1	Ergebnisse der Studie 1 – Basisparameter	89
6.1.1	Ergebnisraum	89
6.1.2	Korrelationen	91
6.1.3	Haupteffekte	97
6.1.4	Einfluss des Regalwandfaktors	107
6.2	Ergebnisse der Studie 2 – Erweiterte Parameter	110
6.2.1	Ergebnisraum	111
6.2.2	Haupteffekte	112
6.3	Fazit der Simulationsergebnisse	113
7	Bewertung und Klassifizierung der Energieeffizienz	115
7.1	Effizienzkennzahl	115
7.1.1	Ergebnisraum	117
7.1.2	Korrelationen	118
7.1.3	Haupteffekte	122
7.1.4	Regalwandfaktor	126
7.2	Verteilung der Effizienzkennzahl und Klassifizierung	128
7.3	Referenzspiele für den mittleren Energiebedarf	129
7.4	Praktische Umsetzung einer Bewertung	132
8	Diskussion der Ergebnisse	139
8.1	Diskussion und Ableitung von Handlungsempfehlungen	139
8.2	Abschätzung der Relevanz dieser Arbeit	144
8.3	Beantwortung der Forschungsfragen	145
9	Zusammenfassung und Ausblick	147

9.1 Zusammenfassung	147
9.2 Ausblick	148
Literaturverzeichnis	151
Abbildungsverzeichnis	161
Tabellenverzeichnis	167
A Liste der eigenen Publikationen und der betreuten Studienarbeiten	A-1
B Ergänzende Messergebnisse	B-1
B.1 Beschleunigung und Geschwindigkeit des Hubwerks von RBG-2	B-1
B.2 Niederspannungshauptversorgung von RBG-2	B-2
C Gleichungen des Simulationsmodells	C-1
D Theoretische Leistungsverläufe	D-1
E Ergänzende Simulationsergebnisse	E-1
E.1 Tabellen der Korrelationswerte der Konfigurationen im Einzelspielbetrieb	E-1
E.2 Absolutwerte der Haupteffekte	E-4
E.3 Tabellenwerte der Haupteffekte	E-7
E.4 Adjusted responses der Konfigurationen im Einzelspielbetrieb	E-11
E.4.1 Durchsatz	E-11
E.4.2 Energiebedarf	E-12
E.4.3 Effizienzkennzahl	E-14
E.5 Durchsatz des FEM Referenzspiels	E-16

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AKL	Automatisches Kleinteilelager
APL	Automatisches Palettenlager
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DIN	Deutsches Institut für Normung
EE	Energieeffizienz
fml	Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
FEM	Federation Europeenne de la Manutention (Europäische Vereinigung der Förder- und Lagertechnik)
HRL	Hochregallager
KLT	Kleinladungsträger
LAM	Lastaufnahmemittel
LHSA	Latin Hypercube Sampling Algorhythm (Latin Hypercube Stichprobenverfahren Algorithmus)
RBG	Regalbediengerät

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a	[m/s ²]	Beschleunigung
α	[1]	Signifikanzgrenze
d	[m]	Durchmesser
E	[J]	Energie
ϵ	[1]	relativer Fehler
η	[1]	Wirkungsgrad
f	[m]	Hebelarm der rollenden Reibung
F	[N]	Kraft
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
H	[m]	maximaler Fahrweg in y-Richtung
J	[m/s ³]	Ruck (Jerk)
JR	[/s]	Ruckverhältnis (Jerk Ratio)
k	[1]	Faktor für den Reibungswiderstand
k_{EE}	[kgm ³ /(Js)]	Effizienzkennzahl
L	[m]	maximaler Fahrweg in x-Richtung
m	[kg]	Masse
n	[1]	Anzahl
n_r	[1]	Gesamtzahl der Experimente
p	[1]	p-Wert
P	[W]	Leistung
Q	[1]	Anteil
r	[1]	Korrelationskoeffizient
R^2	[1]	Bestimmtheitsmaß

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
RU	[1]	Verwendung einer Rückspeiseeinheit
RWF	[1]	Regalwandfaktor
s	[m]	Strecke (Weg)
S	[1]	Signifikanz
σ	[1]	Standardabweichung
t	[s]	Zeit
\bar{t}	[s]	Mittelungszeit
TP	[1/h]	Durchsatz (Throughput)
Θ	[kgm ³ /s]	Nutzen
v	[m/s]	Geschwindigkeit
V	[m ³]	Volumen

Index	Bedeutung
AKL	Automatisches Kleinteilelager
APL	Automatisches Palettenlager
B	Beschleunigungsphase
col	Regalspalten (Columns)
DS	Doppelspiel
el	elektrisch
ES	Einzelspiel
FEM	FEM Spiel
FW	Fahrwagen
ges	gesamt
H	Horizontalführungsrollen
HW	Hubwagen
K	Konstantfahrphase

Index Bedeutung

lev	Regalebenen (Levels)
Mast	Mast
max	maximal
MI	Messintervall (Mittelungsintervall)
NL	Nutzlast bzw. Ladeeinheit
R	Reibung
Rad	Rad
RU	Rückspeiseeinheit (Refeed unit)
Spiel	Spiel (auf ein Einzel- oder Doppelspiel bezogen)
V	Verzögerungsphase
WH	Widerstand bezogen auf die horizontalen Führungsrollen
WR	Widerstand bezogen auf den Rollvorgang
WZ	Widerstand bezogen auf die Zapfenreibung
x	x-Richtung (Gassenrichtung)
y	y-Richtung (Ebenenrichtung)
z	z-Richtung (Lagerkanalrichtung)
Z	Zapfen

1 Einleitung – Bedeutung der modernen Intralogistik

In unserem aktuellen Umfeld des Lebens und Wirtschaftens werden viele Themen durch Trends beeinflusst und vorangetrieben. Im Allgemeinen werden solche Trends auch als Strömungen unserer Zeit bezeichnet. Diese betreffen alle Bereiche der Gesellschaft und haben unter anderem unser Einkaufsverhalten und den Anspruch, den wir an Produkte und Lieferzeiten stellen, grundlegend verändert. Diese Erwartungen haben verschiedene Auswirkungen auf die Logistik. Durch große Handelsplattformen im Internet, die sehr kurze Lieferzeiten garantieren, erwarten wir mittlerweile Lieferzeiten, die im Bereich weniger Tage liegen. Zusätzlich erleben wir eine massive Zunahme des Onlinehandelsvolumens und gleichzeitig gibt es einen Trend zu immer individuelleren Produkten. Das T-Shirt, die Schuhe, die Uhr oder das Auto sind alles mögliche Beispiele für Produkte, die heute schon auf Bestellung nach individuellen Vorgaben gefertigt werden können. Diese Individualisierung und die damit zunehmende Variantenvielfalt in der Produktion steigert die Komplexität von Produktionsprozessen immer weiter. Die kurzen Lieferzeiten im Versand und die Variantenvielfalt in der Produktion führen dazu, dass die moderne Logistik in allen Bereichen immer höhere Anforderungen erfüllen muss. Gleichzeitig stehen wir als Gesellschaft vor der gigantischen Herausforderung des Klimawandels. Die Notwendigkeit Energie und damit Emissionen einzusparen ist somit auch in der Logistik gegeben. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, müssen alle großen und kleinen Möglichkeiten zur Einsparung von Energie genutzt werden.

Neben der außerbetrieblichen Logistik, stellt die innerbetriebliche Logistik einen wichtigen Bestandteil in der gesamten Logistikkette dar. Die innerbetriebliche Logistik, die sogenannte Intralogistik, umfasst an einem Logistikstandort die Verbindungen von Wareneingang, den internen Quellen und Senken und dem Warenausgang [Gud-2012a, S. 5]. Im Rahmen der Intralogistik unterscheidet man drei zentrale technische Systeme: Lagersysteme, Kommissioniersysteme und Transportsysteme [Gud-2012a, S. xx]. Lagersysteme erfüllen dabei eine der vier Grundfunktionen der operativen Logistik, das Lagern zur Zeitüberbrückung [Gud-2012a, S. 1]. Im Rahmen der Lagersysteme spielen automatische Hochregallager (HRL) eine wichtige Rolle. Sie können eine Vielzahl an unterschiedlichen Artikeln mit einer hohen Raumeffizienz lagern. Gleichzeitig sind es große Systeme mit hohem Energiebedarf.

1.1 Ausgangslage – Steigende Anforderungen an die Energieeffizienz in der Intralogistik

Die Generalversammlung der Vereinten Nationen hat 2015 in einer Resolution die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung beschlossen. In dieser sind 17 politische Ziele für eine ökologisch, sozial und ökonomisch nachhaltige Entwicklung der ganzen Welt festgeschrieben. In Ziel 7 wird die Forderung nach einer leistbaren, zuverlässigen, nachhaltigen und modernen Energieversorgung für alle Menschen beschrieben [Ver-2015, S. 19]. Dabei wird bis 2030 insbesondere eine Verdopplung der globalen Energieeffizienz (EE) gefordert. [Ver-2015]

Aufgrund der eingangs beschriebenen Herausforderungen und den politischen Rahmenbedingungen auf globaler und nationaler Ebene sind viele Entscheidungen im industriellen Umfeld von Themen der Nachhaltigkeit geprägt. Alle Industriezweige sind gefordert ihre Systeme und Prozesse nachhaltiger zu gestalten. Vor diesem Hintergrund ist auch die Intralogistik mit der Forderung konfrontiert, ihre Nachhaltigkeit zu verbessern. Im Rahmen der Nachhaltigkeit kommen die drei Säulen der ökologischen, ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeit zum Tragen. Bei einer Verbesserung der EE geht es dabei nicht nur um ökologische Aspekte. Aufgrund des seit Jahren kontinuierlich steigenden Industriestrompreises in Deutschland bietet eine Erhöhung der EE ökonomische Vorteile. In Abbildung 1-1 wird der Verlauf des Industriestrompreises von 1998 bis 2021 dargestellt.

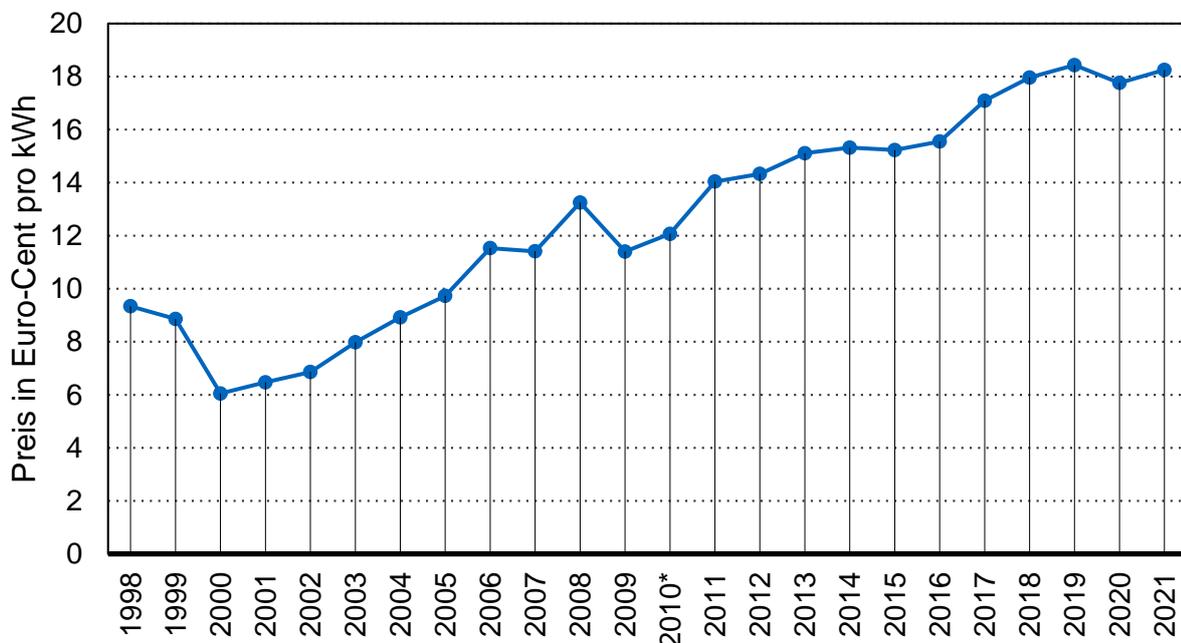


Abbildung 1-1: *Industriestrompreise der mittelspannungsseitig versorgten Industriebetriebe mit einer Abnahme von 100 kW für 1600 h bis 4000 kW für 5000 h Jahresverbrauch inklusive Stromsteuer in Deutschland von 1998 bis 2021 (*Ab 2010 gilt die Ausgleichsmechanismusverordnung (bezogen auf die EEG-Umlage [BDE-2021, S. 26]))*

Seit den letzten 20 Jahren, gedämpft nur durch Einbrüche in den Krisenjahren 2007, 2009 und 2020, steigt der Strompreis relativ kontinuierlich. Vereinfacht wird nachfolgend von steigenden Energiekosten gesprochen. Günthner et al. haben bereits 2009 die Wichtigkeit der Nachhaltigkeit für die Intralogistik verdeutlicht [Gün-2009a]. Sie betonen, dass nicht nur steigende Rohstoffpreise, sondern vor allem die damals schon geführte Klimadebatte wichtige Faktoren für Nachhaltigkeit und damit auch für die EE sind. Sie beschreiben bereits die Wichtigkeit eines Kontrollsystems zur Bewertung des Status Quo und zur Etablierung von Verbesserungsmaßnahmen. In späteren Untersuchungen haben Günthner et al. noch einmal den Wettbewerbsfaktor EE im Automatischen Kleinteilelager (AKL) näher beleuchtet [Gün-2011a; Gün-2011b]. In diesen Arbeiten wurde unter anderem ein Simulationsmodell vorgestellt, das eine Untersuchung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten (RBG) ermöglicht. An diesen Arbeiten war auch Ertl beteiligt, dessen Forschungsarbeiten eine wichtige Grundlage für diese Dissertation darstellen.

Im Rahmen von Ausschreibungen werden Firmen auch mit Forderungen von Kund*innen nach energieeffizienten Geräten konfrontiert. Aus diesem Grund setzen sich Firmen bei der Entwicklung von Geräten auch selbst entsprechende Ziele. Insgesamt können damit die folgenden vier maßgeblichen Treiber, die eine Umsetzung von EE Maßnahmen fördern, genannt werden:

- gesetzliche Vorgaben
- steigende Energiekosten
- Forderungen von Kund*innen
- firmeninterne Ziele und Vorgaben.

Gesetzliche Vorgaben stellen feste Regeln dar, die von Firmen nicht ignoriert werden können. Ein Beispiel ist das „Gesetz über Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen (EDL-G)“. In diesem 2010 beschlossenen Gesetz wurden unter anderem Unternehmen verpflichtet, bis Ende 2015 ein Energieaudit durchzuführen. Dadurch sollte die gesamte EE eines Unternehmens überprüft und Verbesserungspotenziale identifiziert werden. [Bun-2010]

Auf der Seite der gesetzlichen Vorgaben gibt es noch weitere Beispiele. Zusätzlich erzeugt aber die Wettbewerbssituation im Markt weitere Treiber, wie firmeninterne Ziele und Vorgaben sowie Forderungen von Kund*innen. Die Hersteller von Intralogistikanlagen sind bestrebt ihre Produkte effizient zu gestalten, da sie sich dadurch Wettbewerbsvorteile, wie geringere Betriebskosten, erhoffen. Fehlen aber die Möglichkeiten, die hohe EE transparent darzustellen, dann sinken auch die Anreize für Hersteller. Für Haushaltsgeräte existieren solche Energieeffizienzbewertungen bereits. Diese werden auch für die Vermarktung von Geräten eingesetzt. Diese Effizienzklassen haben in den letzten Jahren zu einer deutlichen Verbesserung der Effizienz von Geräten geführt. Dies geht so weit, dass die Europäische Union im März 2021 neue Energieeffi-

zientzklassen mit strengeren Grenzwerten für die EE von Haushaltsgeräten eingeführt hat. Dazu wurde die seit 2010 geltende Richtlinie 2010/30/EU durch die neue Verordnung 2017/1369 ersetzt [Eur-2010; Eur-2017]. Diese Verordnung wird durch weitere Verordnungen für die einzelnen Gerätetypen¹ ergänzt. Kund*innen fordern auch im Bereich der Intralogistik effizientere Geräte, da diese ökonomische Vorteile bieten. Dabei wägen Kund*innen das Verhältnis von Investitionskosten und Betriebskosten über die Lebensdauer sehr genau ab. Geräte mit höherer EE benötigen für die gleiche mechanische Leistung weniger elektrische Energie.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung – Fehlende Möglichkeiten zur Bewertung und Klassifizierung von Regalbediengeräten

Diese Dissertation befasst sich im Kern mit der Problemstellung der Bewertung der EE automatischer HRLs mit RBGs. Im Rahmen der Arbeit werden unter HRLs sowohl Lager mit Regalen für Paletten, als auch Lager mit Regalen für Kleinladungsträger (KLT) verstanden. Mit zunehmender Automatisierung steigt allgemein der Energiebedarf von Intralogistikanlagen. Freis hat in ihrer Arbeit diesen Zusammenhang nachgewiesen [Fre-2016]. Durch den höheren absoluten Energieverbrauch nimmt die Bedeutung der EE bei zunehmender Automatisierung zu. Deswegen ist gerade eine Steigerung der EE in automatischen Lagersystemen besonders sinnvoll. Solch eine Steigerung ist aber nur mittels eines stetigen Prozesses zur Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen möglich (vgl. [Gün-2009a]). Ein solcher Prozess, in Form eines Umsetzungsreislaufs, ist in Abbildung 1-2 dargestellt. Dieser wird im Rahmen der eigenen Forschungsarbeit entwickelt und basiert auf einem klassischen PDCA Kreislauf². Den ersten Schritt zur Umsetzung stellt dabei eine Bewertung des Status Quo dar. Darauf aufbauend folgt die Identifizierung von Verbesserungsmaßnahmen und deren Umsetzung. Abgeschlossen wird der Kreislauf durch die Bewertung der Verbesserungen. Nach einer bestimmten Zeit kann dann eine erneute Beurteilung des Status Quo erfolgen. Damit wird eine kontinuierliche Verbesserung der EE sichergestellt. Im Rahmen dieses Kreislaufs ist in Schritt 1 und 4 eine Methode zur Bewertung der EE erforderlich.

Diese Möglichkeit zur Bewertung ist im AKL Bereich teilweise vorhanden, fehlt im Bereich des Automatischen Palettenlagers (APL) aber noch vollständig. Die Bewertung von RBGs ist aufgrund der großen Anzahl an Parametern, die den Betrieb beeinflussen, komplex. Auf der einen Seite steht eine Vielzahl an physikalischen Parametern,

¹ zum Beispiel Fernseher, Monitore, Geschirrspüler, Kühlschränke, Waschmaschinen und Wäschetrockner

² Plan-Do-Check-Act cycle – Planen-Durchführen-Überprüfen-Reagieren Kreislauf

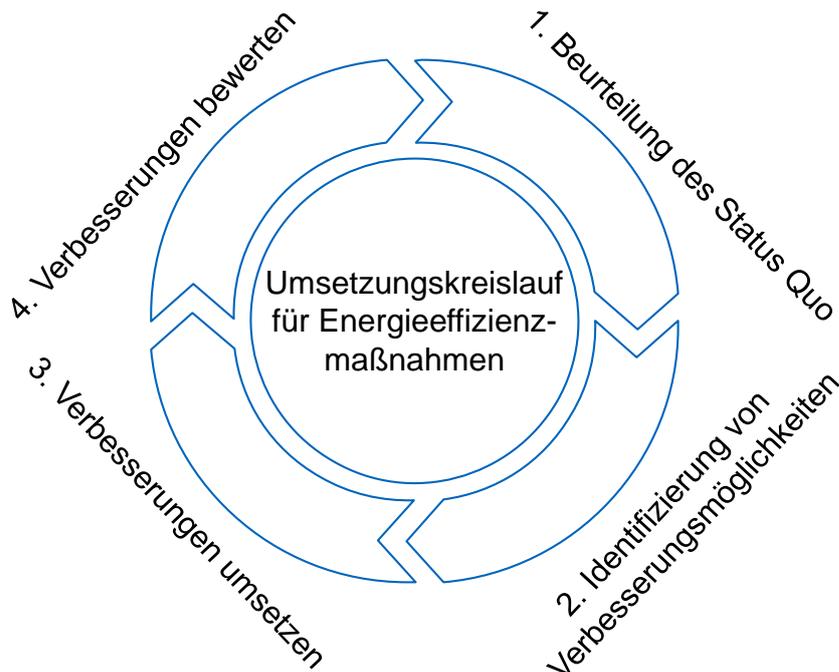


Abbildung 1-2: Kreislauf zur Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen [Rüc-2018c] (basierend auf [Gün-2009a])

die den technischen Aufbau eines Geräts widerspiegeln. Dazu zählen zum Beispiel die kinematischen Parameter des Geräts und die technischen Eigenschaften der Leistungselektronik, der Antriebsmotoren und der mechanischen Antriebe. Auf der anderen Seite sind aber für den Betrieb viele strategische Parameter entscheidend. Dazu zählt zum Beispiel die Zonierungsstrategie, die die Verteilung von Artikeln im Lager bestimmt. Damit ist die Bandbreite an realisierten HRLs mit RBGs sehr groß. Eine Bewertung und Klassifizierung muss diesen Aspekten Rechnung tragen. Existierende Bewertungsmethoden aus anderen Bereichen lassen sich nur bedingt auf RBGs übertragen. Die Bewertung einzelner Komponenten, wie der Antriebsmotoren, ist zwar mit vorhandenen Kennzahlen möglich, aber damit lässt sich kein Vergleich auf Geräteebene erzeugen. Um diesen Vergleich zu realisieren, muss eine große Anzahl von Geräten untersucht werden. Zielsetzung der Arbeit ist es, eine Bewertung und Klassifizierung für das Gesamtsystem RBG im HRL zu entwickeln. Dazu werden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Es existiert eine sinnvolle Systemgrenze für die Bewertung von RBGs.
- Die Konfigurationen von RBGs nehmen einen abgeschlossenen Parameterraum ein.
- Die Einflüsse auf den Betrieb von RBGs müssen für eine Bewertung untersucht werden.
- Mithilfe dieser Untersuchung lässt sich eine Bewertung auf Basis einer Kennzahl ableiten.
- RBGs können auf Basis der Gesamtheit ihrer Ausprägungen und ihrer damit ver-

bundenen EE in Klassen eingeteilt werden.

1.3 Vorgehensweise bei der Entwicklung der Bewertung und Klassifizierung

Das Forschungsthema stellt ein konkretes Problem aus dem Bereich des Einsatzes von RBGs dar. Damit kann es dem Bereich der angewandten Forschung zugeordnet werden. Die Vorgehensweise bei der Bearbeitung des Forschungsthemas orientiert sich an fünf Hauptschritten, die zur Erreichung des Forschungsziels durchgeführt werden (vgl. [Töp-2012, S. 41]):

1. Schritt 1: Problembeschreibung und Abgrenzung
2. Schritt 2: Analyse der theoretischen Grundlagen
3. Schritt 3: Experimentelle und simulative Analyse
4. Schritt 4: Methodenentwicklung
5. Schritt 5: Theoretische und praktische Ergebnisse.

Die fünf Schritte mit ihren jeweiligen Inhalten sind in Abbildung 1-3 dargestellt. Die Inhalte finden sich in den insgesamt neun Kapiteln der Arbeit.

Schritte	Inhalte		
1 Problem- beschreibung und Abgrenzung	Einleitung	Problemstellung und Zielsetzung	Vorgehensweise
2 Analyse der theoretischen Grundlagen	Automatische Hochregallager mit RBG	Energieeffizienz in der Intralogistik	Ableitung der Forschungsfrage
3 Experimentelle und simulative Analyse	Vorgehen zur Entwicklung der Bewertung	Leistungs- messungen an RBG	Entwicklung Simulationsmodell und Durchführung Simulationsstudien
4 Methoden- entwicklung	Analyse der Simulations- ergebnisse	Entwicklung der Bewertung und Klassifizierung	Umsetzung der Bewertung
5 Theoretische und praktische Ergebnisse	Diskussion der Ergebnisse	Ableitung von Handlungs- empfehlungen	Relevanz der Arbeit

Abbildung 1-3: Schritte und Inhalte zur Erreichung des Forschungsziels

In Kapitel 1 werden die Ausgangslage, die Erläuterung der Problemstellung und die Vorgehensweise im Rahmen der Arbeit beschrieben. Anschließend werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen und der Stand der aktuellen Forschung im relevanten Themenbereich zusammengefasst. Abschließend werden die Forschungsfragen abgeleitet. Damit sind Schritt 1 und Schritt 2 abgeschlossen.

Schritt 3 stellt den Beginn des Hauptteils mit neu erarbeiteten Forschungsergebnissen dar. Zunächst wird in Kapitel 3 das Vorgehen zur Entwicklung der Bewertung und Klassifizierung vorgestellt. In Kapitel 4 werden anschließend die durchgeführten Messungen und die Messergebnisse vorgestellt. Basierend auf den bis dahin gewonnenen Erkenntnissen, wird in Kapitel 5 der Aufbau des Simulationsmodells und die Konzipierung der Simulationsstudien beschrieben.

Schritt 4 beinhaltet die Ergebnisse der Simulationsstudien (Kapitel 6) und die Entwicklung der Bewertung und deren praktische Umsetzung (Kapitel 7).

Für die experimentelle und simulative Analyse in Schritt 3 und die Methodenentwicklung in Schritt 4 wird ein selbst entwickeltes Untersuchungsdesign verwendet. Dieses Untersuchungsdesign ist schematisch in Abbildung 1-4 dargestellt.

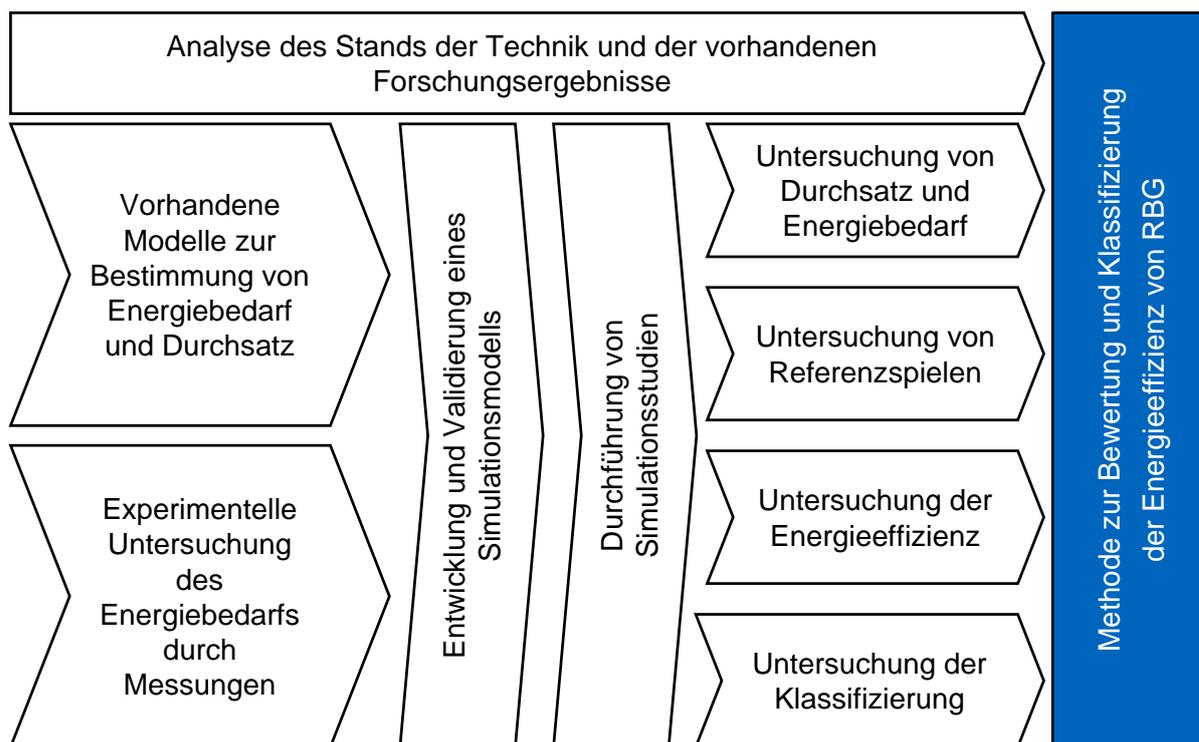


Abbildung 1-4: Untersuchungsdesign zur Erreichung des Forschungsziels

Darin wird gezeigt, wie das Simulationsmodell auf Basis von grundlegenden Rechercharbeiten und Messungen entwickelt wird. Mithilfe des Modells werden die Simulationsstudien, auf der die späteren Untersuchungen basieren, durchgeführt. Die Ergebnisdaten der Simulationsstudien werden für die Hauptuntersuchungen der Arbeit verwendet. Mit ihnen werden Durchsatz, Energiebedarf, Referenzspiele sowie die Be-

wertung und Klassifizierung der EE untersucht. Auf Basis der Untersuchungen steht am Schluss eine Methode zur Bewertung und Klassifizierung der EE von RBGs zur Verfügung.

Anschließend werden im Rahmen von Schritt 5 die Ergebnisse in Kapitel 8 diskutiert, Handlungsempfehlungen abgeleitet und ihre Relevanz eingeordnet.

Abschließend werden die Inhalte der Arbeit in Kapitel 9 noch einmal zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Fragestellungen gegeben. Um die beschriebenen Ergebnisse direkt zusammenzufassen, wird innerhalb einiger Kapitel und Abschnitte ein zusätzliches Zwischenfazit gezogen.

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Wissenschaft

Im Rahmen dieses Kapitels werden die theoretischen Grundlagen für die späteren Untersuchungen beschrieben. Gleichzeitig wird der Stand der Wissenschaft, bestehend aus den relevanten und Einfluss gebenden Forschungsarbeiten, die sich in den letzten Jahren mit RBGs beschäftigt haben, vorgestellt. Dazu wird zunächst in Abschnitt 2.1 das RBG als technisches System beschrieben. Im anschließenden Abschnitt 2.2 werden weitere Forschungsarbeiten zur EE im Bereich automatischer HRLs und der Intralogistik betrachtet. Abschließend werden in Abschnitt 2.3 die Haupt- und die Unterforschungsfragen abgeleitet. Die Intralogistikbranche ist im Raum Deutschland, Österreich und Schweiz stark vertreten. Die meisten recherchierten Forschungsarbeiten stammen von Universitäten aus Deutschland und Österreich. Weitere relevante Publikationen stammen von Universitäten aus Europa.

2.1 Automatische Hochregallager mit Regalbediengeräten

Im Bereich der HRLs gibt es verschiedene Bauformen und Varianten der Bedienung. Die automatischen HRLs neuerer Generation werden sowohl mit Satellitenfahrzeug-Systemen³, als auch mit RBGs betrieben. Die Bedienung eines automatischen HRLs mit Satellitenfahrzeugen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht. Mit der Leistung und dem Energiebedarf dieser Systeme haben sich unter anderem Eder und Kartnig beschäftigt [Ede-2018; Ede-2020]. Auch Stöhr et al. haben sich mit der Bewertung von Satellitenfahrzeug-Systemen befasst [Stö-2018]. In ihrer Arbeit wird insbesondere eine Methode zum Vergleich der EE verschiedener automatischer Lagersysteme für KLTs vorgestellt. In der Praxis finden beide Systeme Anwendung und die Entscheidung welches Bediensystem zum Einsatz kommt, ist stark von den Anforderungen des Lagers abhängig. Im Bereich der AKLs haben sich beispielsweise Fleischer-Dörr et al. mit dieser Entscheidung befasst [Fle-2019]. Dazu haben sie ein statistisches Entscheidungsmodell entwickelt, das Anwender*innen auf Basis quantitativer Kriterien einen Vergleich von verschiedenen Varianten liefert. Im Bereich der APLs gibt es noch keine Untersuchung zum systematischen Vergleich zwischen RBGs und Satellitenfahrzeug-Systemen. Im APL Bereich werden aber deutlich weniger Satellitenfahrzeug-Systeme eingesetzt [Rüc-2018d]. Die manuelle Bedienung von HRLs durch Hochregalstapler, Hochhubwagen oder andere Systeme (vgl. [Hom-2018, S. 60]) sind nicht Teil der Betrachtung. Auch der alternative Ansatz zur Bedienung mittels eines Seilroboters wird

³ HRLs mit Satellitenfahrzeug-Systemen werden in der Praxis oft als Shuttle-Lager bezeichnet.

nicht explizit berücksichtigt [Stu-2014]. Diese Bauweise unterscheidet sich zu deutlich von RBGs, wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden, um in den Untersuchungen mit berücksichtigt zu werden.

Die Hauptaufgabe von automatischen HRLs innerhalb eines Intralogistiksystems ist die Speicherung von Gütern. Dazu werden Güter zu einem gewissen Zeitpunkt eingelagert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder ausgelagert. Um die Speicheraufgabe zu erfüllen, müssen somit Ein- und Auslagerungen und manchmal auch Umlagerungen möglich sein. Diese Aufgaben übernehmen RBGs. Abbildung 2-1 zeigt ein automatisches HRL mit fünf Lagergassen und doppeltiefer Lagerung, das mit den blau dargestellten RBGs bedient wird. Vor dem HRL sind zusätzlich Rollenförderer für den An- und Abtransport der ein- und auszulagernden Güter dargestellt. RBGs können prinzipiell für die Verarbeitung von KLTs über Paletten bis hin zu größeren Ladungsträgern, wie Containern, ausgelegt werden [Gri-2015, S. 142].

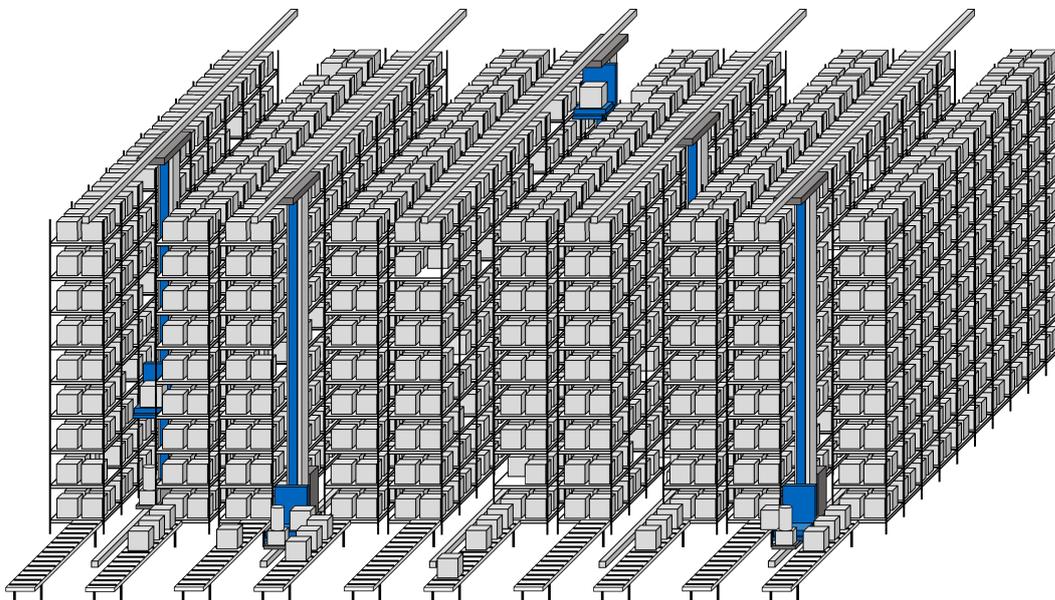


Abbildung 2-1: Schema eines automatischen HRLs mit fünf Gassen, doppeltiefer Lagerung und RBG (vgl. [Kar-2020, S. 3])

RBGs sind schon lange ein Betrachtungsgegenstand in der Forschung. Eine erste wichtige Untersuchung zur Spielzeitberechnung stammt von Bozer und White und wurde im Jahr 1984 veröffentlicht [Boz-1984]. In dieser Arbeit wurden erste wichtige Grundlagen zur analytischen Spielzeitberechnung präsentiert. Ein umfassender Überblick über die vorhandene Literatur im Bereich automatischer Lagersysteme wurde 2009 von Roodbergen et al. veröffentlicht [Roo-2009]. Dieser Überblick fasst Forschungsarbeiten zu Auslegungskriterien und strategischen Aspekten des Betriebs zusammen. Ein jüngerer Überblick über die Literatur im Bereich der Planung von Aufgaben eines RBGs wurde von Boysen und Stephan publiziert [Boy-2016]. Dabei werden hauptsächlich verschiedene Lösungsansätze für die Optimierung der Zeitplanung von Ein-, Um- und Auslagerungsaufträgen präsentiert.

In der Literatur finden sich darüber hinaus verschiedene Definitionen und Eckpunkte für den Einsatz von RBGs (vgl. [Fot-2018, S. 6–7]):

- „Ein RBG ist ein Förder- und Hebezeug zur a) manuellen oder b) automatischen mechanischen Bedienung der Regalfächer einer Lageranlage
Die Einlagerungs- und Auslagerungsvorgänge erfolgen mittels eines Lastaufnahmemittels oder durch Eingreifen einer Bedienungsperson.“ [FEM-9101, S. 2]
- Regalbediengeräte sind schienengeführte Fördereinrichtungen, die für das Umschlagen von Einheitsladungen in Regallagern benutzt werden (vgl. [Gri-2015, S. 141–142; Mar-2016, S. 398])
- Regalbediengeräte dienen zur störungsfreien manuellen oder automatischen Ein- und Auslagerung von Ladeeinheiten in und aus frei zu wählenden Lagerfächern (vgl. [FEM-9831, S. 2; Mar-2016, S. 398–399])
- Regalbediengeräte kommen insbesondere auch bei sehr großen Regalhöhen zum Einsatz (vgl. [Gri-2015, S. 141–142; Pfe-1977, S. 140])
- Regalbediengeräte bilden mit den übrigen Komponenten des Hochregallagers eine Funktionseinheit (vgl. [FEM-9831, S. 2])
- Systematische Einordnung des Fördermittels Regalbediengerät im Lager: Fördermittel zum Ein- und Auslagern \Rightarrow flurgebunden \Rightarrow unstetig \Rightarrow Regalbediengerät (vgl. [Hom-2018, S. 60])

Folgende Kernpunkte für RBGs werden in den verschiedenen Quellen identifiziert (vgl. [Fot-2018, S. 7]):

- RBGs sind schienengeführt.
- RBGs werden für das Umschlagen von Einheitsladungen (Paletten, Behälter oder Sonderladungsträger) eingesetzt.
- RBGs übernehmen die Ein- und Auslagerungen von Ladeeinheiten aus einem HRL.
- RBGs arbeiten automatisiert oder werden manuell bedient.
- RBGs werden für große Regalhöhen eingesetzt.

Die großen Regalhöhen sind in diesem Zusammenhang relativ zu sehen. Schubmaststapler können ein HRL zwar bis zu einer Höhe von ca. 8,4 m bedienen, gleichzeitig werden auch RBGs gebaut, die diese Höhe unterschreiten [Gri-2015, S. 201]. Die Bauhöhe allein ist daher kein Kriterium zur Identifikation eines RBG. Manche RBGs schlagen keine Einheitsladungen im klassischen Sinne um, zum Beispiel gibt es auch Geräte, die komplette Kraftfahrzeuge ohne zusätzliches Ladehilfsmittel bewegen. Allerdings schlagen RBGs nur einen Typ von Ladungen um. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur automatische RBGs für KLTs und Paletten betrachtet. Damit gilt in dieser Arbeit folgende Definition:

RBGs sind schienengeführte und automatisiert arbeitende Geräte, die Ein-, Um- und Auslagerungen von KLTs und Paletten in HRLs durchführen.

Nach der Klärung der Definition wird der Aufbau eines HRLs mit RBGs vorgestellt. In Abbildung 2-2 ist eine schematische Darstellung einer Lagerfront zu sehen. In der Darstellung ist zusätzlich die Betrachtungsgrenze für die Untersuchungen in dieser Arbeit dargestellt.

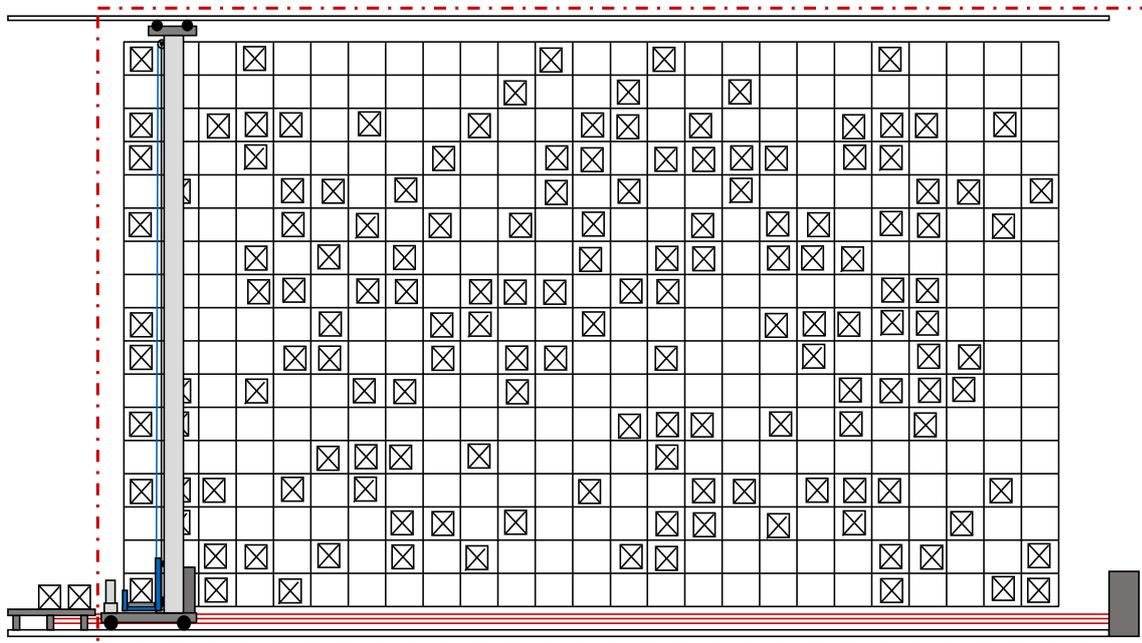


Abbildung 2-2: *Schema einer Lagerfront mit RBGs als Seitenansicht einer Gasse
Darstellung der Betrachtungsgrenze als rote Strich-Punkt-Linie*

Gezeigt wird ein RBG vor einer schematischen Lagerfront mit einer Teilbelegung der Lagerfächer. Ein RBG bedient üblicherweise eine Lagergasse mit zwei Lagerfronten. Diese befinden sich auf den beiden Seiten jeder Gasse. Vor der Gasse ist eine Zu- und Abführstrecke, die zum Transport von Lagergütern in und aus dem HRL dient. Der Übergabepunkt ist, entsprechend dem Fall 1 der häufigsten Anwendungsfälle aus der FEM 9.851 Richtlinie, links unten dargestellt [FEM-9851]. Der I/O Punkt⁴ befindet sich dabei in der untersten Lagerebene an einer Stirnseite des Regals. Analog zu den Darstellungen in den Abbildungen 2-1 und 2-2 ist die Draufsicht samt Betrachtungsgrenze in Abbildung 2-3 zu sehen. Hier wird noch einmal ersichtlich, dass im Rahmen der Arbeit ein „universeller Grundbaustein eines HRLs mit RBGs“ betrachtet wird. Dieser Grundbaustein kann beliebig vervielfacht werden, um die Größe und den Durchsatz des HRLs zu skalieren.

Die Begrenzung des Betrachtungsraums auf ein einzelnes RBG innerhalb einer Gasse bietet Vorteile. Um einen Vergleich zwischen verschiedenen Geräten auf technischer Ebene durchführen zu können, müssen Einflüsse, die nicht durch die technische Realisierung bedingt sind, möglichst ausgeschlossen werden. Dies kann am besten bei der

⁴ Der Übergabepunkt wird auch als I/O Punkt bezeichnet. I/O = Input/Output (Eingabe/Ausgabe)

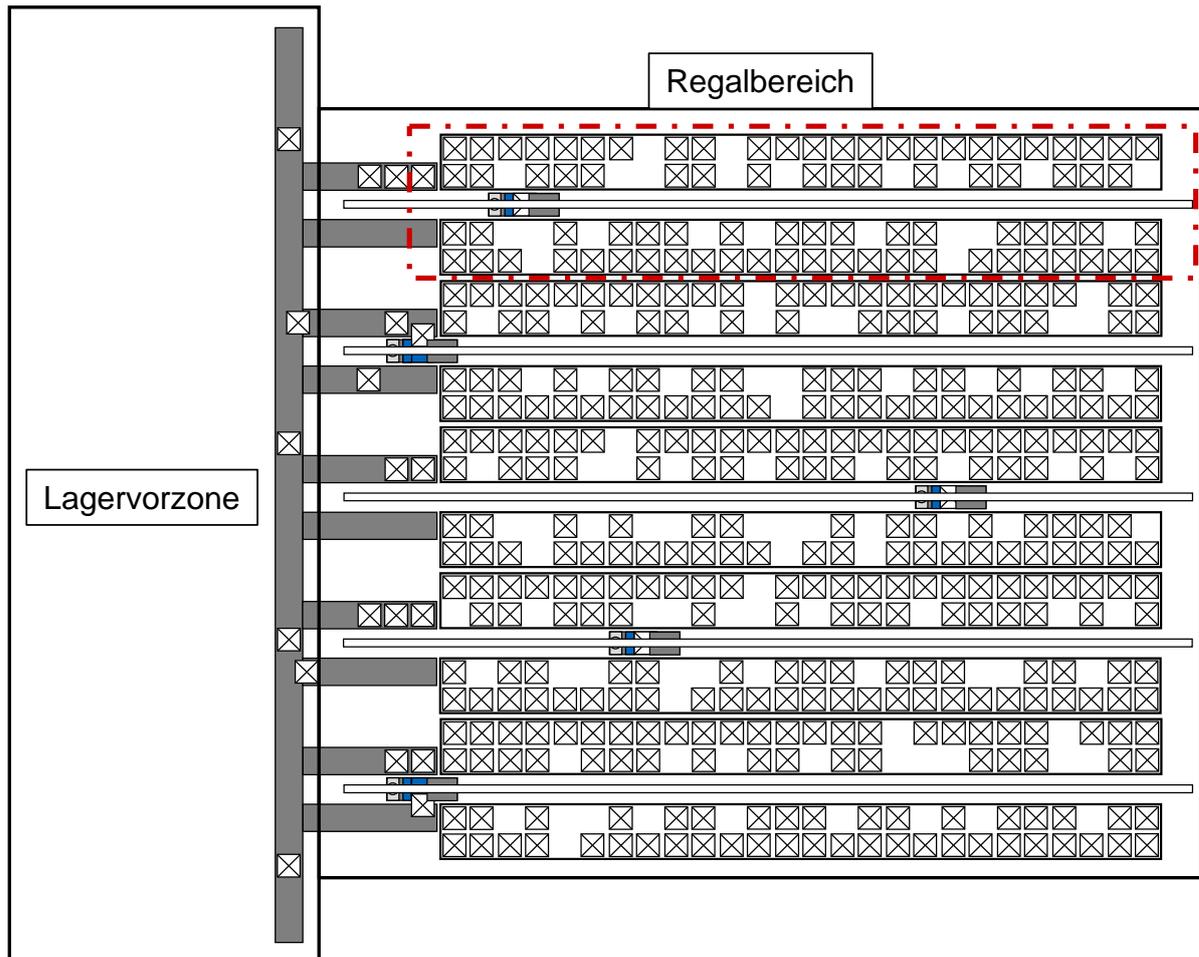


Abbildung 2-3: Schema eines HRLs mit RBGs in der Draufsicht
Darstellung der Betrachtungsgrenze als rote Strich-Punkt-Linie

Betrachtung eines einzelnen RBGs innerhalb einer Gasse geschehen. Für die Skalierbarkeit und Anwendbarkeit der Bewertung auf eine Vielzahl verschiedener HRLs bietet sich die Verwendung dieses „universellen Grundbausteins“ an. Diese Abgrenzung wurde bereits im Rahmen des Forschungsprojekts „Entwicklung einer Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten“ erarbeitet. Die Untersuchungen im Forschungsbericht des Projekts stellen die Grundlage für diese Dissertation dar [Fot-2018].

2.1.1 Aufbau

Nach der Eingliederung des RBGs in sein Umfeld im HRL werden nachfolgend einige Details des Aufbaus beschrieben. Die technischen Details beschränken sich auf jene, die zum Verständnis der nachfolgenden Untersuchungen notwendig sind. Dazu sind die Komponenten des RBG im Detail in Abbildung 2-4 dargestellt. Zusätzlich ist das in der Arbeit verwendete Koordinatensystem dargestellt. Wichtige Komponenten sind der

Fahr- und der Hubantrieb, der Hubschlitten mit Lastaufnahmemittel (LAM), der Mast und die Schaltschränke. Grundsätzlich besitzt ein RBG eine Basisstruktur mit Laufrädern, mit deren Hilfe das Gerät entlang der Gasse in x-Richtung auf einer Stahlschiene fährt. Diese Struktur wird nachfolgend als Fahrwagen bezeichnet. Im AKL Bereich werden meist Räder mit einem Reibbelag aus Kunststoff in Kombination mit einer flachen Stahlschiene, die als I-Profil Träger ausgeführt wird, verwendet. Im Bereich der APLs werden Stahllaufräder in Kombination mit einer bombierten Stahlschiene eingesetzt. Am Fahrwagen sind Fahrtrieb und Mast samt Hubtrieb montiert. Der Hubschlitten mit LAM verfährt in y-Richtung entlang des Masts. Das LAM übernimmt die Ein- und Auslagerung von Ladeeinheiten und bewegt diese damit in z-Richtung. Dieses Koordinatensystem unterscheidet sich von dem Koordinatensystem, das üblicherweise für ein HRL verwendet wird. Bei diesem liegt die y-Richtung quer zur Gasse und der Hubschlitten mit LAM verfährt in z-Richtung. Das LAM kann bei AKLs entweder als ziehendes, oder als hebendes LAM ausgeführt sein. Dabei können auf einem LAM eine oder mehrere Ladeeinheiten Platz finden und es können ein oder mehrere LAMs auf einem Hubschlitten montiert sein. Bei APLs werden nur hebende LAMs mit Teleskopgabeln eingesetzt. Für die Manipulation von Sonderladungsträgern kommen auch andere Sonderbauformen von LAMs zum Einsatz. Im APL Bereich werden auch Geräte mit zwei LAMs realisiert.

In der Abbildung ist eine Bauweise mit einem Mast dargestellt. Eine weitere Bauform von RBGs ist mit zwei parallelen Masten ausgestattet. Bei den Werkstoffen ist der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen, zum Beispiel Kohlenstofffaserverstärkter (carbonfaserverstärkter) Kunststoff (CFK), seit längerem ein Thema in Forschung und Entwicklung. Bereits 2014 wurde am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) ein RBG mit einem Mast aus CFK in Betrieb genommen. In der praktischen Anwendung sind diese Werkstoffe noch nicht sehr verbreitet [Zha-2016]. Selbst bei Geräten neuerer Bauart kommen auf der Werkstoffseite meist nur Kombinationen aus Stahl und Aluminium zum Einsatz [Kau-2018].

In letzter Zeit haben sich insbesondere Zhakov et al. mit dem Einsatz von Faserverbundwerkstoffen bei RBGs befasst. Durch den Einsatz dieser Werkstoffe ist eine Reduktion der Gerätemasse möglich. Gleichzeitig lässt sich die Schwingungsdämpfung des Masts bei sehr hohen Geräten oder Geräten mit hohen Beschleunigungen positiv beeinflussen. [Zha-2016; Zha-2017]

Zwei alternative Bauarten, die vom herkömmlichen Design abweichen, wurden in den letzten Jahren vorgestellt. Zum einen hat Wahle ein Bogentragwerk vorgestellt, das sich von der klassischen geraden Mastform gänzlich unterscheidet [Wah-2014]. Zum anderen haben Egger und Angleitner ein System aus einem vertikalen und gelenkig angebrachten Mast, in Verbindung mit einer schrägen Strebe präsentiert [Egg-2018]. Beide Systeme haben statische Vorteile, sind aber noch nicht in der industriellen Anwendung angekommen.

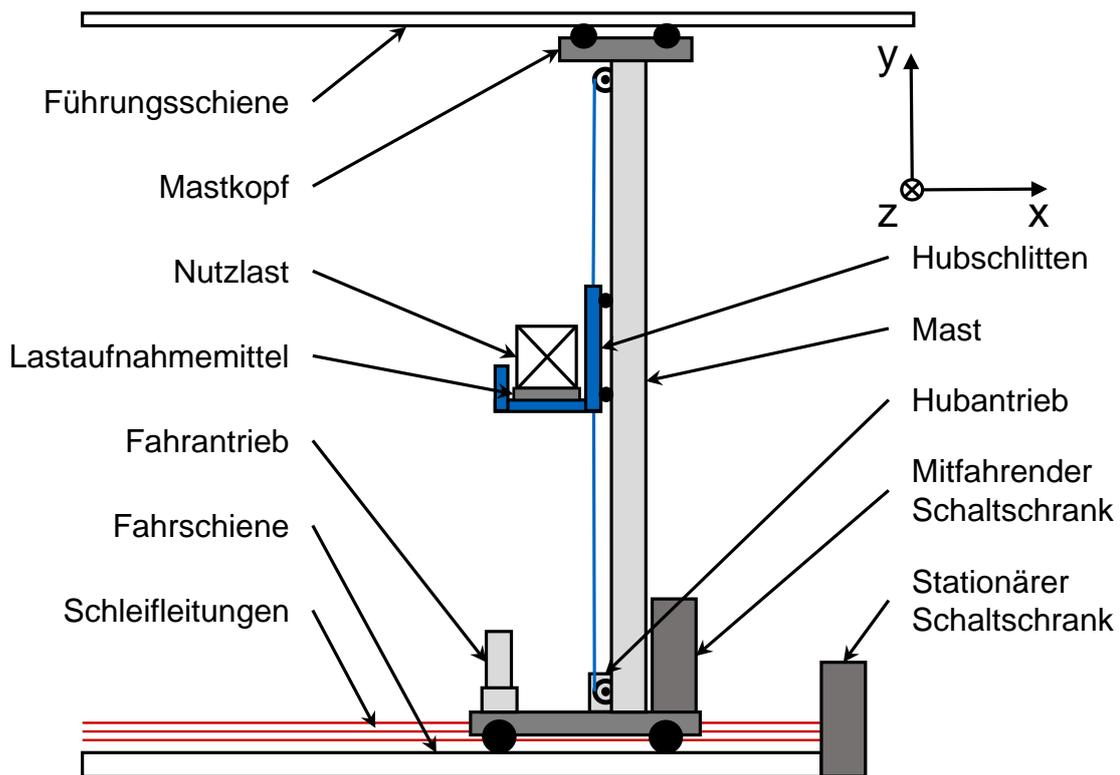


Abbildung 2-4: Detailschema eines RBGs mit seinen Komponenten und dem in dieser Arbeit verwendeten Koordinatensystem für die Bewegungsrichtungen

Die Firma WESTFALIA hat darüber hinaus ein RBG für Paletten vorgestellt, das in der obersten Regalebene verfährt und statt eines Masts ein spezielles Seilhubwerk mit Traverse und LAM besitzt [Wes-2018, S. 26–27]. Das System kommt damit ohne Mast aus. Eine weitere Realisierung mit Seilen ist der 2014 von Sturm und Bruckmann vorgestellte Seilroboter [Stu-2014]. Dieser ist aber nur als Prototyp entwickelt worden. Alias et al. haben 2018 einen Überblick über vorhandene Anwendungen von Seilrobotern veröffentlicht [Ali-2018]. Solche Systeme wurden zwar in den Simulationen in dieser Arbeit nicht direkt berücksichtigt, sie können aber mit der vorgestellten Bewertung betrachtet werden.

2.1.2 Elektrische Antriebe und Verbraucher

Die elektrischen Antriebe eines RBGs bzw. ihre Leistungs- und Energieaufnahme sind Inhalt zahlreicher Forschungsarbeiten. Im Bereich der Analyse des Energiebedarfs von RBGs haben Schulz et al. bereits 2012 erste maßgebliche Untersuchungen auf Basis von Messungen und Simulationen durchgeführt [Sch-2012a; Sch-2012b]. In ihrer ersten Untersuchung wurden die Zusammenhänge der kinematischen Parameter von Fahr- und Hubantrieb und dem Energiebedarf eines RBGs auf Basis von Lei-

stungsmessungen untersucht [Sch-2012a]. Damit legt diese Arbeit einen wichtigen Grundstein für die Untersuchungen, die auch im Verlauf dieser Arbeit durchgeführt werden. Zusätzlich schlagen die Autoren bereits verschiedene Möglichkeiten zu einem energieeffizienteren Betrieb von RBGs vor. Zum Beispiel wird eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit in Betriebszeiten mit niedriger Auslastung vorgeschlagen. Das Konzept der isoenergetischen Fächer, also von Lagerfächern, die mittels des gleichen Energiebedarfs angefahren werden können, wird vorgestellt. Dieses wird dann im Rahmen der zweiten Untersuchung noch einmal genauer ausgeführt [Sch-2012b]. Den Abschluss dieser Forschungsarbeiten stellen der Forschungsbericht von Zadek et al. [Zad-2014] und die Dissertation von Schulz [Sch-2014] dar. In dieser Dissertation werden verschiedene Betriebsstrategien und Maßnahmen für die Senkung des Energiebedarfs von RBGs vorgestellt. Die Untersuchungen sind für ein spezifisches AKL durchgeführt worden, sind aber in Teilen auf APLs übertragbar [Sch-2014, S. 188]. Im Rahmen der Arbeiten von Schulz et al. wurden Energiebedarf und Durchsatz noch nicht in direkten Zusammenhang mit der EE eines RBGs gesetzt.

Ausgehend vom Forschungsprojekt „Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik“ (Forschungsbericht siehe [Bru-2012]) wurden von Braun et al. Untersuchungen zur Prognose des Energiebedarfs von RBGs durchgeführt [Bra-2016b]. In ihrer Dissertation hat sich Braun umfassend mit der Modellbildung der elektrischen Antriebe von AKLs und APLs befasst [Bra-2016a]. In dieser Arbeit wurden mehrere Industrieanlagen mittels Messungen untersucht.

Aus dem oben erwähnten Forschungsprojekt gehen auch umfassende Untersuchungen zum elektrischen Antriebssystem von RBGs am Lehrstuhl fml hervor, die von Ertl und Günthner et al. durchgeführt wurden. Im Rahmen dieser umfassenden Untersuchungen haben Ertl und Günthner et al. auch den Grundstein für diese Forschungsarbeit gelegt. Bereits 2011 haben sie die EE als wichtigen Wettbewerbsfaktor für die Intralogistik identifiziert [Gün-2011a; Gün-2011b]. Ertl und Günthner haben dann 2013 einen ersten Vorschlag für die Klassifizierung der EE eines AKLs geliefert [Ert-2013a; Ert-2014] und sich in [Ert-2013b; Ert-2013c] mit der analytischen Berechnung des mittleren Energiebedarfs von AKLs beschäftigt. Diese Forschungsarbeiten wurden 2016 mit dem Beitrag [Ert-2016b] und der Dissertation von Ertl [Ert-2016a] abgeschlossen. Darin wurde der Energiebedarf und die Energieeffizienz von AKLs ausführlich untersucht, jedoch sind APLs nicht Teil dieser Betrachtungen.

Verbraucher und Grundlast Grundsätzlich tragen alle elektrischen Verbraucher an einem RBG zu dessen Energiebedarf bei. Ein Schema der elektrischen Verbraucher, aufgeteilt auf den stationären und den mitfahrenden Schaltschrank, sind in Abbildung

2-5 zu sehen. Der stationäre Schaltschrank wird über einen dreiphasigen Netzanschluss betrieben. Aus dem stationären Schaltschrank werden meist der Steuerrechner, die Kommunikationseinheit, Teile der Beleuchtung und weitere Verbraucher versorgt. Über Schleifleitungen wird nachfolgend der mitfahrende Schaltschrank samt seiner Verbraucher versorgt. Dazu zählen eine Kommunikationseinheit, die Positionserfassung, die Leistungselektronik und weitere Verbraucher, die alle der Grundlast P_{GL} zuzurechnen sind. Die Grundlast ist die elektrische Leistung des RBGs, die bei Stillstand des Geräts aufgenommen wird. Außerhalb der Grundlast fallen die Leistung der Antriebsmotoren, die Umrichterverluste und weitere elektrische Verluste, die durch den Betrieb der Motoren entstehen, an. [Fot-2018, S. 52]

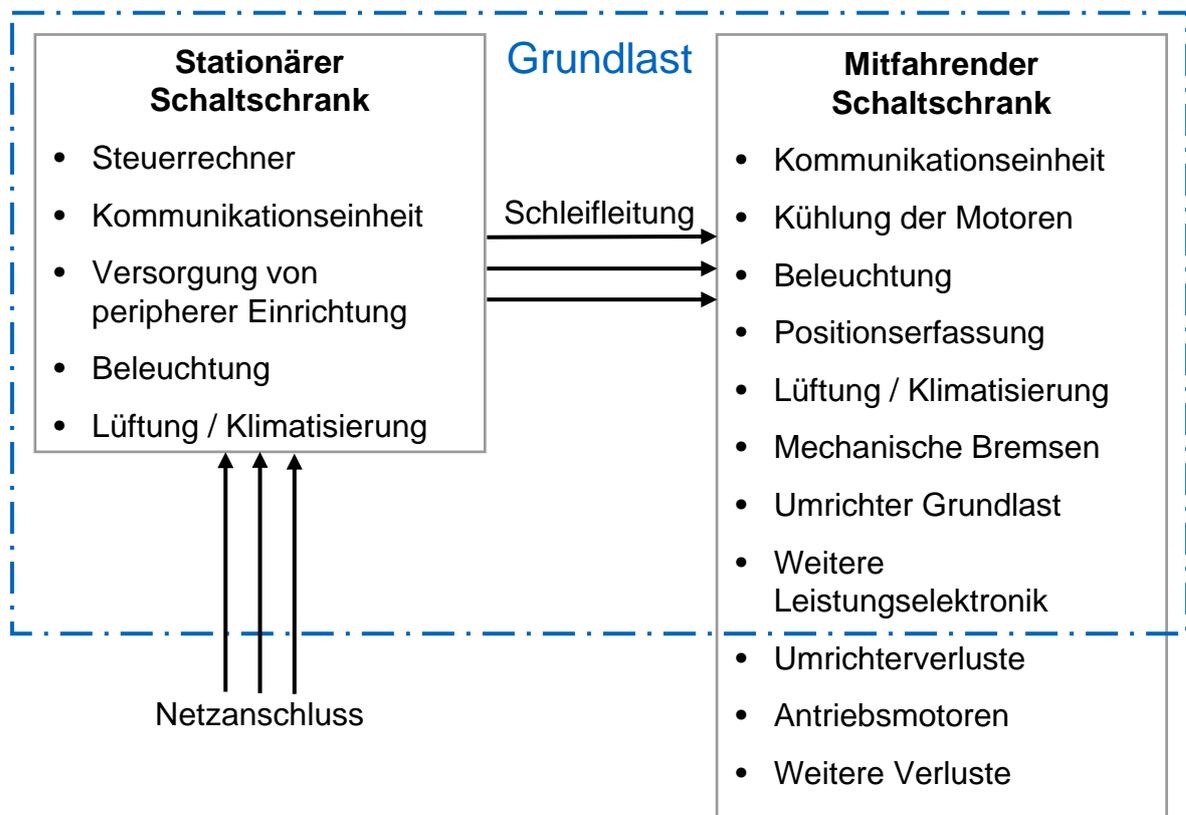


Abbildung 2-5: Schema der elektrischen Verbraucher eines RBGs (vgl. [Fot-2018, S. 52])

Antriebe Die Antriebsmotoren werden über Frequenzumrichter geregelt. Dazu wird im mitfahrenden Schaltschrank in den Frequenzumrichtern zunächst eine Gleichspannung und anschließend wieder eine frequenzgeregelt Wechselspannung erzeugt. Meistens sind die Gleichspannungsseiten der Frequenzumrichter über einen sogenannten Gleichspannungs-Zwischenkreis gekoppelt. Die Leistung der Antriebsmotoren, meist Drehstrom-Asynchronmaschinen, wird über Getriebe auf die mechanischen Antriebe übertragen. Diese können unterschiedlich ausgeführt sein. Für den Fahrtrieb kommen zugmittelgeführte Antriebe (Riemenantriebe), Rei-

bradantriebe oder angetriebene Fahrräder zum Einsatz. Für AKLs werden meistens Riemenantriebe verwendet, da nur diese für sehr hohe Beschleunigungen (größer 3 m/s^2) geeignet sind. Diese Antriebsform wird oft mit einem feststehenden Riemen realisiert (Omega Antrieb). Im APL Bereich kommen meist angetriebene Fahrräder oder seltener Reibradantriebe zum Einsatz.

Im Bereich des Hubantriebs werden im AKL meist Riemenantriebe mit umlaufendem Riemen verwendet. Im APL Bereich werden meist Seilhubwerke eingesetzt. Diese sind teilweise mit einem Gegengewicht ausgestattet. Es existieren auch APLs bei denen ein umlaufender Riemen für den Hubantrieb verwendet wird. Im LAM sind mitunter mehrere Motoren zur Ansteuerung verschiedener Funktionen verbaut. Dazu zählen unter anderem das Ausfahren und die Bewegung von Riemen oder Ketten, mit denen die Ladungsträger bewegt werden. Im Standardfall besitzt das LAM aber nur die Funktion des Ein- und Ausfahrens und diese wird von einem einzigen Motor übernommen.

Bremsenergienutzung Im Betrieb von RBGs finden häufig Bremsvorgänge statt. Diese werden durch generatorisches Bremsen der Antriebsmotoren realisiert. Die dabei anfallende elektrische Energie wird je nach Ausstattung unterschiedlich genutzt. Industrieller Standard ist die Realisierung der Zwischenkreiskopplung. Dabei wird die Bremsenergie, die an einem Antrieb anfällt, über den Zwischenkreis an den anderen Antrieb übertragen. Diese kann dort aber nur genutzt werden, wenn der Antrieb gerade entsprechend elektrische Leistung benötigt. Die sich daraus ergebenden Kopplungen der einzelnen Fahrbewegungen und die daraus resultierenden Leistungsverläufe werden in Abschnitt 5.2 näher beleuchtet. Es kann neben einem Zwischenkreis auch zusätzlich eine Rückspeiseeinheit verbaut sein. Die Rückspeiseeinheit wandelt elektrische Leistung, die beim Bremsen im Gleichstrom-Zwischenkreis anfällt, so um, dass sie direkt in das Netz zurückgespeist werden kann. Die zusätzliche Leistungselektronik der Rückspeiseeinheit sorgt für eine erhöhte Grundlast. [Ert-2016a, S. 15–18]

Zusätzlich zu den untersuchten Maßnahmen gibt es auch die Möglichkeit einen Zwischenspeicher im elektrischen System zu realisieren. Dieser wird oft in Form eines hoch entwickelten Doppelschichtkondensators⁵ verbaut. Zum Beispiel hat die Firma Dambach dieses System in ihren APLs realisiert [DAM-2016]. Ähnliche Systeme werden auch von anderen Firmen wie Viastore oder Jungheinrich eingesetzt. Einerseits erlaubt ein solcher Zwischenspeicher die Nutzung der Bremsenergie direkt im Gleichspannungsteil der Leistungselektronik. Das bietet im Vergleich zur Rückspeiseeinheit den Vorteil, dass ein besserer Wirkungsgrad erzielt werden kann. Durch die Nutzung eines Superkondensators ergibt sich zusätzlich eine Möglichkeit zur Senkung der auf-

⁵ Wird im weiteren Verlauf der Arbeit als Superkondensator bezeichnet.

genommenen Leistungsspitzen. Wie in Kapitel 4 gezeigt wird, sind die Leistungsspitzen im Vergleich zur mittleren aufgenommenen Leistung bei RBGs sehr hoch. Diese Vorteile werden auch von Gebhardt beschrieben [Geb-2018]. Ertl hat die Anwendung eines Zwischenspeichers beschrieben, aber nicht in seiner Untersuchung berücksichtigt [Ert-2016a, S. 29–30].

Von 2014 bis 2016 wurde ein Forschungsprojekt von der Universität Magdeburg zu diesem Thema durchgeführt („ENumie – Effiziente Nutzung frei werdender mechanischer Energie durch den Einsatz von Energiespeichertechnologien bei Regalbediengeräten“). Es gibt aber weder Veröffentlichungen noch einen Abschlussbericht zum Projekt⁶.

Die Firma Jungheinrich hat 2018 eine neue Generation von AKLs vorgestellt, die mit Superkondensatoren als Zwischenspeicher ausgestattet sind. Bei diesen AKLs werden die Bremsenergienutzung und die Reduktion der aufgenommenen Leistungsspitzen als größte Vorteile beschrieben [Kau-2018].

2.1.3 Spielarten beim Betrieb eines RBG

Unter einem Spiel versteht man die Summe von Bewegungen und Wartezeiten, die zur Bewegung von Ladeeinheiten führt. RBGs werden in verschiedenen Spielarten betrieben. Nach Gudehus sind die Spielarten den Bewegungsstrategien zuzuordnen [Gud-2012b, S. 648]. Es wird generell zwischen Einzel-, Doppel- und Mehrfachspielen unterschieden. Das Einzelspiel dient zur Ein- oder Auslagerung eines einzelnen Behälters. Für einen Einlagervorgang beinhaltet es die Aufnahme der Ladeeinheit, die Fahrt vom I/O Punkt zum Einlagerfach, den Einlagervorgang und die Rückfahrt zum I/O Punkt [FEM-9851]. Bei einem Doppelspiel fährt das RBG nach einer Einlagerung zu einem anderen Fach und führt dort eine Auslagerung durch. Hat ein RBG ein LAM mit einer Kapazität von mehr als einer Ladeeinheit oder mehrere LAMs, dann sind Mehrfachspiele möglich. Diese können auf unterschiedliche Weise ausgeführt werden. Mit dem Einsatz von zwei LAMs haben sich Dörr und Furmans beschäftigt [Dör-2016]. In der Dissertation von Dörr wurde der Durchsatz von AKLs und APLs mit zwei LAMs in doppeltiefen HRLs detailliert untersucht [Dör-2018]. Im Rahmen ihrer Arbeit wurden viele mögliche Betriebsstrategien für solche HRLs entwickelt und miteinander verglichen. Das Problem der Lagerplatzzuordnung und der Sequenzierung der Aufträge beim Einsatz von zwei LAMs wurde darüber hinaus von Wauters et al. untersucht [Wau-2016]. Die Bewegungen bei Einzel-, Doppel- und Vierfachspiel sind schematisch in Abbildung 2-6 dargestellt. Beim Einzelspiel kann eine Einlagerung oder eine Auslagerung an der markierten Position stattfinden. Beim Doppelspiel findet nach der Einlagerung

⁶ <https://forschung-sachsen-anhalt.de/project/enumie-effiziente-nutzung-frei-werdender-18135>, aufgerufen am 24.09.2021

eine Auslagerung statt. Beim Vierfachspiel kann nach einer Einlagerung entweder eine Auslagerung, oder eine weitere Einlagerung stattfinden. Damit ergeben sich zwei mögliche Vierfachspiele⁷.

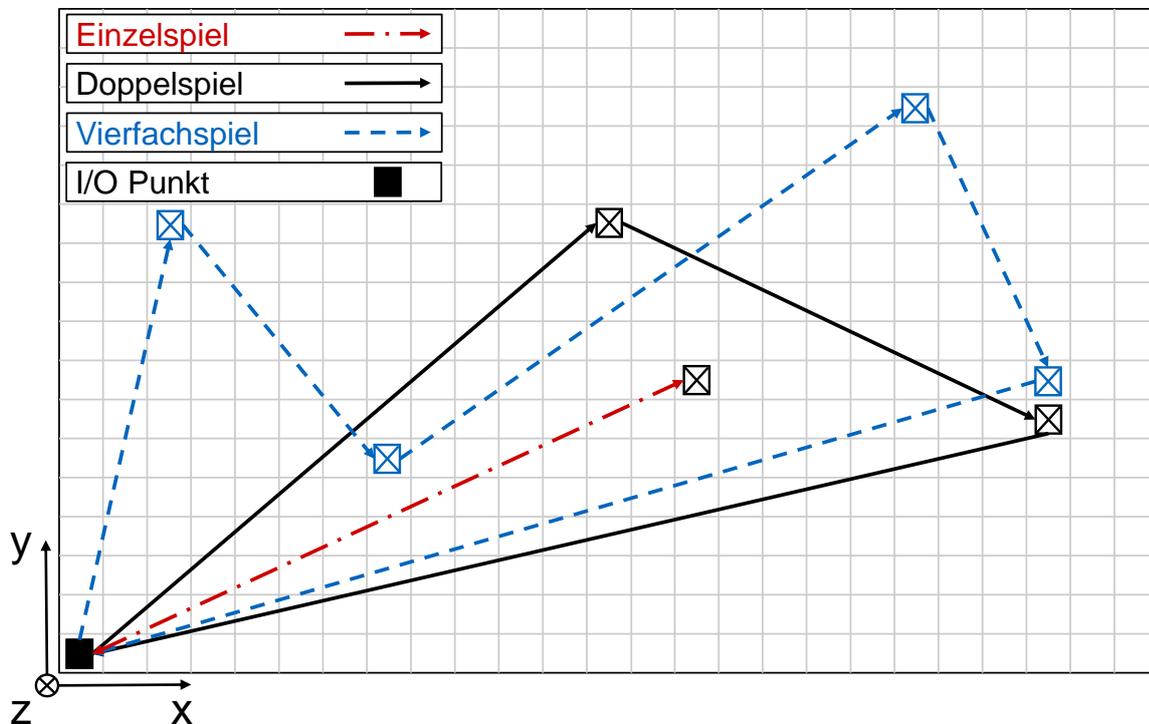


Abbildung 2-6: Darstellung eines Einzel-, Doppel- und Vierfachspiels vor einer Lagerwand (vgl. [Rüc-2020b])

In den nachfolgenden Untersuchungen werden nur der Einzel- und der Doppelspielbetrieb betrachtet. Mit einer optimierten Zusammenstellung von Aufträgen zu Doppelspielen zur Senkung des Energiebedarfs haben sich Meneghetti und Monti beschäftigt [Men-2011].

Referenzspiele Für die Abnahme von RBGs werden in der Praxis spezielle Testspiele⁸ verwendet. Diese Spiele repräsentieren die mittlere Spielzeit und damit den mittleren Durchsatz eines RBGs bei zufälliger Lagerplatzverteilung und einer daraus resultierenden Gleichverteilung. Dabei kommen Spiele nach FEM 9.851 oder nach VDI 3561 zum Einsatz [FEM-9851; VDI-3561]. In der FEM 9.851 werden Einzel- und Doppelspiele zur Bestimmung der Spielzeiten beschrieben. Eine Erweiterung der FEM, im Sinne eines Referenzvierfachspiels, ist von Azzi et al. bereits 2011 vorgeschlagen worden [Azz-2011]. In ihrer Arbeit haben sie mithilfe einer Monte Carlo Simulation von

⁷ 1. Einlagerung \Rightarrow Auslagerung \Rightarrow Einlagerung \Rightarrow Auslagerung

2. Einlagerung \Rightarrow Einlagerung \Rightarrow Auslagerung \Rightarrow Auslagerung

⁸ Im weiteren Verlauf der Arbeit werden diese Spiele als Referenzspiele bezeichnet.

Vierfachspielen die Fachpositionen für ein Referenzvierfachspiel ermittelt. Im Rahmen einer vom Autor dieser Dissertation betreuten Studienarbeit von Rief wurde eine analoge Untersuchung für ein Referenzvierfachspiel für den mittleren Energiebedarf durchgeführt [Rie-2018]. Die Untersuchungen zum Referenzspiel in Abschnitt 7.3 basieren auf diesen beiden Arbeiten.

2.1.4 Kinematik

Die Kinematik der Antriebe eines RBGs spielt eine große Rolle für den Durchsatz und die Belastung der Struktur des Masts. Gängige Steuerungen der Antriebe von RBGs arbeiten mit sogenannten 7-Phasen Bewegungen. Diese Steuerungen verwenden neben Geschwindigkeit und Beschleunigung, auch den Ruck als Steuerungsgröße des Geschwindigkeitsprofils. Der Ruck J ist die zeitliche Ableitung der Beschleunigung. Mithilfe der Vorgabe des Ruckprofils wirkt nicht sofort die maximale Beschleunigung und die wirkenden Beschleunigungskräfte werden reduziert. Dies führt auch zu einer geringeren Schwingungsanregung der Struktur. Die Messung der Beschleunigung und die anschließende Auswertung der Verläufe der kinematischen Parameter wurde zusammen mit Karzel untersucht [Kar-2019]. Mit dem vorgestellten Messsystem wurden auch die Beschleunigungsmessungen in Kapitel 4 durchgeführt. Die Schwingungsanregung des Masts wurde darüber hinaus in einer vom Autor dieser Dissertation betreuten Studienarbeit von Karzel betrachtet [Kar-2019]. Die Reduktion von Schwingungen durch geeignete Regelung der Antriebe wurde zum Beispiel von Berger untersucht [Ber-2018].

Die Verläufe für Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck sind für eine exemplarische Fahrbewegung in Abbildung 2-7 dargestellt. Bei der gezeigten Bewegung wird eine Fahrstrecke von $s = 10$ m zurückgelegt. Die maximale Beschleunigung erreicht dabei einen Wert von $a_{\max} = 1,25$ m/s² und die maximale Geschwindigkeit einen Wert von $v_{\max} = 2,5$ m/s.

In der Darstellung sind die 7-Phasen der Bewegung gekennzeichnet. Diese Phasen können auf die Beschleunigung und den Ruck bezogen werden (vgl. [Rüc-2018b] und [Fot-2018, S. 55]):

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 Verzögerung⁹ (kein Ruck)
7. Konstant abnehmende Verzögerung (konstant positiver Ruck).

⁹ Eine negative Beschleunigung wird im Rahmen der Arbeit als Verzögerung bezeichnet.

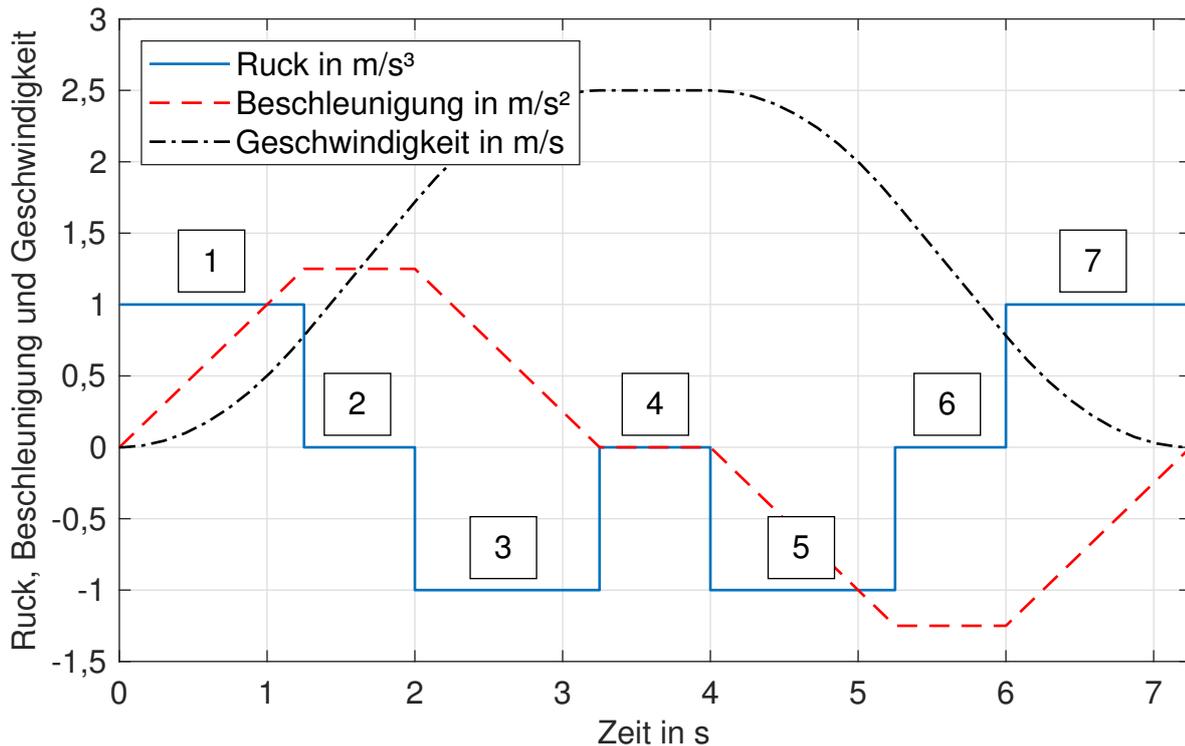


Abbildung 2-7: Verlauf der kinematischen Parameter Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit bei einer 7-Phasen Bewegung eines RBGs (vgl. [Rüc-2018b])

Die Beschleunigung verläuft trapezförmig und erzeugt damit einen sogenannten Verschleiß¹⁰ im Verlauf der Geschwindigkeit. In älteren Steuerungen kommt manchmal noch eine 3-Phasen Bewegung zum Einsatz. Die 3-Phasen Bewegung kann auch als Vereinfachung der 7-Phasen in der Berechnung benutzt werden. Der analoge Verlauf¹¹ der obigen 7-Phasen Bewegung ist in Abbildung 2-8 für eine 3-Phasen Bewegung dargestellt. Die maximale Beschleunigung liegt nur bei $a_{\max} = 0,77 \text{ m/s}^2$. Diese springt auf einen festen Wert und wird dann über einen längeren Zeitraum gehalten, um die gleiche Gesamtfahrzeit $t_{\text{ges}} = 7,25 \text{ s}$ zu erreichen.

Bei der 3-Phasen Bewegung reduziert sich die Bewegung auf die folgenden Phasen:

1. Konstante zunehmende Geschwindigkeit (konstante Beschleunigung)
2. Konstante Geschwindigkeit (keine Beschleunigung)
3. Konstant abnehmende Geschwindigkeit (konstante Verzögerung).

Für sogenannte Spitzfahrten, also Fahrten, bei denen die maximale Geschwindigkeit aufgrund der kurzen Fahrstrecke nicht erreicht wird, reduziert sich die Anzahl an Phasen um jeweils die Phase konstanter Geschwindigkeit. Um die 3-Phasen Bewegung zu

¹⁰Der Verschleiß bezeichnet den Übergang des Geschwindigkeitsprofils zwischen Beschleunigungsphasen und Phasen konstanter Geschwindigkeit. Ein stärkerer Verschleiß bezeichnet einen runderen Übergang.

¹¹gleiche Fahrstrecke und gleiche Gesamtfahrzeit

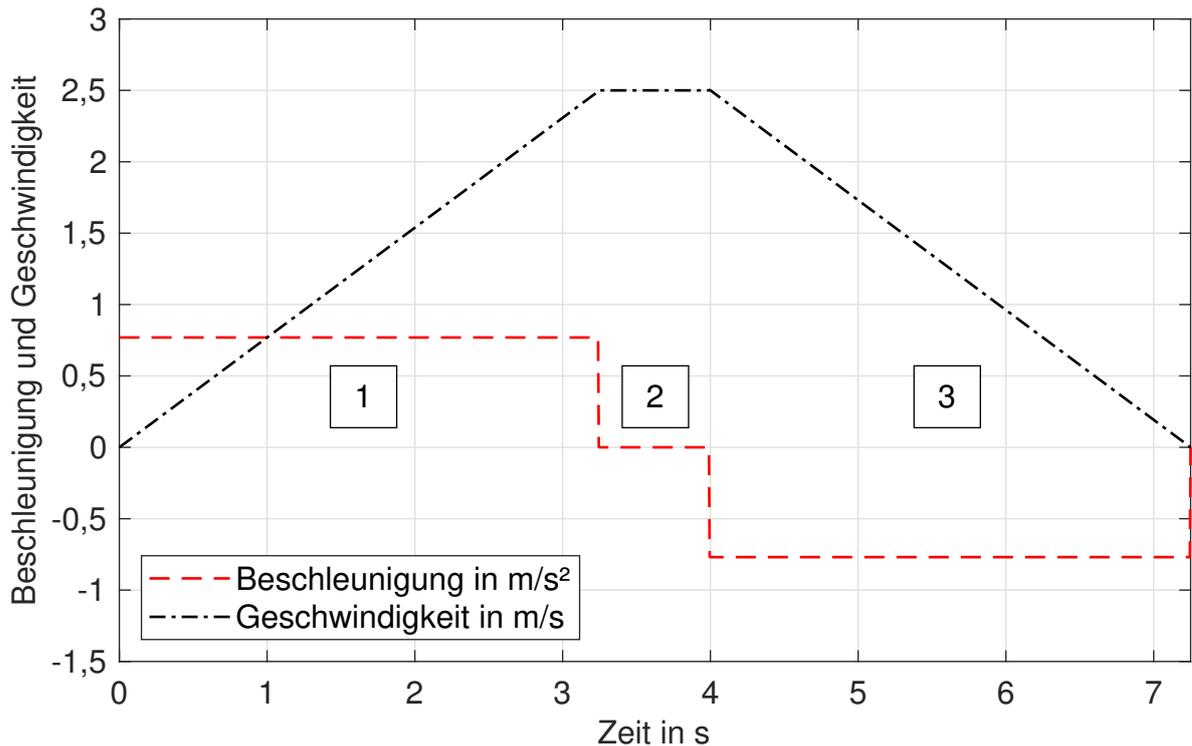


Abbildung 2-8: Verlauf der kinematischen Parameter Beschleunigung und Geschwindigkeit bei einer 3-Phasen Bewegung eines RBGs

beschreiben, kommen einige einfache Gleichungen ins Spiel. Diese bilden die Basis für die Berechnung der Fahrzeit und der Leistung in Abschnitt 5.2.

Normalfahrt Als Normalfahrt wird eine Bewegung bezeichnet, bei der s_{ges} lang genug ist, dass v_{max} erreicht werden kann. Für die Normalfahrt berechnet sich die Gesamtfahrzeit in x- oder y-Richtung t_{ges} mit den Fahrzeiten für Beschleunigung t_{B} , Konstantfahrt t_{K} und Verzögerung t_{V} . Analog dazu ist auch die Strecke s_{ges} mit ihren drei Bestandteilen s_{B} , s_{K} und s_{V} in Gleichung 2-1 definiert. In den meisten Fällen ist die Gesamtstrecke einer Fahrt vorgegeben und die kinematischen Parameter sind bekannt. Die Beschleunigungszeit t_{B} ist gleich der Verzögerungszeit t_{V} .

$$t_{\text{ges}} = t_{\text{B}} + t_{\text{K}} + t_{\text{V}} = 2 \cdot t_{\text{B}} + t_{\text{K}} \quad (2-1)$$

$$s_{\text{ges}} = s_{\text{B}} + s_{\text{K}} + s_{\text{V}} = 2 \cdot s_{\text{B}} + s_{\text{K}}$$

Die Beschleunigungszeit t_{B} lässt sich über die maximale Geschwindigkeit v_{max} und die maximale Beschleunigung a_{max} ausdrücken. Das Ergebnis kann wiederum in die Gleichung für t_{ges} eingesetzt werden (siehe Gleichung 2-2).

$$t_{\text{B}} = \frac{v_{\text{max}}}{a_{\text{max}}} \implies t_{\text{ges}} = 2 \cdot \frac{v_{\text{max}}}{a_{\text{max}}} + t_{\text{K}} \quad (2-2)$$

Anschließend lässt sich die Zeit t_K über die Strecke s_K und v_{\max} ausdrücken (siehe Gleichung 2-3).

$$t_K = \frac{s_K}{v_{\max}} \quad (2-3)$$

Mit den Gleichungen in 2-4 kann abschließend die Strecke s_K über bekannte Parameter ausgedrückt werden.

$$\begin{aligned} s_K &= s_{\text{ges}} - 2 \cdot s_B \\ s_B &= \frac{a_{\max} \cdot t_B^2}{2} \\ \implies s_K &= s_{\text{ges}} - a_{\max} \cdot t_B^2 \end{aligned} \quad (2-4)$$

Abschließend wird die obige Gleichung für s_K in Gleichung 2-3 eingesetzt um t_K zu bestimmen (siehe Gleichung 2-5).

$$t_K = \frac{s_{\text{ges}}}{v_{\max}} - \frac{a_{\max} \cdot t_B^2}{v_{\max}} = \frac{s_{\text{ges}}}{v_{\max}} - \frac{a_{\max} \cdot \frac{v_{\max}^2}{a_{\max}^2}}{v_{\max}} = \frac{s_{\text{ges}}}{v_{\max}} - \frac{v_{\max}}{a_{\max}} \quad (2-5)$$

Abschließend wird Gleichung 2-5 in Gleichung 2-2 eingesetzt und man erhält die Formel zur Berechnung von t_{ges} in Gleichung 2-6.

$$t_{\text{ges}} = \frac{v_{\max}}{a_{\max}} + \frac{s_{\text{ges}}}{v_{\max}} \quad (2-6)$$

Spitzfahrt Als Spitzfahrt wird eine Bewegung bezeichnet, bei der s_{ges} zu kurz ist, um v_{\max} zu erreichen. Für die Spitzfahrt ist die Berechnung einfacher. Hier werden t_{ges} und s_{ges} nach Gleichung 2-7 beschrieben.

$$\begin{aligned} t_{\text{ges}} &= t_B + t_V = 2 \cdot t_B \\ s_{\text{ges}} &= s_B + s_V = 2 \cdot s_B \end{aligned} \quad (2-7)$$

Die Beschleunigungszeit t_B kann über a_{\max} und s_{ges} nach Gleichung 2-8 bestimmt werden.

$$t_B = \sqrt{\frac{2 \cdot s_B}{a_{\max}}} = \sqrt{\frac{s_{\text{ges}}}{a_{\max}}} \quad (2-8)$$

Abschließend kann Gleichung 2-8 in Gleichung 2-7 eingesetzt werden und man erhält die Gesamtfahrzeit nach Gleichung 2-9.

$$t_{\text{ges}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{s_{\text{ges}}}{a_{\text{max}}}} \quad (2-9)$$

2.2 Energieeffizienz im relevanten Kontext der Intralogistik

In diesem Abschnitt werden weitere wichtige Forschungsarbeiten beleuchtet. Zunächst wird die Definition von EE, die im Rahmen dieser Arbeit Verwendung findet, wiedergegeben. Anschließend werden weitere relevante Publikationen und deren Inhalte vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf die Lücken dieser Arbeiten im Vergleich zu den eigenen Forschungsinhalten eingegangen.

Definition Energieeffizienz Energieeffizienz ist das Verhältnis von Ertrag¹² an Leistung, Dienstleistung, Waren oder Energie und der eingesetzten Energie [Eur-2012].

Das Thema EE im Bereich der Intralogistik ist schon länger in der Forschung präsent. Günthner et al. haben bereits 2009 eine „Roadmap für eine nachhaltige Intralogistik“ [Gün-2009a] (siehe Abschnitt 1.2) veröffentlicht. Dabei gehen sie sowohl auf die Einsparungspotenziale von Stetigförderern, Unstetigförderern, Lagerbereich und Gebäude, als auch auf den Weg hin zu einer nachhaltigeren Intralogistik, ein.

Altintas et al. haben 2010 die Potenziale für einen Wandel zur „grünen“ Intralogistik hin beschrieben [Alt-2010]. Sie haben in ihrer Arbeit im Rahmen von Expertenbefragungen unter anderem die Motivation für den Einsatz nachhaltiger Technologien und die Entscheidungskriterien für Investitionen untersucht. Sie kommen zu dem Schluss, dass sich effiziente Technologien auch zur Kostensenkung eignen und nicht nur einen positiven Marketingeffekt haben. Diese beiden Arbeiten stellen eine erste Grundlage für weitere Forschungsarbeiten in diesem Bereich dar.

Im Bereich der elektrischen Antriebstechnik wurde von Borcharding et al. 2012 ein großes Verbundprojekt („Intelligente Antriebs- und Steuerungstechnik für energieeffiziente Intralogistik“) zur ganzheitlichen Betrachtung von Prozessen und technischen Komponenten in der Intralogistik bearbeitet [Bor-2013a]. Das Projekt wurde 2015 abgeschlossen, allerdings wurde kein Abschlussbericht publiziert. Damit können die Ergebnisse leider nicht weiter berücksichtigt werden.

Von Bornschlegl et al. wurde 2013 ein Vorschlag für die Vorgehensweise zur Ermittlung einer Kennzahl im Bereich der Betrachtung des Energiebedarfs vorgestellt

¹²Dieser Ertrag wird im Rahmen der Arbeit als Nutzen bezeichnet.

[Bor-2013b]. Dazu haben sie ein 5-Phasen Modell und eine Kennzahlentwicklungskette zur technischen Umsetzung präsentiert. Diese Kennzahlentwicklungskette ist stark auf Produktionsprozesse abgestimmt und damit nur bedingt für die Untersuchungen in dieser Arbeit geeignet.

Lerher et al. haben 2014 eine Bewertung der EE von AKLs auf Basis des geforderten Durchsatzes und des Energiebedarfs vorgestellt [Ler-2014]. Dabei wird auch die durch den Energiebedarf verursachte CO₂ Emission mit berücksichtigt. Dieses Modell stellt eine erste Möglichkeit zur Bewertung der EE von AKLs dar. In der Untersuchung wird der Einfluss der kinematischen Parameter von Fahr- und Hubantrieb auf Durchsatz und Energiebedarf in drei unterschiedlich großen HRLs beschrieben. Weitere logistische Kenngrößen wie die Lagergröße spielen hier nur eine indirekte Rolle. Zur Bewertung wird noch keine Effizienzkennzahl im Sinne eines Verhältnisses von Nutzen und Energiebedarf verwendet und es werden keine APLs betrachtet.

Voß et al. haben sich mit der Auftragsplanung zur Steuerung des Energieniveaus in einem HRL befasst [Voß-2014]. In dieser Arbeit wird ein Konzept zur Nutzung eines HRLs als Energiespeicher, analog zu einem Pumpspeicherwerk, vorgestellt. Dabei wird auch ein Konzept vorgestellt, das die maximalen Leistungsspitzen in einem HRL begrenzt. In einem größeren Umfang haben Hahn-Woernle und Günthner in ihren Untersuchungen ein komplettes HRL mit mehreren RBGs betrachtet, um mithilfe der Auftragsplanung die Leistungsspitzen des kompletten Systems zu begrenzen [Hah-2017]. In seiner Dissertation hat Hahn-Woernle die „Reduzierung der Betriebskosten mehrgassiger Lagersysteme mittels elektrischem Lastmanagement“ umfassend untersucht [Hah-2018]. In seiner Arbeit werden sowohl AKLs als auch APLs betrachtet. Er hat dazu ein detailliertes Modell zur Simulation der aufgenommenen elektrischen Leistung von RBGs in AKLs und APLs präsentiert. Der Fokus in seinen Untersuchungen lag auf den Haupteinflussfaktoren für die Durchsatzleistung des Lagersystems. Es erfolgte keine detaillierte Untersuchung der Einflüsse auf Durchsatz und den Energiebedarf eines einzelnen RBGs.

Neben den Bewegungsstrategien gibt es auch die Haltepunktstrategien, also die Strategien zur Entscheidung an welche Position ein RBG nach einer Ein- oder Auslagerung zurückkehrt. Bei einer Einlagerung kann es theoretisch an seiner Position im Lager verharren. Bei einer Auslagerung ist das Verharren nach der Abgabe der Ladeinheit am I/O Punkt möglich. Eine frühe Untersuchung dieses Problems wurde von van den Berg durchgeführt [Ber-2002]. Dabei wird ein analytischer Ansatz zur Berechnung des optimalen Haltepunkts für hohe Durchsätze bei chaotischer Lagerplatzverteilung oder mit einer Zonierung des Lagers vorgestellt. Der optimale Haltepunkt hängt dabei maßgeblich von der Wahrscheinlichkeit ab, ob der nächste Auftrag des RBGs eine Ein-

oder Auslagerung ist. Wenn die Wahrscheinlichkeit für eine Einlagerung höher ist als für eine Auslagerung, dann ist der I/O Punkt die beste Alternative für den Haltepunkt. Im umgekehrten Fall ist eine Position innerhalb des HRLs zu wählen. Diese Position innerhalb des HRLs lässt sich mit der vorgestellten analytischen Methode bestimmen. Meneghetti und Monti haben sich mit der Bestimmung des optimalen Haltepunkts in Bezug auf eine Minimierung des Energiebedarfs beschäftigt [Men-2013]. In dieser Arbeit präsentieren sie unter anderem einen Vorschlag zur Zonierung eines Lagers in Abhängigkeit von der Masse der Ladeeinheiten zur Senkung des Energiebedarfs. Die Arbeiten von van den Berg und Meneghetti und Monti untersuchen jeweils einzelne strategische Aspekte ohne die gleichzeitige und systematische Berücksichtigung von physikalischen Parametern. Im Rahmen der eigenen Untersuchungen wird der I/O Punkt als Haltepunkt verwendet.

In der FEM 9.865 „Energy consumption – determination methods (ECoDeMISE)“ wird eine umfassende Methode zur Berechnung des Energiebedarfs von Intralogistikanlagen vorgestellt [FEM-9865]. Darin enthalten sind auch verschiedene Berechnungsmethoden zur Bestimmung des Energiebedarfs von RBGs [FEM-9865, S. 133–147]. Diese Berechnungsmethoden stellen auch die Grundlage für die Entwicklung des Simulationsmodells in Kapitel 5 dar. Zusätzlich wird in der FEM 9.865 ein auf der Arbeit von Braun basierender Referenzzyklus zur Bestimmung des Energiebedarfs auf Basis von Messungen vorgestellt [FEM-9865, S. 142–143] (siehe auch [Bra-2016a, S. 170–171]). Dieser Referenzzyklus ist für die Validierung eines Berechnungs- oder Simulationsmodells geeignet, erlaubt aber keine direkte Bestimmung des mittleren Energiebedarfs eines RBGs.

Rajković et al. haben eine multikriterielle Optimierungsmethode für Kosten, Spielzeit und CO₂-Emission eines automatischen HRLs mit RBGs vorgestellt [Raj-2019]. Dabei werden analytische Gleichungen zur Berechnung der Faktoren eingesetzt. Damit kann eine Optimierung für ein zu planendes HRL mit RBGs durchgeführt werden. Die vorgestellten analytischen Berechnungsmethoden lassen sich gleichermaßen auf AKLs und APLs anwenden, sind aber nicht für eine detaillierte Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter geeignet.

Untersuchungen an Stetigförderern Im Bereich der EE von Stetigförderern haben Lottersberger und Jodin grundlegende Forschungsarbeiten veröffentlicht [Lot-2015]. Sie benutzen zum ersten Mal den Begriff „Logistische Leistung“ für den Nutzen. Zusätzlich verwenden sie verschiedene Betriebszustände, die unterschiedliche Auslastungen eines Rollenförderers repräsentieren. Abschließend hat Lottersberger

in seiner Dissertation „Beitrag zu einer energieeffizienten Materialflusstechnik – Grundlagen zur Ermittlung, zum Vergleich und zur Steigerung der Energieeffizienz“, eine Bewertung der EE mittels einer Kennzahl vorgestellt [Lot-2016]. Diese Kennzahl beschreibt einen Zusammenhang zwischen der Anzahl an transportierten Fördererheiten, der Förderstrecke und der aufgenommenen elektrischen Leistung. Diese Bewertung in Form einer aus physikalischen Größen gebildeten Kennzahl stellt auch ein Vorbild für die in Abschnitt 7.1 entwickelte Kennzahl dar.

Zusätzlich haben sich Habenicht et al. mit der Ermittlung des Energiebedarfs von Intralogistiksystemen in der Planungsphase befasst [Hab-2013]. In seiner Dissertation hat Habenicht abschließend eine Methode zur „Energiebedarfsermittlung einzelner Elemente von Stückgut-Stetigförderanlagen“ präsentiert [Hab-2018]. Damit können neben einer genauen Bestimmung des gesamten Energiebedarfs auch gezielt hochbelastete Fördersegmente identifiziert und optimiert werden.

Bewertung von Aufzügen Eine wichtige Grundlage zur Bewertung von anderen Geräten wurde mit der VDI-4707 Richtlinie geschaffen. Diese beinhaltet eine Bewertung der EE von Aufzügen [VDI-4707-1; VDI-4707-2]. Dabei werden verschiedene Nutzungskategorien für die Geräte definiert und insbesondere eine Stillstandszeit berücksichtigt. Zusätzlich werden detaillierte Anforderungen zur Messung des Energiebedarfs beschrieben. In Blatt 1 ist eine Bewertungsmethode für die EE des kompletten Geräts enthalten [VDI-4707-1]. In Blatt 2 hingegen werden einzelne Bewertungen für die EE der Komponenten und Berechnungsmethoden für den Energiebedarf dieser Komponenten beschrieben [VDI-4707-2]. Die Bewertung des kompletten Aufzugs erfolgt auf Basis eines spezifischen Energiebedarfs. Dieser stellt einen Kehrwert der Energieeffizienz dar. Die von Ertl entwickelte Bewertung für AKLs basiert auf der Bewertung in [VDI-4707-1]. Es kommen in beiden Fällen getrennte Bewertungen des Stillstands und der Fahrbewegungen zum Einsatz (vgl. [VDI-4707-1, S. 11–14] und [Ert-2016a, 168–171]). Die Wichtigkeit des Energiebedarfs des Stillstands wird auch in der eigenen Arbeit untersucht.

Einfluss von Energieeffizienzklassen Dass die Bewertung und Klassifizierung der EE einen maßgeblichen Effekt auf die Entwicklung des Energiebedarfs von Geräten hat, kann am Beispiel der Klassifizierungen im Bereich von Haushaltsgeräten gezeigt werden. Diese Klassifizierungen werden von der Europäischen Union auch als Energielabel bezeichnet. Die Europäische Union lässt jährlich einen Bericht zu den Auswirkungen der Ecodesign Richtlinien und der Einführung von Energielabels

erstellen [Wie-2020]. Darin wird das BAU¹³ Szenario mit dem ECO¹⁴ Szenario verglichen. Für das Jahr 2020 wurde eine absolute Einsparung von ca. 1777 TWh Primärenergie von ECO gegenüber BAU berechnet. Dies entspricht einer Einsparung von 15 % bezogen auf den gesamten Energiebedarf dieser Geräte. Davon entfallen ca. 60 % auf den Haushaltssektor. Bezogen auf 2020 geht man von einer Einsparung von 10 % bezogen auf den gesamten Energiebedarf der Europäischen Union aus. Bis zum Jahr 2030 werden diese Einsparungen voraussichtlich um ca. 70 % zunehmen. Die Einführung von Energieeffizienzklassen im Bereich von Haushaltsgeräten hat also zu einer Abnahme des gesamten Energiebedarfs in diesem Sektor von ca. 10 % geführt. [Wie-2020, S. 8–9]

Wie stark die tatsächliche Energieeffizienz zugenommen hat, wurde leider nicht ausgewertet. Ein Beispiel, das im Bericht explizit ausgewertet wurde, ist die Zunahme der EE von Fernsehgeräten. Die Energieeffizienzkennzahl für Fernsehgeräte ist ein Verhältnis aus der elektrischen Leistungsaufnahme in W und der Bildschirmfläche in dm². Im Jahr 2010 lag die Energieeffizienzkennzahl für Fernsehgeräte in der Europäischen Union im Schnitt bei 5 W/dm². Bis zum Jahr 2020 sank diese Kennzahl im Schnitt auf unter 1 W/dm². Die Energieeffizienz im Jahr 2020 ist somit mehr als fünfmal höher als im Jahr 2010. [Wie-2020, S. 67]

2.3 Ableitung der Forschungslücke und der Forschungsfrage

Im Vergleich zu der Vielzahl an Untersuchungen, die im Bereich der AKLs bereits durchgeführt wurden, gibt es im Bereich der APLs bis jetzt sehr wenig Untersuchungen. Es wurden bereits einige detaillierte Untersuchungen des Durchsatzes von AKLs veröffentlicht. Für den Energiebedarf von AKLs existieren zwar weniger veröffentlichte Forschungsarbeiten, aber immer noch deutlich mehr als im Vergleich zu den Arbeiten über APLs. Die Arbeiten wurden in den ersten beiden Abschnitten bereits vorgestellt. Nachfolgend werden einige wichtige Ergebnisse der Recherche noch einmal zusammengefasst. Untersuchungen, die einen größeren Parameterraum und verschiedene Aspekte gleichzeitig betrachten, sind in [Sch-2014], [Ert-2016a] und [Bra-2016a] zu finden. Die gefundenen Zusammenhänge im Bereich des Durchsatzes sind zum Teil übertragbar auf APLs. Darüber hinaus wurden in der Untersuchung von Hahn-Woernle AKLs und APLs betrachtet [Hah-2018]. Allerdings haben diese Untersuchungen ein anderes Ziel und betrachten hauptsächlich den gesamten Durchsatz und die gesamte elektrische Leistung von mehrgassigen HRLs. Dabei werden keine Effekte auf ein

¹³Business as Usual: Ein theoretisches Szenario, das versucht den Energiebedarf ohne die Einführung der Richtlinien darzustellen.

¹⁴Das ECO Szenario versucht den tatsächlichen Energiebedarf jener Geräte, die durch die Richtlinien beeinflusst werden, darzustellen.

einzelnes RBG untersucht. Besonders beim Energiebedarf von APLs besteht eine erhebliche Lücke. Die Größen- und Massenverhältnisse sind bei APLs gänzlich anders und deswegen lassen sich Zusammenhänge aus den Untersuchungen von AKLs nicht übertragen. Ertl beschreibt die Untersuchung von APLs im Ausblick seiner Dissertation als wichtiges Thema für zukünftige Untersuchungen [Ert-2016a, S. 182]. Auch Schulz beschreibt in seiner Arbeit die Notwendigkeit zur Untersuchung des Energiebedarfs von APLs [Sch-2014, S. 188]. Untersuchungen, die Durchsatz und Energiebedarf, AKLs und APLs sowie einen großen Parameterraum abdecken, existieren bis jetzt nicht.

Zur EE existieren bereits Betrachtungen, die sich hauptsächlich auf den AKL Bereich erstrecken. In der bis jetzt vorhandenen Forschung findet sich keine gemeinsame Betrachtung der EE von AKLs und APLs. Die bisherigen EE Bewertungen von Lerher und Ertl bilden eine Basis für die in dieser Arbeit vorgestellten Bewertung. Zusätzlich wurde bei bisherigen Bewertungen noch keine Klassifizierung der EE auf Basis der Gesamtheit der physikalischen Eigenschaften von RBGs verwendet. Ertl hat bereits einen Vorschlag für die Überprüfung des mittleren Energiebedarfs auf Basis von Referenzspielen geliefert [Ert-2016a, S. 166]. Darüber hinaus existiert bis jetzt kein geprüftes Referenzspiel, mit dem die EE von RBGs in der Praxis einfach bewertet werden kann.

Analog zu den Haushaltsgeräten wird davon ausgegangen, dass die Einführung einer Bewertung und Klassifizierung grundsätzlich zu einer Verbesserung der EE von RBGs führt. Inwieweit die Ergebnisse übertragbar sind, kann für Bewertungen in der Intralogistik nicht beantwortet werden, weil vergleichbare Daten fehlen.

Die forschungsleitende Frage dieser Dissertation ergibt sich somit wie folgt:

Wie kann die Energieeffizienz von Regalbediengeräten in automatischen Hochregallagern mit Kleinladungsträgern oder Paletten bewertet und klassifiziert werden?

Zur Beantwortung dieser Frage soll auf Basis von Untersuchungen aus Messungen ein Simulationsmodell entwickelt werden. Mit dessen Hilfe werden anschließend Simulationsstudien zur Untersuchung einer großen Anzahl von Geräten durchgeführt und ausgewertet. Auf Basis der Simulationsergebnisse wird eine Effizienzkennzahl entwickelt und eine Klassifizierung abgeleitet (siehe Abschnitt 1.3). Vor diesem Hintergrund sollen zusätzlich die folgenden Unterfragen beantwortet werden:

1. Was ist bei der Aufnahme von Messdaten an RBGs zu beachten?
2. Wie kann ein Simulationsmodell für die Untersuchung von Durchsatz und Energiebedarf von AKLs und APLs bei einer hohen Anzahl an untersuchten Konfigurationen gestaltet werden?

3. Wie können die Effekte verschiedener Parameter auf Durchsatz und Energiebedarf von AKLs und APLs untersucht werden?
4. Wie sehen Referenzspiele für den mittleren Energiebedarf eines RBGs aus?
5. Welche Einflussgrößen beschreiben den Nutzen beim Betrieb eines RBGs?
6. Wie ist eine geeignete Effizienzkennzahl für RBGs definiert?
7. Wie kann eine Klassifizierung der EE auf Basis der physikalischen Eigenschaften von RBGs stattfinden?

3 Methodisches Vorgehen zur Entwicklung der Bewertung und Klassifizierung

Nach der Einleitung, der Vorstellung der theoretischen Grundlagen und der Ableitung der Forschungslücke wird an dieser Stelle noch einmal auf das methodische Vorgehen eingegangen. Das Vorgehen zur Entwicklung der Bewertung und Klassifizierung der EE von RBG kann in den folgenden sechs Schritten zusammengefasst werden:

1. Auswahl des zu klassifizierenden Geräts und Festlegung der Systemgrenze
2. Auswahl der Parameter für Aufwand und Nutzen und Festlegung einer Kennzahl
3. Festlegung eines Parameterraums für in der Praxis betriebene Geräte
4. Simulation des Parameterraums
5. Klassifizierung auf Basis der Verteilung der Kennzahl im simulierten Parameterraum
6. Dokumentation der Bewertung und der Klassifizierung.

Diese sechs Schritte werden nachfolgend näher beschrieben und in Kontext zur Bewertung von RBGs gesetzt. Die Vorgehensweise wird im Rahmen der eigenen Forschungsarbeiten entwickelt und am Beispiel von RBGs angewendet.

1. Auswahl des zu klassifizierenden Geräts und Festlegung der Systemgrenze

Im Rahmen des 1. Schritts muss zunächst ein Gerät ausgewählt werden. Dazu werden im Rahmen dieser Arbeit RBGs in automatischen HRLs ausgewählt. Zusätzlich muss die Systemgrenze der Betrachtung genau festgelegt werden. Ohne eine klare Abgrenzung des Systems ist eine Bewertung nur von eingeschränktem Nutzen. Es fehlt dann die Grundlage für den Vergleich einzelner Geräte. In diesem Fall wird die Systemgrenze um ein einzelnes RBG samt seiner Lagergasse und dem zugehörigen Abschnitt des HRLs gezogen. Die Abgrenzung wird in Abschnitt 2.1 definiert.

2. Auswahl der Parameter für Aufwand und Nutzen und Festlegung einer Kennzahl

Das Vorgehen zur Entwicklung einer Bewertung ist explizit für komplexe Geräte gedacht. Diese Geräte können, anders als klassische Einzelkomponenten, nicht mit einem einfachen Wirkungsgrad im physikalischen Sinne bewertet werden. Zum Vergleich kann als Beispiel ein Leuchtmittel betrachtet werden. Nach der Definition der EE aus Abschnitt 2.2 wird ein Verhältnis aus Nutzen und Energieaufwand verwendet. In der Bewertung von Leuchtmitteln kommt das Verhältnis aus Lichtstrom und der elektrisch aufgenommenen Leistung zum Einsatz. Dieser „Lampenwirkungsgrad“ mit

der Einheit lm/W^{15} beinhaltet auch die Wahrnehmung des menschlichen Auges von Licht. Der Lichtstrom in W beinhaltet eine wellenlängenabhängige Funktion, die die unterschiedliche Empfindlichkeit des Auges für Licht verschiedener Wellenlängen berücksichtigt. Neben dem Lampenwirkungsgrad kommen in den Ökodesign-Anforderungen der EU aber noch diverse weitere Parameter, wie beispielsweise der Lampenlichtstromerhalt¹⁶, zum Einsatz. [Eur-2009]

Eine Bewertung auf Basis eines einfachen Zusammenhangs ist für komplexe Geräte nur selten möglich. Die Berücksichtigung von Nutzen und Aufwand in der Bewertung kann aber auch hier Anwendung finden. In Abschnitt 7.1 werden die für RBGs herangezogenen Größen und deren Zusammenhang in einer Kennzahl beschrieben.

3. Festlegung eines Parameterraums für die in der Praxis betriebenen Geräte

Um eine sinnvolle Betrachtung für die Klassifizierung zu erhalten, wird ein Parameterraum für die in der Praxis eingesetzten Geräte ausgewählt. Damit soll erreicht werden, dass die Bewertung auf der Gesamtheit der vorhandenen Geräte basiert. Im Unterschied zu einer Bewertung, die auf dem Vergleich eines Geräts mit einem geeigneten Referenzgerät basiert, kann bei dieser Vorgehensweise eine absolute Klassifizierung, also eine Einordnung innerhalb von allen realisierten Geräten, stattfinden. Beim Vergleich mit einem Referenzgerät, wie es beispielsweise bei Fernsehgeräten passiert, ergibt sich nur eine relative Klassifizierung des zu bewertenden Geräts. Gleichzeitig besteht immer das Problem ein geeignetes Referenzgerät zu definieren. Damit unterscheidet sich die hier vorgestellte Bewertung und Klassifizierung von den meisten Effizienz Kennzahlen aus dem Bereich der Haushaltsgeräte. Die Auswahl der Parameter für in der Praxis eingesetzte RBGs wird in Abschnitt 5.4.1 beschrieben.

4. Simulation des Parameterraums / Bestimmung der Kennzahlen innerhalb des Parameterraums

Im vierten Schritt wird die jeweilige Effizienz Kennzahl der Geräte im festgelegten Parameterraum bestimmt. Für komplexe Geräte in einem großen Parameterraum bietet sich zur Bestimmung der Kennzahlen der einzelnen Geräte die Simulation an. Auf Basis von Literaturrecherche, Expertengesprächen, Messergebnissen und daraus gewonnenen Erkenntnissen aus Kapitel 4 konnte in Kapitel 5 ein Modell entwickelt werden, das sich für diese Untersuchung eignet. Damit werden anschließend die in Kapitel 6 beschriebenen Ergebnisse erzielt. In Abschnitt

¹⁵Lumen pro Watt

¹⁶„das Verhältnis zwischen dem von der Lampe zu einem gegebenen Zeitpunkt ihres Lebens ausgesendeten Lichtstrom und ihrem ursprünglichen (nach 100 Betriebsstunden gemessenen) Lichtstrom“ [Eur-2009, S. L 76/8]

7.1 werden dann abschließend die Ergebnisse für die Effizienzkennzahl vorgestellt.

5. Klassifizierung auf Basis der Verteilung der Kennzahl im simulierten Parameterraum Aus den Ergebnissen der Simulation kann auf Basis der Verteilung der Kennzahl eine Einteilung in verschiedene Klassen abgeleitet werden. Die Ergebnisse dazu sind in Abschnitt 7.2 beschrieben. Eine Einteilung in Klassen dient dazu, eine Kennzahl in einen einfach erkennbaren Kontext zu setzen. In der praktischen Anwendung haben Energieeffizienzklassen einen hohen Nutzen, da sie eine einfache Darstellung einer mitunter komplexen Bewertung ermöglichen. Damit können Anwender*innen der Klassifizierung eine schnelle Einschätzung der Effizienz eines Geräts treffen.

6. Dokumentation der Bewertung und der Klassifizierung / Entwicklung einer Anleitung zur praktischen Anwendung der Methode Im letzten Schritt der Vorgehensweise geht es um die Dokumentation der Bewertung und Klassifizierung. Dabei sollte nach Möglichkeit auch eine möglichst praxisnahe Anleitung zur Durchführung einer Bewertung beschrieben werden. Dieser Schritt wird in Abschnitt 7.4 näher beleuchtet. Dort wird die praktische Umsetzung einer Bewertung mit der entwickelten Methode vorgestellt.

Grundsätzlich kann die vorgeschlagene Vorgehensweise auch zur Entwicklung einer Bewertung für andere Fördermittel oder für gänzlich andere Geräte verwendet werden. Die Bewertung ist aber prinzipiell für Maschinen und Geräte in der Intralogistik gedacht. In [Rüc-2018a] wird bereits ein Ansatz für die Übertragung einer Bewertung für RBGs auf weitere Fördermittel in der Intralogistik präsentiert. Neben RBGs weisen auch andere Fördermittel die für eine Bewertung erforderlichen Eigenschaften auf. Solange Nutzen und Energiebedarf bestimmt werden können, ist eine Bewertung mittels Kennzahl möglich. Wenn zusätzlich ein abgeschlossener Parameterraum der physikalischen Eigenschaften definiert werden kann, ist auch eine Klassifizierung auf Basis dieser Eigenschaften möglich.

4 Untersuchung des Energiebedarfs über Leistungsmessungen

In diesem Kapitel werden die Leistungsmessungen an vier verschiedenen RBGs vorgestellt. Dazu werden zunächst in Abschnitt 4.1 die Geräte und anschließend in Abschnitt 4.2 die Vorbereitung der Messungen beschrieben. Danach werden in den Abschnitten 4.3, 4.4, 4.5 und 4.6 die Messungen und Ergebnisse an den vier Geräten vorgestellt. Abschließend wird in Abschnitt 4.7 ein Zwischenfazit gezogen.

4.1 Beschreibung der untersuchten RBG

Neben dem Forschungsregalbediengerät des fml werden drei weitere RBGs im industriellen Umfeld untersucht. Die vier Geräte, zwei AKLs und zwei APLs, unterscheiden sich stark in Größe, Kinematik und Einsatz. Die technischen Daten der Geräte sind in Tabelle 4-1 verzeichnet. RBG-1 ist das Forschungsregalbediengerät des fml. Das Gerät wird nicht zum aktiven Betrieb eines HRLs verwendet und konnte deswegen für umfangreiche Untersuchungen verwendet werden. Die Geräte RBG-2, RBG-3 und RBG-4 sind Industrieanlagen mit aktivem HRL Betrieb. Deswegen war die Möglichkeit umfangreicherer Messungen an diesen Anlagen eingeschränkt. Die Betreiber der Anlagen möchten Störungen im laufenden Betrieb verhindern und dementsprechend werden die Messungen zum Teil außerhalb der Betriebszeiten durchgeführt. Auf Wunsch der Hersteller und Betreiber der Anlagen werden hier keine Details zu den Herstellern des jeweiligen Geräts und der Komponenten, den transportierten Gütern und dem Lagerbetrieb genannt. RBG-1 und RBG-3 sind in einem AKL und RBG-2 und RBG-4 in einem APL verbaut. Der Einfluss des Alters und des Verschleißzustands der Anlagen ist nicht Teil der Untersuchungen. Ein Teil der Ergebnisse ist bereits in [Rüc-2018b] und [Fot-2018, S. 51–94] veröffentlicht worden. An dieser Stelle werden die für die Beantwortung der Forschungsfragen relevanten Ergebnisse vorgestellt.

Beschreibung des Forschungsregalbediengeräts (RBG-1) Das RBG-1 wurde vom Lehrstuhl fml in Zusammenarbeit mit der Firma viastore Systems GmbH entwickelt und gebaut und ist das lehrstuhleigene Forschungsregalbediengerät. Das RBG ist für den Betrieb in einem AKL ausgelegt und in Leichtbauweise realisiert worden. Beim Aufbau wurde verstärkt auf CFK und Klebeverbindungen gesetzt. Der Mast ist beispielsweise vollständig aus CFK hergestellt und die Fahrschienen für den Hubschlitten wurden aufgeklebt. Der Hubschlitten wurde in einer Hybridbauweise aus verklebtem

Tabelle 4-1: Technische Daten der untersuchten Geräte

Parameter	RBG-1	RBG-2	RBG-3	RBG-4
Typ	AKL	APL	AKL	APL
Nutzlast	100 kg	1000 kg	60 kg	1000 kg
Gesamte Masse ohne Nutzlast	2230 kg	8620 kg	2430 kg	21 200 kg
Masse von Hubschlitzen und LAM	300 kg	1500 kg	425 kg	2870 kg
Masse Gegengewicht	0 kg	0 kg	0 kg	940 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	2,33 m/s	5,8 m/s	3,3 m/s
Max. Beschleunigung Fahrwerk	3 m/s ²	0,35 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	Rückspeise- einheit	Rückspeise- einheit	Rückspeise- einheit
Fahr- / Hubantrieb	Riemen / Riemen	Reibrad / Seil	Riemen / Riemen	Angetriebene Räder / Seil

CFK und Aluminium hergestellt. Das LAM, mit einer Kapazität von zwei KLTs, wurde nicht eigens entwickelt, sondern konventionell aus Stahl und Aluminium gefertigt. Durch die hohe Masse des LAMs von ca. 300 kg verringert sich der Massevorteil, der durch den optimierten Mast und Hubschlitzen erreicht wird. Das Gerät kann bei einer maximalen Fahrgeschwindigkeit von 6 m/s und einer maximalen Hubgeschwindigkeit von 3 m/s eine Nutzlast von 100 kg transportieren. Die hohen maximalen Beschleunigungen an Fahr- und Hubantrieb von 3 m/s² werden über Riemenantriebe realisiert. Das RBG-1 befindet sich im Gegensatz zu den anderen RBGs nicht zwischen zwei kompletten Regalwänden, da in der Versuchshalle des Lehrstuhls kein komplettes HRL verbaut ist. Deswegen lässt sich nur eine limitierte Anzahl an Fachpositionen anfahren. [Fot-2018, S. 59–61]

Beschreibung des RBG-2 Das RBG-2 ist in einem viergassigen APL verbaut. Das RBG wurde 1985 in Betrieb genommen und ist dementsprechend von seinem relativ alten Stahlbau geprägt. Im Jahr 2010 wurden im Rahmen eines Retrofits die Antriebsmotoren und die komplette Leistungselektronik getauscht und zusätzlich eine Rückspeiseeinheit verbaut. Die kinematischen Parameter, Geschwindigkeit und Beschleunigung, sind etwas niedriger als die von RBG-4. Das RBG hat eine Nutzlast von 1000 kg bei einer LAM-Kapazität von einer Palette. Der Fahrtrieb ist als Reibradantrieb und

der Hubantrieb als Seilhubwerk ausgeführt. [Fot-2018, S. 61]

Beschreibung des RBG-3 Das RBG-3 ist in einem mehrgassigen AKL verbaut. Das RBG ist in konventioneller Bauweise ohne den Einsatz von Verbundwerkstoffen aufgebaut und weist bei einer Bauhöhe von 12 m eine Gesamtmasse von 2430 kg auf. Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fahrtriebs erreichen ähnliche Werte wie bei RBG-1. Gleichzeitig ist die Nutzlast mit 60 kg bei gleicher LAM-Kapazität von zwei KLTs geringer. Aufgrund der 40 % geringeren Nutzlast ist die Gesamtmasse, trotz einer 50 % größeren Gerätehöhe, lediglich um ca. 10 % höher als bei RBG-1. Fahr- und Hubantrieb sind als Riemenantrieb ausgeführt. [Fot-2018, S. 62]

Beschreibung des RBG-4 Das RBG-4 ist in einem neungassigen APL im Einsatz. Mit einer Bauhöhe von 34 m, einer Nutzlast von 1000 kg und einer LAM-Kapazität von einer Palette, ist es das größte und schwerste untersuchte RBG. Das Gerät weist höhere Beschleunigungen und Geschwindigkeiten als RBG-2 auf und besitzt auch eine Rückspeiseeinheit. Der Fahrtrieb wird über zwei angetriebene Laufräder realisiert. Im Gegensatz zu RBG-2 besitzt das Seilhubwerk ein Gegengewicht. [Fot-2018, S. 62]

4.2 Grundlagen der Leistungsmessungen

Die Leistungsmessungen werden mithilfe eines Fluke 1735 Power Logger [Flu-2006] Leistungsmessgeräts durchgeführt. Das Fluke 1735 ist ein Drei-Phasen-Leistungsmessgerät, das über Spannungsklemmen die Spannung und über Messzangen den Strom der drei Phasen gleichzeitig misst. Aus den gemessenen Werten werden die Leistung und der Energieverbrauch berechnet und zusätzlich zu Spannung und Strom abgespeichert. Das Messgerät hat ein minimales Messintervall von $t_{MI} = 0,5$ s und zeichnet mit einer Frequenz von 2,0 Hz auf. Das Messintervall wird von Fluke als Mittelungsintervall bezeichnet, da in diesem Zeitraum die Werte für Leistung und Energiebedarf gemittelt werden. Zusätzlich werden für diesen Zeitraum aber auch die größte und die kleinste gemessene Leistung gespeichert. Der interne Speicher des Geräts ist mit 4320 Messwerten relativ klein. Daher kann bei minimalem Messintervall eine maximale Messdauer von 36 min realisiert werden. Die tatsächliche Abtastrate des Messgeräts beträgt 10,24 kHz und ermöglicht damit auch eine genaue Messung der höherfrequenten Leistungsanteile. Damit wirkt sich das minimale Messintervall nicht auf die Genauigkeit bei der Bestimmung des Energiebedarfs aus. Wenn im Folgenden von gemessener Leistung gesprochen wird, handelt es sich um die Wirkleistung. Die Wirkleistung ist jener Anteil der elektrischen Leistung, der zur Umwandlung in andere

Energieformen zur Verfügung steht. Um einheitliche Messungen durchführen zu können, wird bei jeder Messung der gleiche Messaufbau verwendet. Das Leistungsmessgerät und die Messleitungen werden vor den Messungen kalibriert. Abhängig von der erwarteten Leistungsaufnahme des jeweiligen RBGs werden unterschiedliche Messzangen für die Aufnahme des Stroms eingesetzt. In Abbildung 4-1 ist ein Schema der Leistungselektronik eines RBGs mit der Anschlussposition des Messgerätes dargestellt. Das Leistungsmessgerät wird bei allen Messungen am Ausgang des stationären Schaltschranks angeschlossen. Damit wird die Leistung am Eingang der Schleifleitungen in die Gasse des RBG gemessen. Die Leistung des stationären Schaltschranks wird dabei nicht mitgemessen. Am RBG-1 hätten auch andere Anschlusspunkte gewählt werden können, aber darauf wird, aufgrund besserer Konsistenz mit den Messungen an realen Industrieanlagen, verzichtet. Bei den meisten Anlagen ist dieser Punkt für die Spannungsklemmen und die Strommesszangen zugänglich. Es wird nur die Leistung der Verbraucher innerhalb der Regalgasse gemessen.

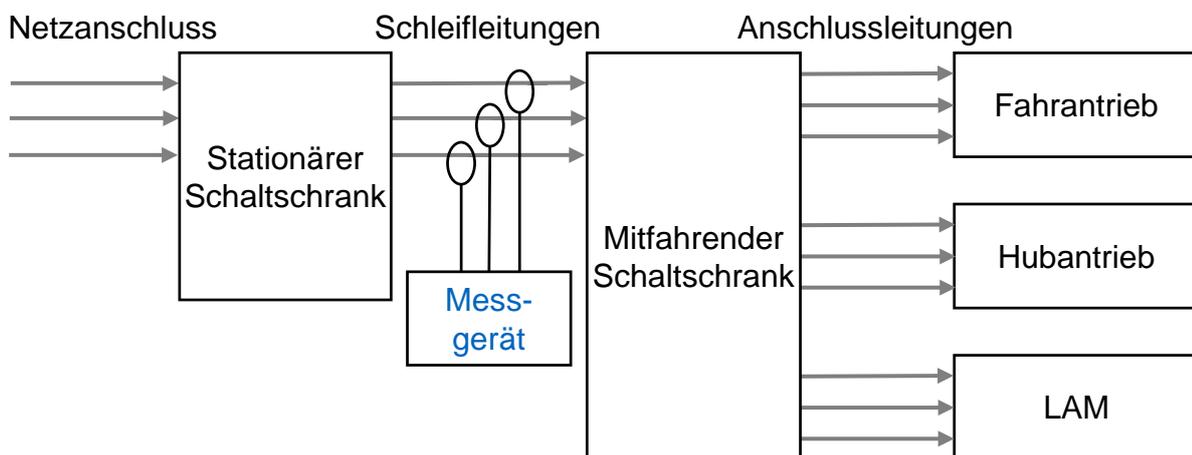


Abbildung 4-1: Vereinfachtes Schema der Leistungselektronik eines RBGs mit Anschlusspunkt des Leistungsmessgeräts (vgl. [Rüc-2018b])

Nachfolgend werden Ergebnisse der Messungen an den vier Geräten vorgestellt. Zunächst werden die Messungen an RBG-1 beschrieben. Im Rahmen dieser Messungen sind einige allgemeine Rahmenbedingungen für die Messungen an RBGs erarbeitet worden. Anschließend werden die Ergebnisse von RBG-2, RBG-3 und RBG-4 vorgestellt.

4.3 Messungen an RBG-1

Da bereits von Ertl Messungen an diesem RBG durchgeführt wurden, konnte bei den Messungen auf Erkenntnisse von Ertl [Ert-2016a, S. 74–79] zurückgegriffen werden. Diese Erkenntnisse werden sukzessive durch neue Beobachtungen ergänzt. Zunächst

werden über verschiedene Tests äußere Faktoren ermittelt, die die Ergebnisse der Messungen beeinflussen. Bereits bekannt ist, dass der Energiebedarf einer Bewegung Schwankungen unterliegt [Bra-2016a, S. 174–178]. Daraus ergibt sich, dass für die Messung des Energiebedarfs einzelner Fahrbewegungen eine gewisse Anzahl gleicher Bewegungen vermessen werden müssen. Neben statistischen Einflüssen wird vermutet, dass die Leistungsaufnahme der Geräte auch mit der Temperatur der Komponenten zusammenhängt. In der Versuchshalle des Lehrstuhls herrscht nicht ganzjährig die gleiche Temperatur. Nachdem die Halle im Winter geheizt wird, schwankt die Hallentemperatur aber nur im Bereich weniger Grad Celsius. Beispielsweise betrug die Temperatur bei den Messungen am Hubwerk im August ca. 23 °C und bei den Messungen im Dezember ca. 19 °C. Der Einfluss der Umgebungstemperatur wird deshalb nicht untersucht, sondern lediglich die vorherrschende Temperatur dokumentiert. Zusätzlich haben auch Verbraucher, die nicht dauernd laufen und der Grundlast zuzurechnen sind, einen Einfluss. Bei RBG-1 schalten sich die aktiven Lüftermotoren von Fahr- und Hubantrieb erst bei einer gewissen Motortemperatur ein. Ohne laufende Lüftermotoren beträgt die Grundlast 347,0 W und mit laufenden Lüftermotoren 475,3 W. Zum Beispiel bei einer Fahrzeit von 10 s ergibt sich damit ein zusätzlicher Beitrag zum Energiebedarf von 1,28 kJ. Als Messstrecken werden die in Abbildung 4-2 gezeigten Fahrten verwendet. Die Längen- und Höhenkoordinate repräsentieren Fachpositionen im Regal.

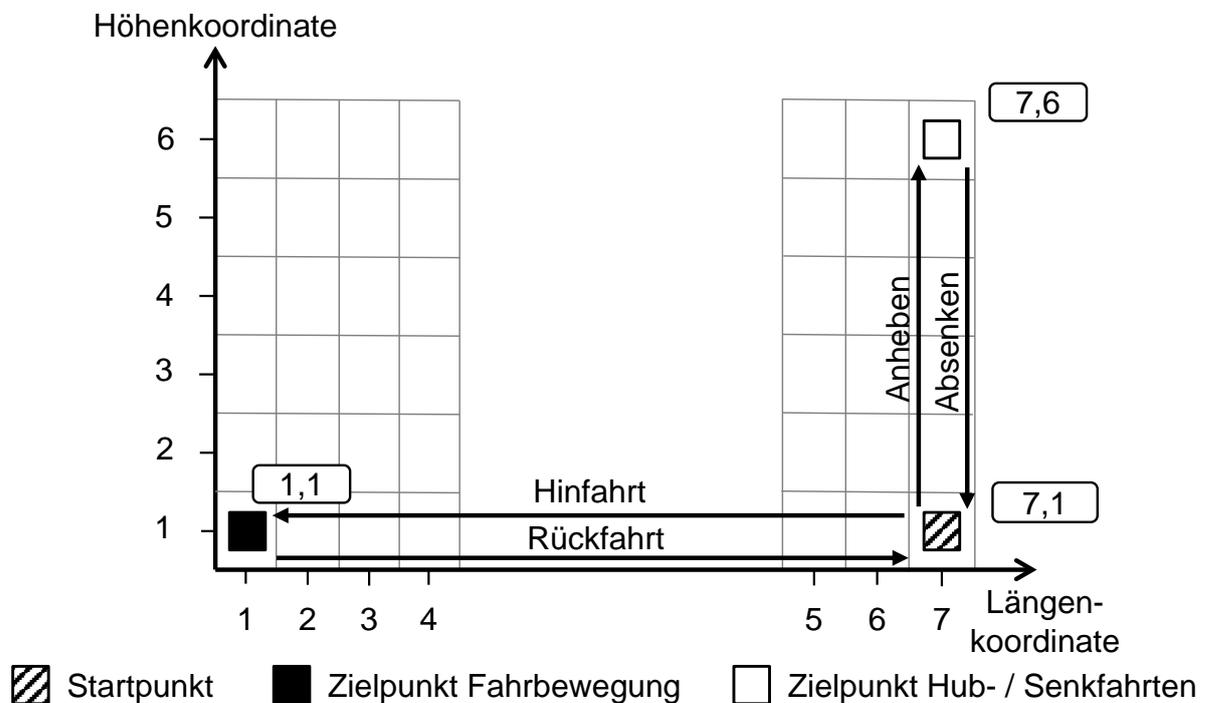


Abbildung 4-2: Schema der Fahrten für die Messungen an RBG-1 mit einer Fahrstrecke von 20,98 m und einer von Hubhöhe 6,26 m (vgl. [Rüc-2018b])

Für die Fahrbewegung wird eine Fahrt mit einer Fahrstrecke von 21 m von $(7,1)^{17}$ nach $(1,1)$ oder die entsprechende Rückfahrt verwendet. Analog werden für die Hubbewegung eine Fahrt von $(7,1)$ nach $(7,6)$ mit einer Hubhöhe von 6,3 m mit der anschließenden Senkbewegung verwendet. Die Senkbewegung leistet keinen relevanten Beitrag zum Energiebedarf der Fachanfahrt, da die Bremsenergie bei diesem Gerät über einen Bremswiderstand in Wärme umgewandelt wird.

4.3.1 Warmlaufverhalten

Aufgrund der Größe der Antriebe unterliegen diese zum Beginn des Betriebs nach mehrstündiger Ruhepause einem gewissen Warmlaufverhalten. Unter Warmlaufverhalten wird an dieser Stelle verstanden, dass Motor, Getriebe und weitere Komponenten des Antriebs, wie Lager und Laufräder, sich im Laufe des Betriebs erwärmen und je nach Belastung bei einer stationären Temperatur einpendeln. Vermutet wird, dass das Warmlaufverhalten die Leistungsaufnahme eines Geräts beeinflusst. Um das Warmlaufverhalten näher zu untersuchen, werden am RBG-1 Langzeitmessungen durchgeführt. Fahr- und Hubantrieb werden getrennt betrachtet. Das Messintervall beträgt bei diesen Messungen $t_{MI} = 5$ s, um eine entsprechend lange Messdauer von 6 h gewährleisten zu können. In diesem Zeitraum führt das RBG alternierend Hin- und Rückfahrten bzw. Hub- und Senkbewegungen durch. Die Ergebnisse der gemittelten Leistungswerte mit einer Mittelungszeit von $\bar{t} = 450$ s sind in den Abbildungen 4-3 und 4-4 dargestellt.

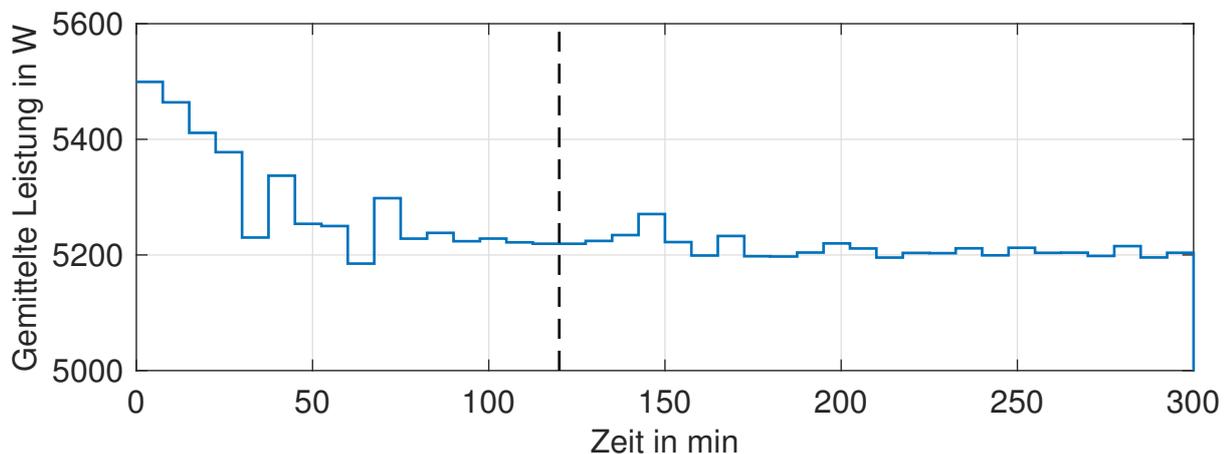


Abbildung 4-3: Gemittelte Leistungsaufnahme von RBG-1 bei zyklischer Belastung des Fahrtriebs während einer Langzeituntersuchung ohne Nutzlast (vgl. [Rüc-2018b])

Nach einem Betriebsstart aus dem kalten Zustand sinkt die gemittelte aufgenommene Leistung innerhalb von 2 h um ca. 5 % ab. Ein ähnlicher Zusammenhang konnte auch beim Hubwerk beobachtet werden (siehe Abbildung 4-4).

¹⁷Eine Position im Lager kann in Koordinatenschreibweise in x- und y-Richtung angegeben werden. Die erste Zahl steht damit für die Spalte und die zweite für die Ebene.

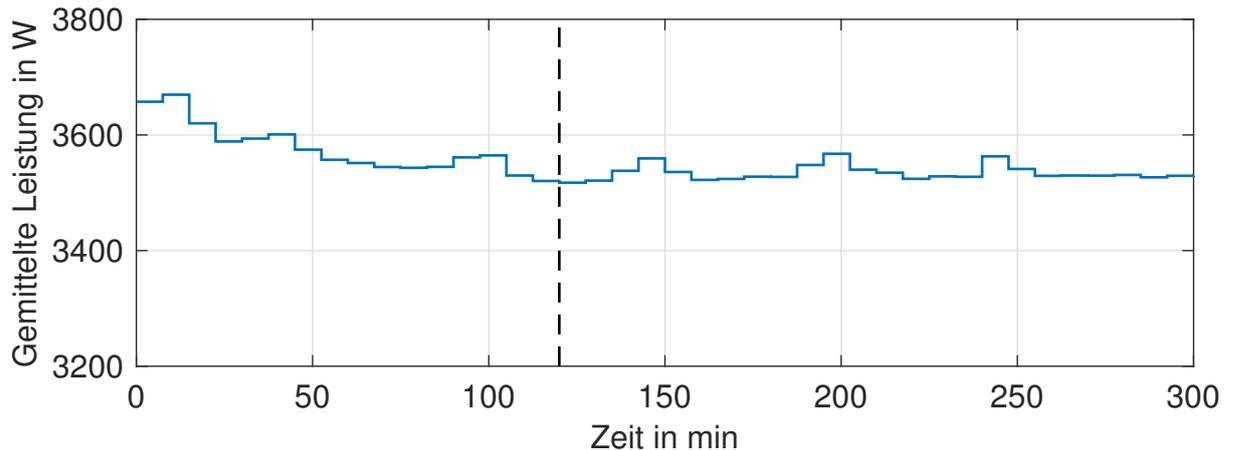


Abbildung 4-4: Gemittelte Leistungsaufnahme von RBG-1 bei zyklischer Belastung des Hubantriebs während einer Langzeituntersuchung ohne Nutzlast (vgl. [Fot-2018, S. 64])

Welche Komponenten sich in welchem Maß erwärmen, wurde im Rahmen einer Studienarbeit von Preis mittels Thermografie näher untersucht [Pre-2018]. Im Rahmen der Arbeit konnte gezeigt werden, dass nicht nur die Motoren und Getriebe einer signifikanten Erwärmung unterliegen, sondern auch die Leistungselektronik und die Fahrräder und Führungsrollen. Die Temperaturabhängigkeit der einzelnen Wirkungsgrade wird nicht getrennt untersucht. Es kann auf Basis der Messungen lediglich der gesamte Beitrag auf das Verhalten eines Hauptantriebs bewertet werden. Folgende Rahmenbedingungen haben sich nach den Voruntersuchungen für weitere vergleichbare Messungen als sinnvoll herausgestellt:

- Die Antriebe sollten ausreichend warmgefahren werden.
- Die Betriebsbedingungen müssen bei jeder Messung gleich sein, das heißt es müssen die gleichen stationären Verbraucher in Betrieb sein.
- Das Messgerät muss am gleichen Anschlusspunkt angeschlossen werden.
- Eine Bewegung oder ein Spiel sollte ca. 20-mal¹⁸ gefahren und gemessen werden, um durch Mittelwertbildung statistische Effekte herauszurechnen.
- Die Umgebungsbedingungen wie Temperatur oder weitere Besonderheiten müssen dokumentiert werden, um die Interpretation der Ergebnisse zu ermöglichen.

4.3.2 Einfluss der Geschwindigkeit und der Nutzlast

Unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus Kapitel 4.3.1 werden mehrere Messreihen zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameter durchgeführt. Dabei ging es zunächst um die Bewertung des Einflusses der Geschwindigkeit und der Nutzlast.

¹⁸Diese Anzahl wird experimentell ermittelt. Dazu wurden Versuche mit 40, 30, 25, 20, 15 und 10 Wiederholungen einzelner Fahrten durchgeführt. Ab 20 Wiederholungen ergibt sich keine Veränderung der Standardabweichung mehr.

Diese Daten werden in 5.3 für die Validierung des Simulationsmodells verwendet. Dafür werden für Fahr- und Hubwerk zwei Messreihen mit vollständiger Variation von Geschwindigkeit und Nutzlast durchgeführt. Die Geschwindigkeitsstufen und Zuladungen für die beiden Antriebe sind in Tabelle 4-2 verzeichnet. Jeder Punkt in der Tabelle beschreibt eine Messung von 20 Fahr- oder Hubbewegungen. Die Nutzlasten sind bei Fahrwerk und Hubwerk nicht komplett identisch, da die Zuladung während der Versuche so einfacher realisiert werden konnte. Das spielt für die Ergebnisse der Untersuchungen keine Rolle, da kein direkter Vergleich der Antriebe durchgeführt wird.

Tabelle 4-2: Geschwindigkeitsstufen und Nutzlasten für die Messreihen an Fahrwerk und Hubwerk (vgl. [Rüc-2018b])

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	•	•	•	•	•

Die Aufbereitung der Ergebnisse wird hier exemplarisch am Beispiel einer Messreihe ohne Nutzlast bei verschiedenen Geschwindigkeiten gezeigt. Zunächst ist in Abbildung 4-5 die Leistungsaufnahme des RBG bei reiner Fahrbewegung und unterschiedlichen Geschwindigkeiten wiedergegeben. Dargestellt sind hier die Leistungswerte in vier Blöcken mit jeweils 20 Fahrbewegungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

Anschließend wird aus diesem kompletten Leistungsverlauf der Energiebedarf der einzelnen Bewegungen ermittelt. Diese sind in Abbildung 4-6 für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten dargestellt. Deutlich erkennbar sind hier die leichten Schwankungen im Energiebedarf der einzelnen Fahrten.

Fasst man alle Fahrten einer Fahrgeschwindigkeit zusammen, erhält man die blaue Kurve in Abbildung 4-7. Sie stellt den Mittelwert des Energiebedarfs über die Geschwindigkeit dar. Zusätzlich wird die Standardabweichung¹⁹ als vertikaler Balken dargestellt.

Die einzelnen Messpunkte werden zur Veranschaulichung abschnittsweise linear verbunden. Der Energiebedarf steigt mit zunehmender Geschwindigkeit an. Rechnet man die Grundlast mithilfe der Fahrzeit aus dem Energiebedarf heraus, erhält man die rote Kurve. Die Grundlast beträgt bei RBG-1 ca. 475 W. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten

¹⁹Hier wird als Standardabweichung die Wurzel der Stichprobenvarianz verwendet [Fah-2016, S. 65].

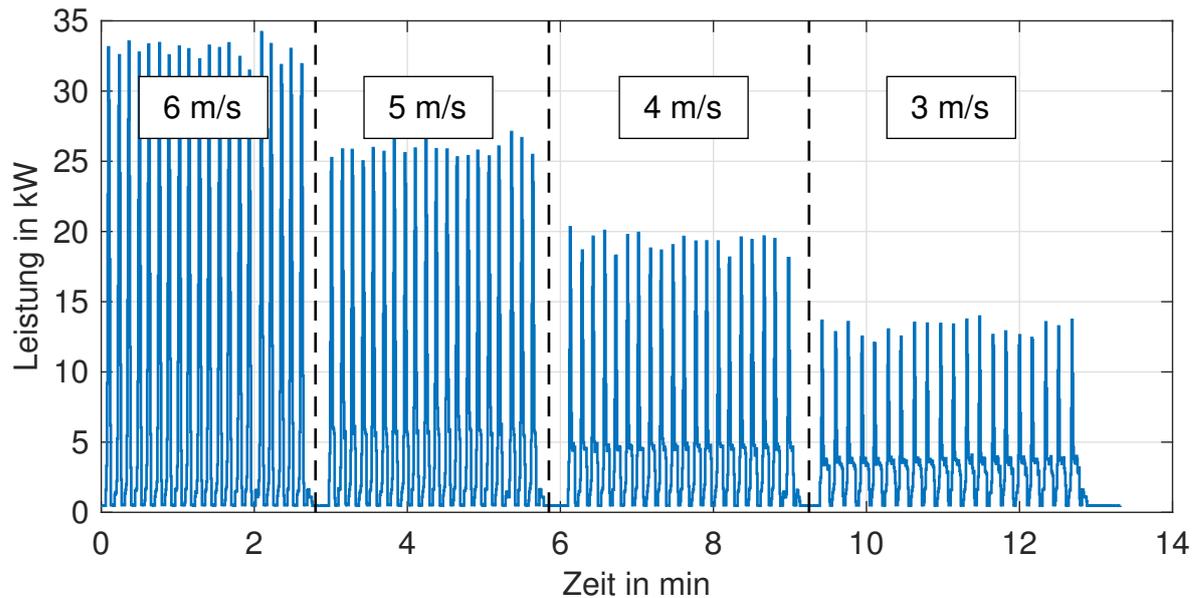


Abbildung 4-5: Leistungsaufnahme von RBG-1 bei reiner Fahrbewegung während einer Messreihe mit Grundlast und ohne Nutzlast bei verschiedenen Geschwindigkeiten (vgl. [Rüc-2018b])

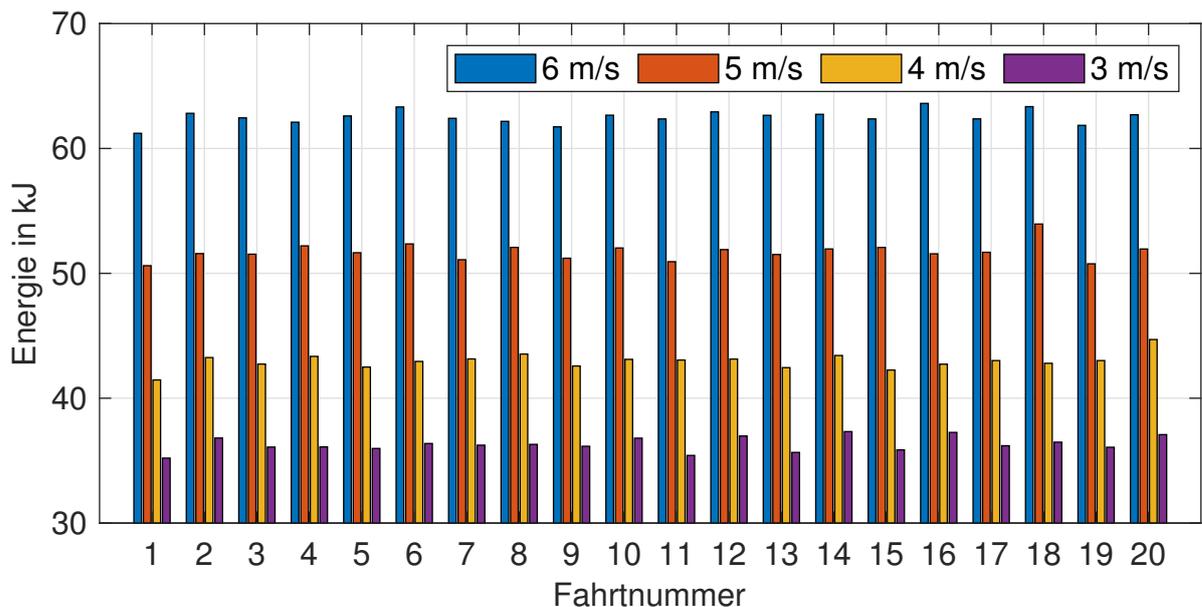


Abbildung 4-6: Energiebedarf einzelner Fahrbewegungen von RBG-1 während einer Messreihe mit Grundlast und ohne Nutzlast bei verschiedenen Geschwindigkeiten (vgl. [Rüc-2018b])

und damit längeren Fahrzeiten ergibt sich, durch den fehlenden Einfluss der Grundlast, ein stärkerer Abfall des Energiebedarfs mit sinkender Fahrgeschwindigkeit. Nach der Messung ohne Nutzlast werden vier weitere Messreihen mit unterschiedlichen Nutzlasten und unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten aufgezeichnet. Die Nutzlast wird mittels verschiedener Objekte in zwei KLTs am LAM platziert. Die Masse der Nutzlast wird über eine digitale Waage bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-8 ersicht-

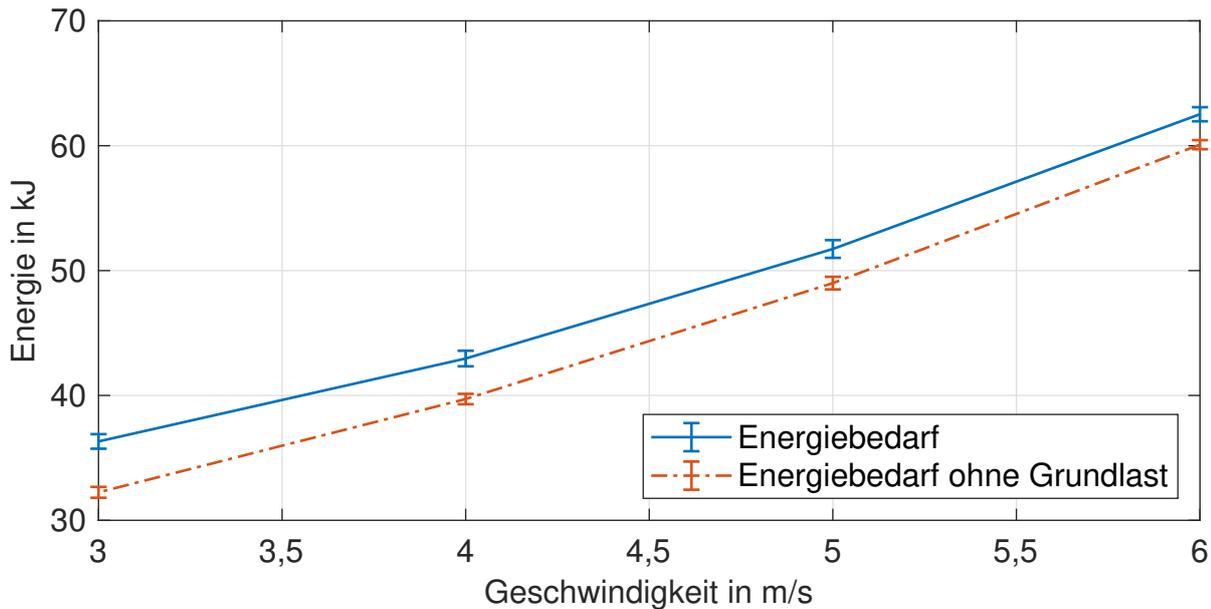


Abbildung 4-7: Mittlerer Energiebedarf und Standardabweichung von RBG-1 bei Fahrbewegungen mit und ohne Grundlast und ohne Nutzlast bei verschiedenen Geschwindigkeiten (vgl. [Rüc-2018b])

lich. Die Standardabweichung liegt bei diesen Kurven in derselben Größenordnung wie in Abbildung 4-7. Aufgrund dessen wird in den eng zusammen liegenden Kurven keine Standardabweichung an den Messpunkten dargestellt. Die Grundlast ist in diesen Ergebnissen enthalten. Der Einfluss der Nutzlast ist im Vergleich zum Einfluss der Geschwindigkeit klein. Der Energiebedarf steigt quadratisch mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit an. In Abbildung 4-8 ist auch zu sehen, dass der Energiebedarf ohne Nutzlast aufgrund des Warmlaufverhaltens etwas geringer als in Abbildung 4-7 ist.

In Abbildung 4-9 sind die Ergebnisse der Messreihen am Hubwerk dargestellt. Der Einfluss der Geschwindigkeit ist klein im Vergleich zur Fahrbewegung. Hauptsächlich beeinflusst die Nutzlast den Energiebedarf. Hier ergibt sich sogar der kontraintuitive Zusammenhang, dass der Energiebedarf mit sinkender Hubgeschwindigkeit leicht zunimmt. Das liegt hauptsächlich am Einfluss des steigenden Energiebedarfs der Grundlast durch die längere Hubzeit. Rechnet man die Grundlast heraus, sinkt der Einfluss der Geschwindigkeit weiter ab. Aus rein physikalischer Sicht hängt der Energiebedarf des Hubs hauptsächlich von der Nutzlast ab. Es gibt aber geschwindigkeitsabhängige Widerstände und Wirkungsgrade im System und deswegen hat die Geschwindigkeit einen kleinen Einfluss.

Die Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit, Nutzlast und Energiebedarf für Fahr- und Hubantrieb sind auch in [Sch-2012a] untersucht worden. Die dort gefundenen Zusammenhänge können mit diesen Messreihen bestätigt werden. Die Ergebnisse der Messreihen für Fahr- und Hubantrieb sind zusätzlich in Abschnitt 5.3 in den Tabellen

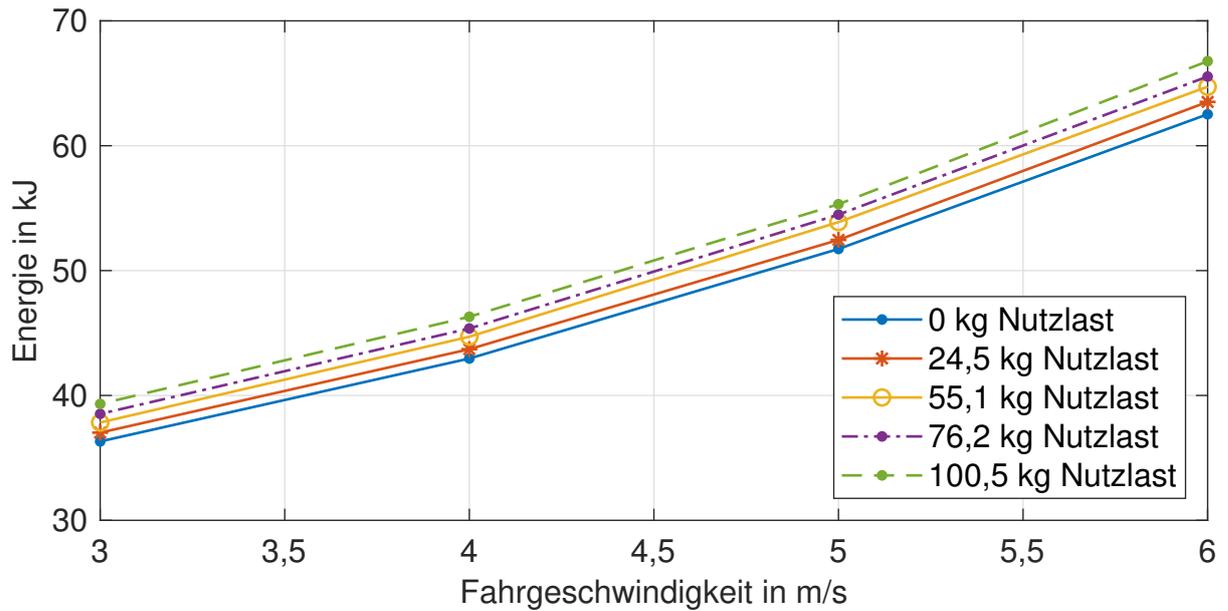


Abbildung 4-8: Mittlerer Energiebedarf von RBG-1 bei Fahrbewegungen mit Grundlast und mit verschiedenen Nutzlasten und verschiedenen Geschwindigkeiten (vgl. [Rüc-2018b])

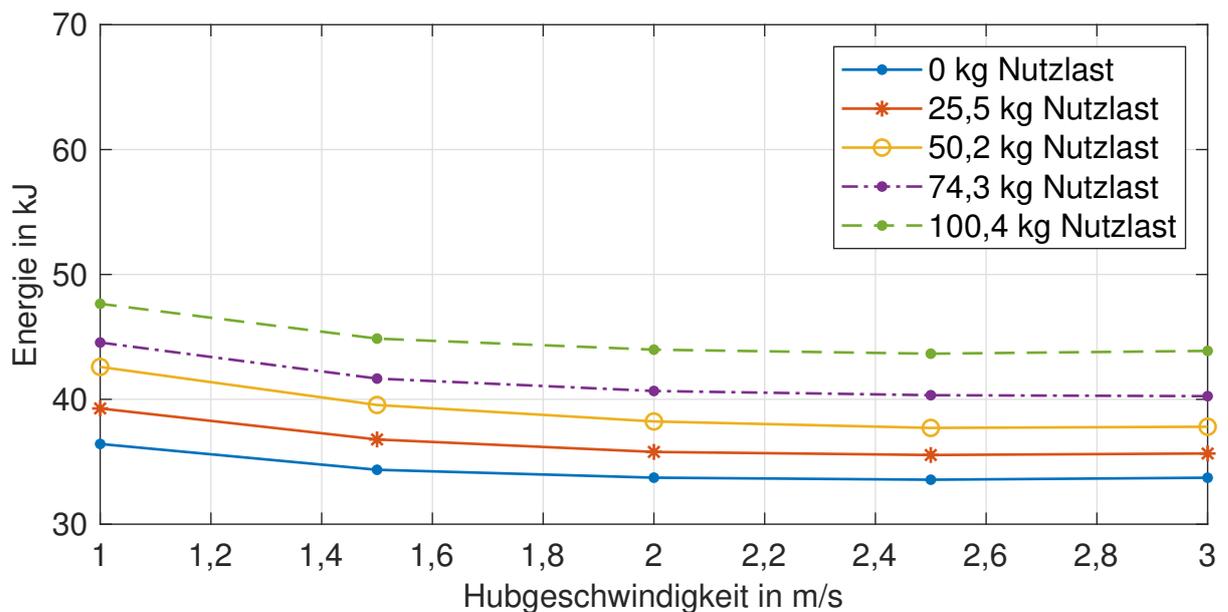


Abbildung 4-9: Mittlerer Energiebedarf von RBG-1 bei Hubbewegungen mit verschiedenen Nutzlasten und verschiedenen Geschwindigkeiten (vgl. [Rüc-2018b])

5-1 und 5-2 aufgelistet. Dort werden die Messergebnisse für die Validierung des Simulationsmodells verwendet.

4.3.3 Einfluss der Beschleunigung und des Rucks

Beim Einfluss der Beschleunigung auf den Energiebedarf wird im Folgenden lediglich der Fahrtrieb von RBG-1 betrachtet. Der Energiebedarf des Hubantriebs ist nur

gering von der Geschwindigkeit abhängig. In Abbildung 4-10 sind die Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses der Beschleunigung am Fahrwerk dargestellt. Zusätzlich ist die Grenze zur Spitzfahrt eingezeichnet. Unter einer Beschleunigung von $1,5 \text{ m/s}^2$ wird die maximale Fahrgeschwindigkeit nicht mehr erreicht. Deswegen sinkt der Energiebedarf zwischen einer Beschleunigung von $1,5 \text{ m/s}^2$ und $1,0 \text{ m/s}^2$ stärker ab. Der Energiebedarf steigt im Bereich der Normalfahrt zwischen einer Beschleunigung von $1,5 \text{ m/s}^2$ und $3,0 \text{ m/s}^2$ leicht an. Der Einfluss der Beschleunigung nimmt zu höheren Werten hin ab.

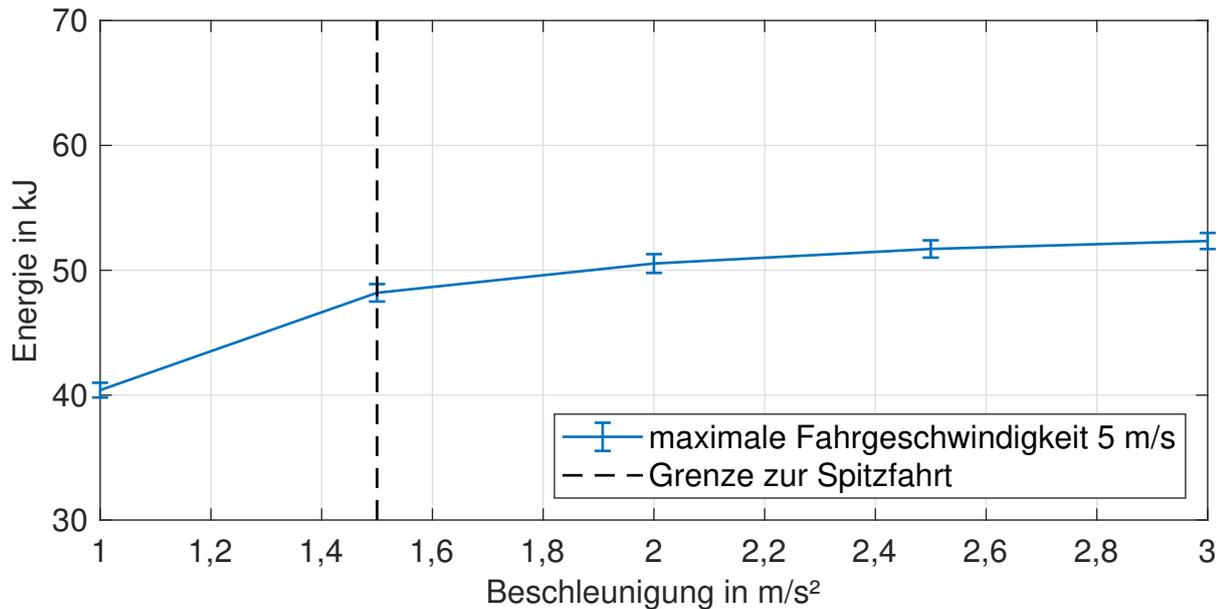


Abbildung 4-10: Einfluss der Beschleunigung von RBG-1 inklusive Grundlast bei einer maximalen Fahrgeschwindigkeit von $v_{x,max} = 5 \text{ m/s}$ (vgl. [Fot-2018, S. 72])

Das Ruckverhältnis JR in Gleichung 4-1 beschreibt den Zusammenhang zwischen Ruck J und maximaler Beschleunigung a_{max} eines Antriebs. Es beschreibt damit die Stärke des Anstiegs des Beschleunigungsprofils.

$$JR = \frac{J}{a_{max}} \quad (4-1)$$

Von Interesse ist die Betrachtung unterschiedlicher Beschleunigungsprofile bei gleicher Gesamtfahrzeit, Endgeschwindigkeit und Beschleunigungszeit. Der limitierende Faktor ist bei RBG-1 der maximal mögliche Ruck des Fahrtriebs von $2,2 \text{ m/s}^3$. Um die Untersuchungen durchführen zu können, wird deswegen eine maximale Fahrgeschwindigkeit von $3,0 \text{ m/s}$ und eine Fahrstrecke von $18,0 \text{ m}$ gewählt. Bei Ruckverhältnissen zwischen $3,2 \text{ s}^{-1}$ und $0,4 \text{ s}^{-1}$ ergeben sich die in Abbildung 4-11 dargestellten Beschleunigungsprofile. Je größer das Ruckverhältnis ist, umso mehr nähert sich die 7-Phasen Bewegung einer 3-Phasen Bewegung an.

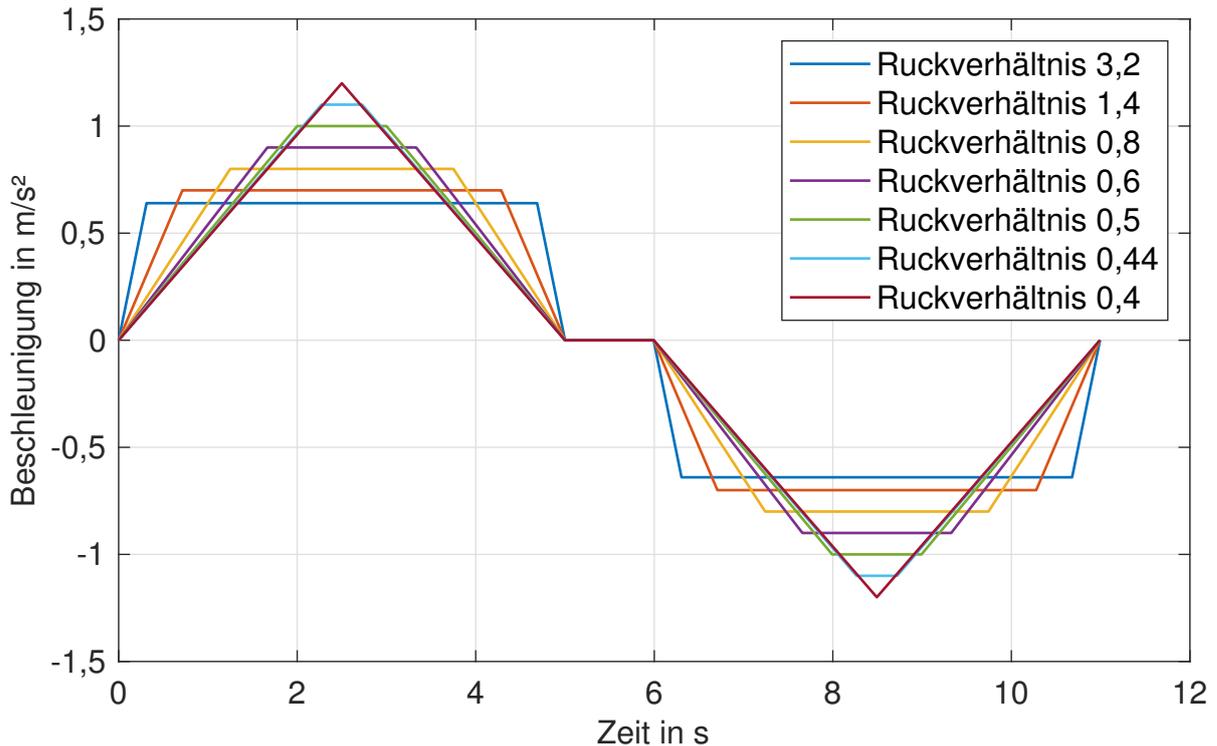


Abbildung 4-11: Vergleich unterschiedlicher Beschleunigungsprofile bei gleicher Gesamtfahrzeit

Betrachtet man die Verläufe der Geschwindigkeit in Abbildung 4-12, so ist ersichtlich, dass das Beschleunigungsprofil und damit das Ruckverhältnis den Verschleiß des Geschwindigkeitsverlaufs regeln. Geschwindigkeitsprofile mit einem höheren Verschleiß weisen dann durch ihre höhere maximale Beschleunigung einen stärkeren Anstieg auf. In Abbildung 4-12 sind die Verläufe der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von JR dargestellt.

Die in den Abbildungen 4-11 und 4-12 gezeigten Profile werden am RBG realisiert und die Energiebedarfe gemessen. Die hierbei gemessenen Energiebedarfe besitzen eine relativ große Standardabweichung. Trennt man jedoch die Hin- und Rückfahrten voneinander, tritt ein deutlicher Unterschied zwischen beiden Energiebedarfen auf und die Standardabweichung geht deutlich zurück. Der Hauptunterschied dieser Untersuchung lag in der Position des LAM. Während bei den Untersuchungen des Einflusses von Geschwindigkeit und Nutzlast am Fahrtrieb der Hubschlitten an der untersten Position war, ist bei diesen Messungen das LAM an der obersten Position gewesen. Hintergrund ist, dass eigentlich der Schwingungseinfluss des Masts auf den Energiebedarf untersucht werden sollte. Die Hypothese war hier, dass ein höheres Ruckverhältnis auch zu einem höheren Energiebedarf führen wird. Diese konnte in den Messungen nicht bestätigt werden. Der Einfluss der geringeren maximalen Beschleunigung kompensiert an dieser Stelle den Einfluss des Rucks. Auch die sehr steife Konstruktion des Masts wirkt Schwingungen entgegen und führt vermutlich auch dazu, dass kein Unterschied festgestellt werden konnte. Der Versuch, eine Erklärung für den unter-

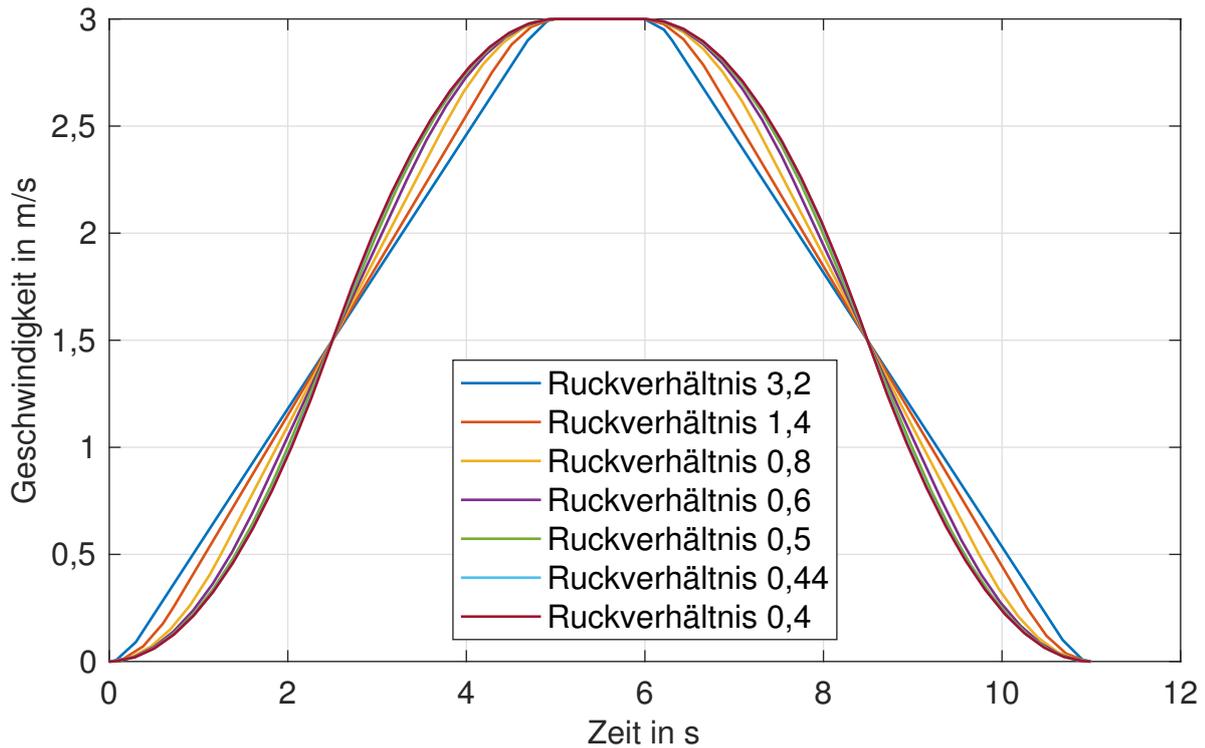


Abbildung 4-12: Vergleich unterschiedlicher Geschwindigkeitsprofile bei gleicher Gesamtfahrzeit

schiedlichen Energiebedarf von Hin- und Rückfahrten zu finden, schlug leider fehl. Der Unterschied beträgt ca. 7,8 kJ und konnte nicht auf unterschiedliche Bewegungen oder Aktionen des RBG zurückgeführt werden. Eine so große Abweichung konnte bei höheren Beschleunigungen und höheren Geschwindigkeiten nicht beobachtet werden. Eine Überprüfung der horizontalen Lage der Schiene zeigte keine Auffälligkeiten.

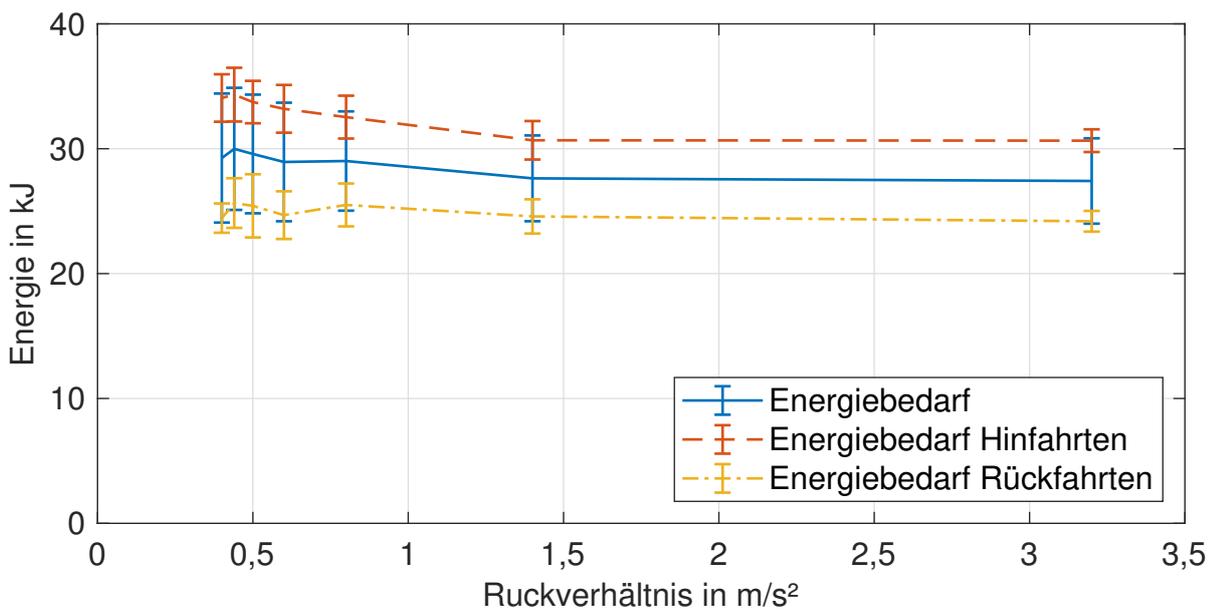


Abbildung 4-13: Energiebedarf in Abhängigkeit des Ruckverhältnisses und zusätzlich aufgeteilt nach Hinfahrten und Rückfahrten

4.3.4 Beschleunigungsmessung

Um zu überprüfen, inwieweit die eingestellten kinematischen Parameter, Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit, die in der Steuerung des Geräts hinterlegt sind, auch den tatsächlichen Beschleunigungen am Gerät entsprechen, werden Beschleunigungsmessungen durchgeführt. Dazu wurde in Zusammenarbeit mit Karzel eine Messeinheit entwickelt, die mit ihren kompakten Abmaßen am Fahrwerk oder am Hubschlitten eines RBGs befestigt werden kann. Innerhalb der Messeinheit kommt ein MPU6050 Beschleunigungssensor zum Einsatz. Dieser arbeitet auf MEMS²⁰ Basis. Die Messeinheit zeichnet die Beschleunigungen in drei Raumrichtungen mit einer Frequenz von rund 1000 Hz auf. Die gemessenen Beschleunigungswerte können durch entsprechende Signalverarbeitung zu Geschwindigkeits- und Positionswerten aufintegriert werden. Details zum Aufbau der Einheit und zur Signalkorrektur können in [Kar-2019] nachgelesen werden. Die gemessenen Daten werden mit Simulationsdaten aus einem einfachen Modell, das eine 7-Phasen Bewegung nachbildet, verglichen. In Abbildung 4-14 ist der gemessene Beschleunigungsverlauf bei der Bewegung von (7,1) nach (1,1) zu sehen.

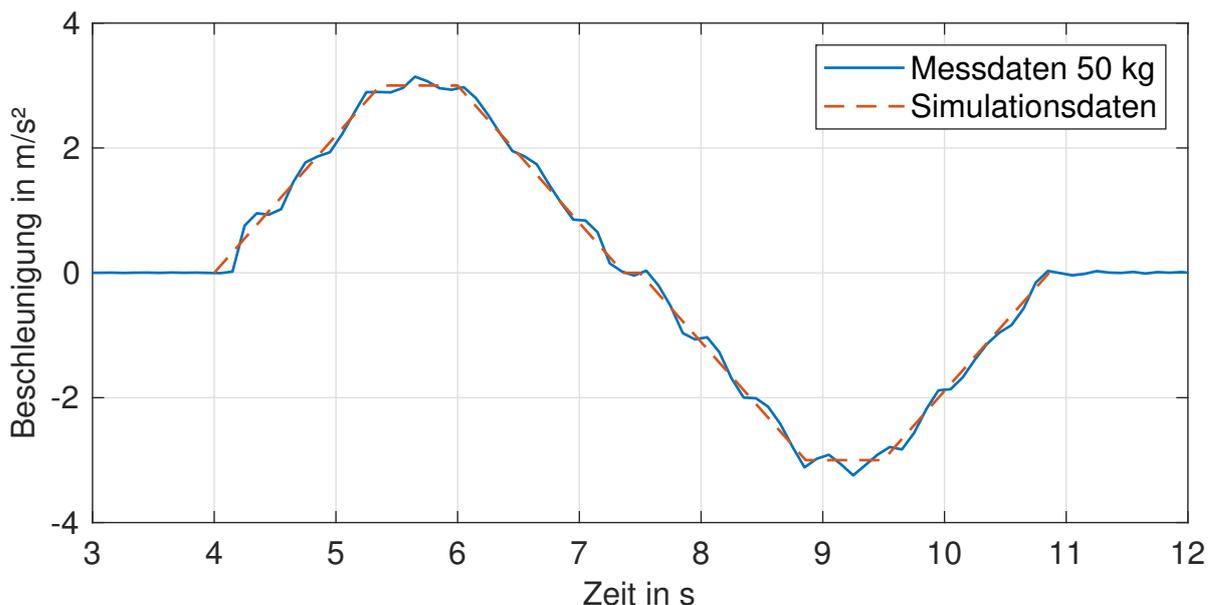


Abbildung 4-14: Vergleich von Simulationsdaten mit Messdaten der Beschleunigung des Fahrtriebs bei 50 kg Nutzlast (vgl. [Rüc-2018b])

Der gemessene Verlauf entspricht dem berechneten Verlauf sehr genau. Es ist lediglich eine leichte Schwingung in der gemessenen Beschleunigung feststellbar. Der Ruck des Fahrtriebs J_x betrug $2,2 \text{ m/s}^3$ und die maximale Beschleunigung $a_{x,\max}$ lag bei 3 m/s^2 . Damit ergibt sich ein Ruckverhältnis JR_x von $0,73 \text{ s}^{-1}$. Es werden Messungen bei unterschiedlichen Nutzlasten und Geschwindigkeiten durchgeführt. Die Messdaten zeigen unabhängig davon eine sehr gute Übereinstimmung. Ähnliches gilt auch für die

²⁰Micro-Electro-Mechanical System

Messung des Beschleunigungsverlaufs am Hubantrieb. Ein exemplarisches Messergebnis ist in Abbildung 4-15 dargestellt.

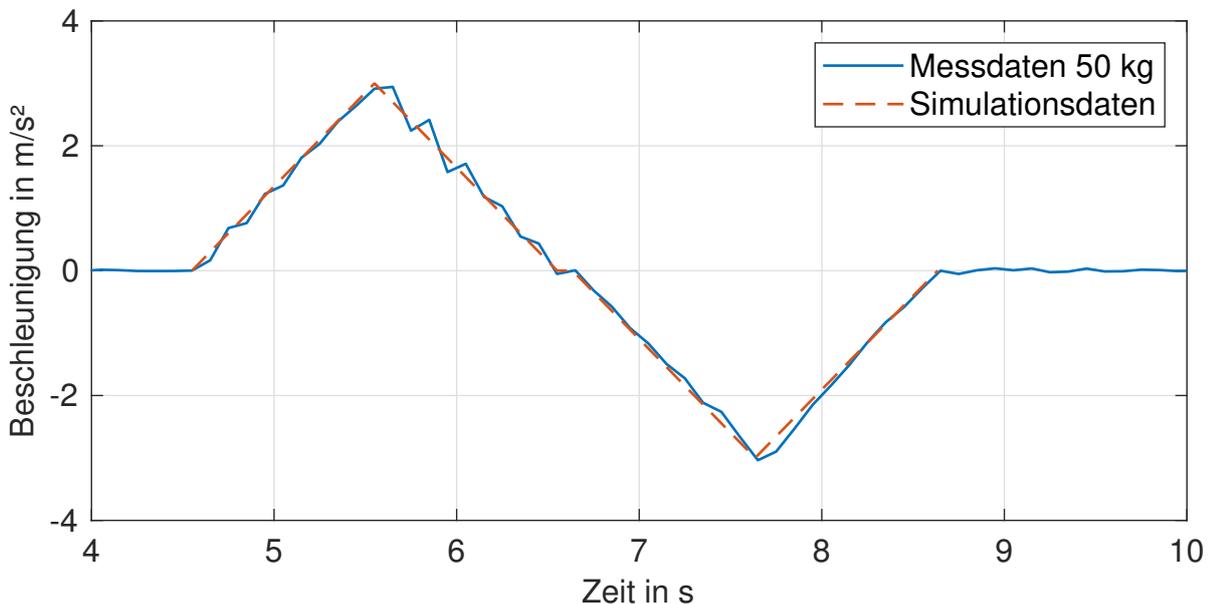


Abbildung 4-15: Vergleich von Simulationsdaten mit Messdaten der Beschleunigung des Hubantriebs bei 50 kg Nutzlast (vgl.[Fot-2018, S. 75])

Bei einem Ruck J_y von 3 m/s^3 und einer maximalen Beschleunigung $a_{y,\max}$ von 3 m/s^2 ergibt sich am Hubantrieb ein Ruckverhältnis JR_y von $1,0 \text{ s}^{-1}$. Damit konnte sichergestellt werden, dass die eingestellten kinematischen Parameter Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit, den in der Realität vorhandenen Werten entsprechen.

4.4 Messungen an RBG-2

Bei RBG-2 konnten verschiedene Messungen durchgeführt werden. Zum einen konnten im Rahmen einer Betriebspause mehrere einzelne Fachanfahrten vermessen werden, zum anderen konnte die Leistungsaufnahme während einer kompletten Betriebswoche ermittelt werden. Die Grundlast des Geräts beträgt $597,6 \text{ W}$ und liegt damit über der von RBG-1. Dies kann an der zusätzlichen Leistungselektronik durch die verbaute Rückspeiseeinheit und anderen Verbrauchern liegen.

4.4.1 Einzelfahrten

Bei den Einzelfahrten konnten reine Fahr-, reine Hub- und kombinierte Bewegungen vermessen werden. Die einzelnen Fahrten mit ihrem jeweiligen gemessenen Energiebedarf sind in Tabelle 4-3 aufgelistet. Zwei Randbedingungen der Messungen an RBG-1 konnten bei RBG-2 nicht erfüllt werden. Das Gerät wird nicht warmgefahren

und die Anzahl an einzelnen Fahrten war deutlich geringer als 20 pro Bewegung (vgl. RBG-1). Die Anzahl der Einzelbewegungen n , aus denen der Mittelwert gebildet wird, ist deswegen in der Tabelle hinter dem Messwert vermerkt. Am Gerät ist eine Rückspeiseeinheit verbaut und daher wird der Energiebedarf von Hub- und Senkbewegung getrennt dargestellt. Bei der Senkbewegung wird jener Energiebedarf gemessen, der tatsächlich über die Anschlussleitungen zurückfließt. Hier ist bereits der Teil, der die Grundlast des Geräts abdeckt, nicht mehr enthalten. Rechnet man die Grundlast heraus, dann verbessert sich das Verhältnis des Energiebedarfs für einen Hub und der zurückgespeisten Energie beim Senkvorgang. Auffällig ist der geringere Energiebedarf bei Bewegungen mit Nutzlast. Das kann auf drei mögliche Effekte zurückgeführt werden: Erstens können Schwankungen im Energiebedarf verantwortlich sein, die sich bei der geringen Anzahl an Fahrten nicht herausmitteln. Zweitens können Aufwärmeeffekte die Messungen beeinflussen, da zuerst die Fahrten ohne Nutzlast durchgeführt werden (vgl. [Fot-2018, S. 77]). Dies erscheint aber aufgrund der geringen Warmfahrzeit durch die wenigen Einzelfahrten eher unwahrscheinlich. Drittens ist der Einfluss der zusätzlichen Masse auf den Energiebedarf insgesamt klein, da das Gerät über eine Rückspeiseeinheit verfügt. Die zusätzliche Masse gibt ihre kinetische Energie beim Bremsvorgang wieder ab. Diese zusätzliche Bremsenergie kann durch die Rückspeiseeinheit genutzt werden. Die erhöhte Reibung durch die Zunahme der Gesamtmasse um 5 % wird von den ersten beiden Effekten mehr als kompensiert.

Tabelle 4-3: Messergebnisse der untersuchten Fahrten von RBG-2 inklusive Grundlast (F = Fahrbewegung, H = Hubbewegung, S = Senkbewegung, KB = Kombinierte Bewegung)

Bewegungsart	Strecke in x-Richtung m	Strecke in y-Richtung m	Energiebedarf Messung in kJ ohne Nutzlast und Anzahl Bewegungen (n)	Energiebedarf Messung in kJ mit 435 kg Nutzlast und Anzahl Bewegungen (n)
F	17,6	0,0	40,59 ($n = 6$)	38,50 ($n = 6$)
F	30,0	0,0	58,10 ($n = 6$)	57,61 ($n = 4$)
H	0,0	4,8	110,93 ($n = 3$)	131,50 ($n = 3$)
S	0,0	-4,8	-20,91 ($n = 3$)	-43,84 ($n = 3$)
H	0,0	15,9	344,79 ($n = 3$)	411,09 ($n = 3$)
S	0,0	-15,9	-83,20 ($n = 3$)	-152,37 ($n = 3$)
KB	±17,6	±4,8	154,30 ($n = 3$)	155,10 ($n = 3$)

Abbildung 4-16 zeigt die Ergebnisse für die Fahrbewegungen in einem Energie-über-Fahrstrecke-Diagramm dar. Durch die deutlich längeren Fahrzeiten und die höhere Grundlast ist der Einfluss der Grundlast größer als bei RBG-1. Die zwei Messpunkte werden linear verbunden, da hier die variable Größe, die Reibarbeit, hauptsächlich linear in die Messung eingeht. Die Beschreibung der Reibarbeit und ihr Beitrag zum

Energiebedarf sind in Abschnitt 5.2.1 enthalten.

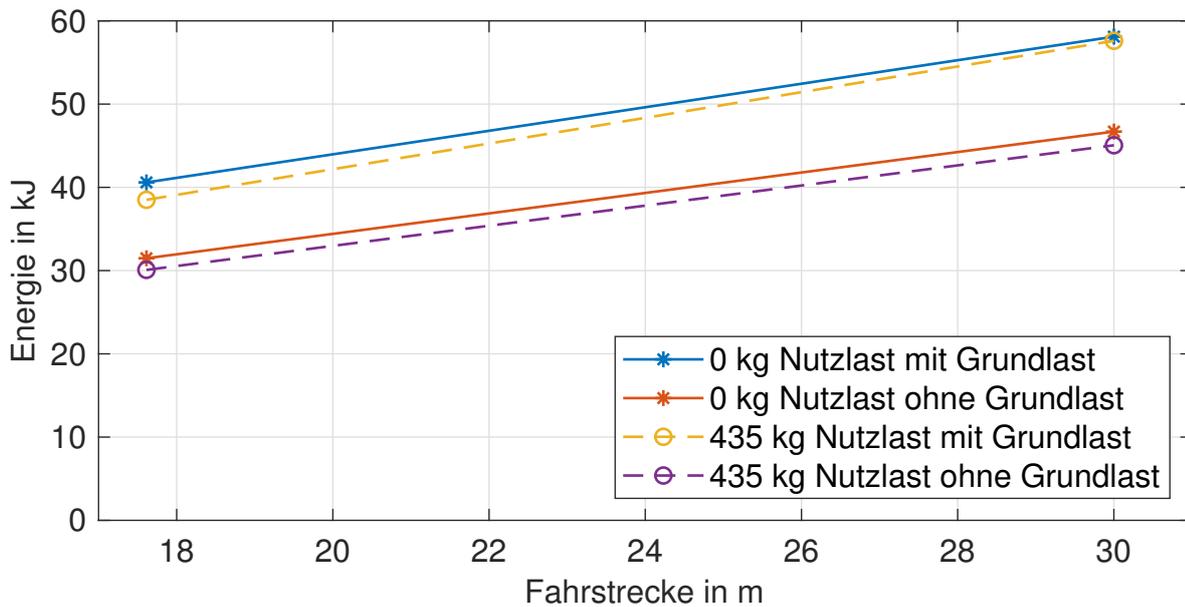


Abbildung 4-16: Energiebedarf einzelner Fahrbewegungen in Abhängigkeit von der Fahrstrecke (vgl. [Fot-2018, S. 77])

Bei den Hubbewegungen ist der Einfluss der zusätzlichen Nutzlast deutlich sichtbar. Abbildung 4-17 zeigt die Messwerte für die durchgeführten Hübe. Auch hier werden die jeweils zusammengehörenden Messpunkte für die beiden Hubhöhen mit Geraden verbunden. Aufgrund der hohen Masse des Hubschlittens ist der Energiebedarf für die Hübe deutlich größer verglichen mit RBG-1. Allerdings wird ein Teil dieser Energie bei der entsprechenden Senkbewegung wieder zurückgewonnen. Die Werte driften zu größeren Hubhöhen hin, auseinander. Dies liegt an der längeren Hubzeit und des damit größeren Einflusses der Grundlast.

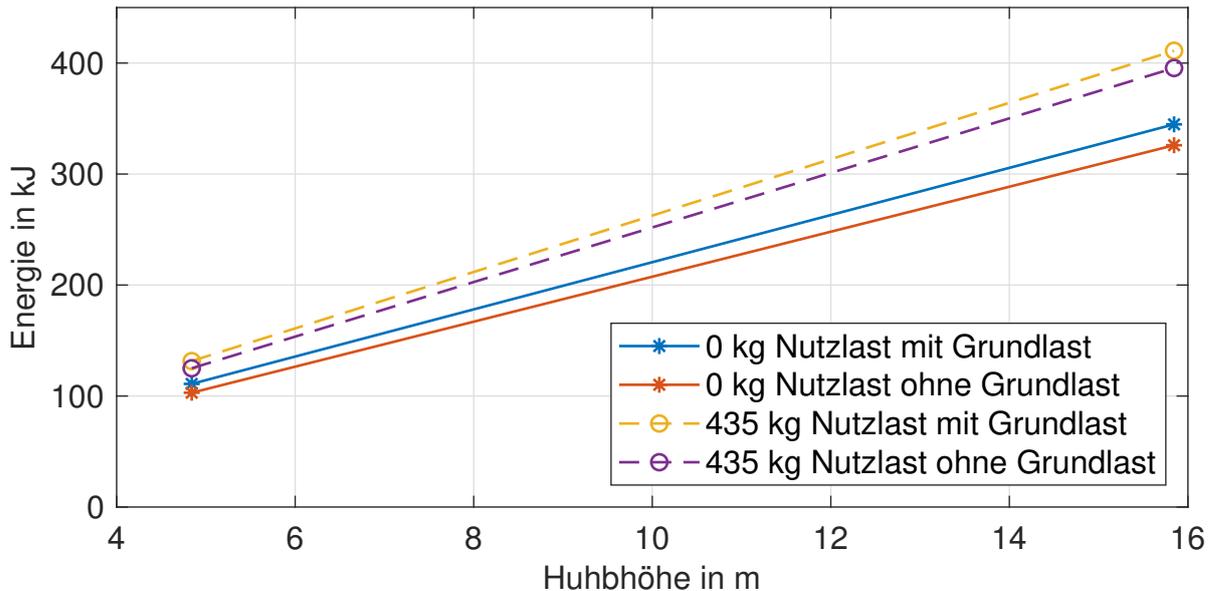


Abbildung 4-17: Energiebedarf einzelner Hubbewegungen in Abhängigkeit von der Hubhöhe (vgl. [Fot-2018, S. 78])

4.4.2 Beschleunigungsmessungen

Auch an RBG-2 werden Beschleunigungsmessungen durchgeführt. Die Beschleunigungsprofile sind durch ein höheres Ruckverhältnis als das von RBG-1 geprägt. Die Ergebnisse der Beschleunigungsmessung des Fahrtriebs sind in Abbildung 4-18 dargestellt. Es stellt sich beinahe ein rechteckiges Beschleunigungsprofil ein. Das Gerät schwingt dabei erheblich mehr als RBG-1. Die geringen maximalen Beschleunigungen, verbunden mit der langen Beschleunigungsdauer, sind auf den Einsatz eines Reibradantriebs zurückzuführen. Hier ist die maximal übertragbare Reibungskraft die Grenze für den maximalen Beschleunigungswert. Der Ruck wird groß gewählt, um die Fahrzeiten trotzdem gering zu halten und um die maximale Beschleunigung schnell zu erreichen.

Betrachtet man den zugehörigen Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 4-19 über die Fahrzeit von 27,5 s, so zeigt sich, dass die Geschwindigkeitswerte sehr nahe am Sollverlauf liegen. Der Antrieb kann damit trotz der höheren Schwingungen, dem Sollverlauf der Geschwindigkeit genau folgen.

Am Hubantrieb zeigt sich ein ähnliches Bild. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in den Abbildungen B-1 und B-2 im Anhang B dargestellt. Auch an RBG-2 konnte damit gezeigt werden, dass die eingestellten kinematischen Parameter von der Steuerung sehr genau umgesetzt werden.

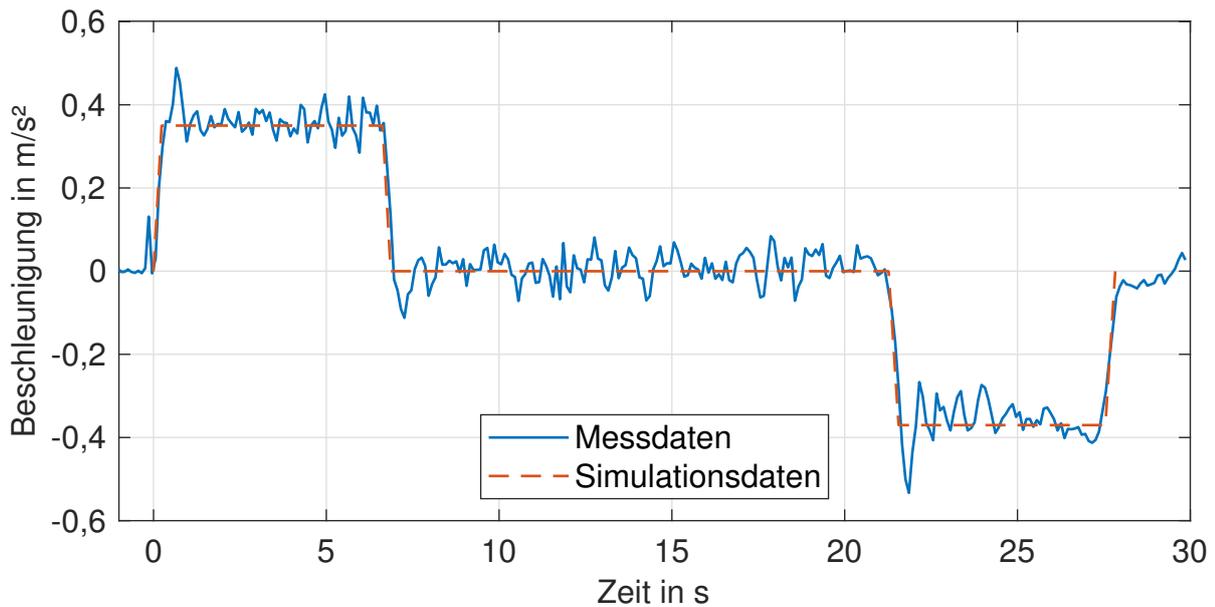


Abbildung 4-18: Vergleich von Simulationsdaten mit Messdaten der Beschleunigung des Fahrantriebs von RBG-2 ohne Nutzlast (vgl. [Fot-2018, S. 82])

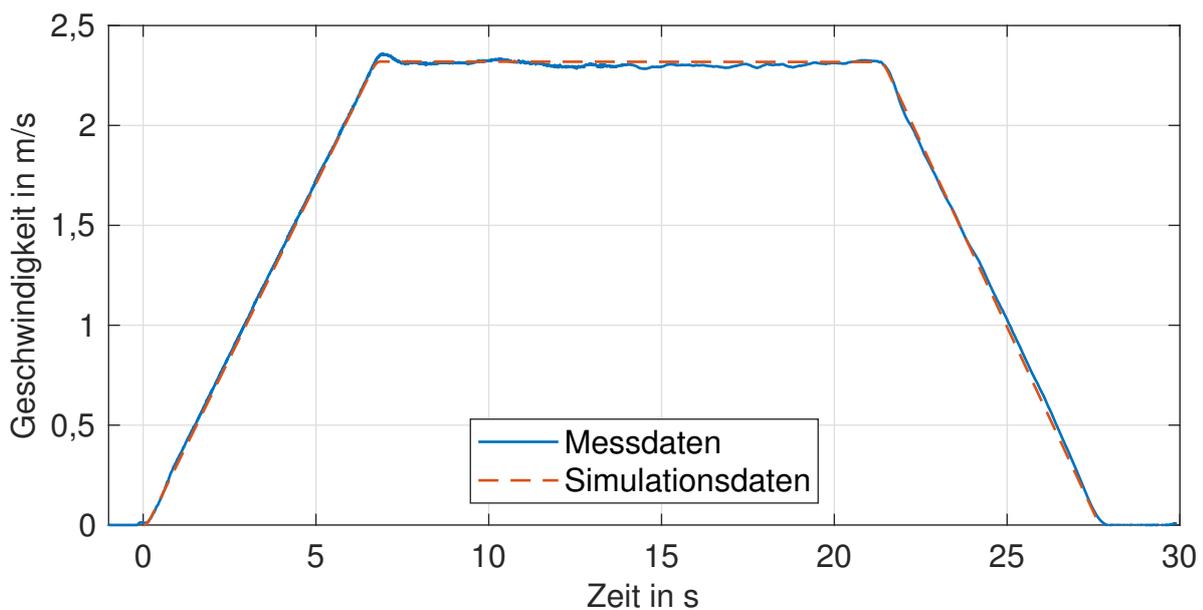


Abbildung 4-19: Vergleich von Simulationsdaten mit Messdaten der Geschwindigkeit des Fahrantriebs von RBG-2 ohne Nutzlast (vgl. [Fot-2018, S. 83])

4.4.3 Langzeitmessungen

Bei RBG-2 konnte über die Einzelfahrten hinaus der Leistungsverlauf einer kompletten Betriebswoche aufgezeichnet werden. Die Daten wurden im Jahr 2018 aufgezeichnet und sind in Abbildung 4-20 dargestellt. Die Messungen begannen am Montag, den 10.04. um 14:52 Uhr und endeten am Montag, den 17.04. um 14:42 Uhr. Warmlaufeffekte spielten bei diesen Messungen keine Rolle, da nicht der Energiebedarf für einzelne Fahrten ermittelt werden sollte. Das Gerät arbeitete in dieser Zeit von jeweils

06:00 Uhr morgens bis 24:00 Uhr abends. Das Messintervall bei dieser Messung beträgt $t_{MI} = 150$ s.

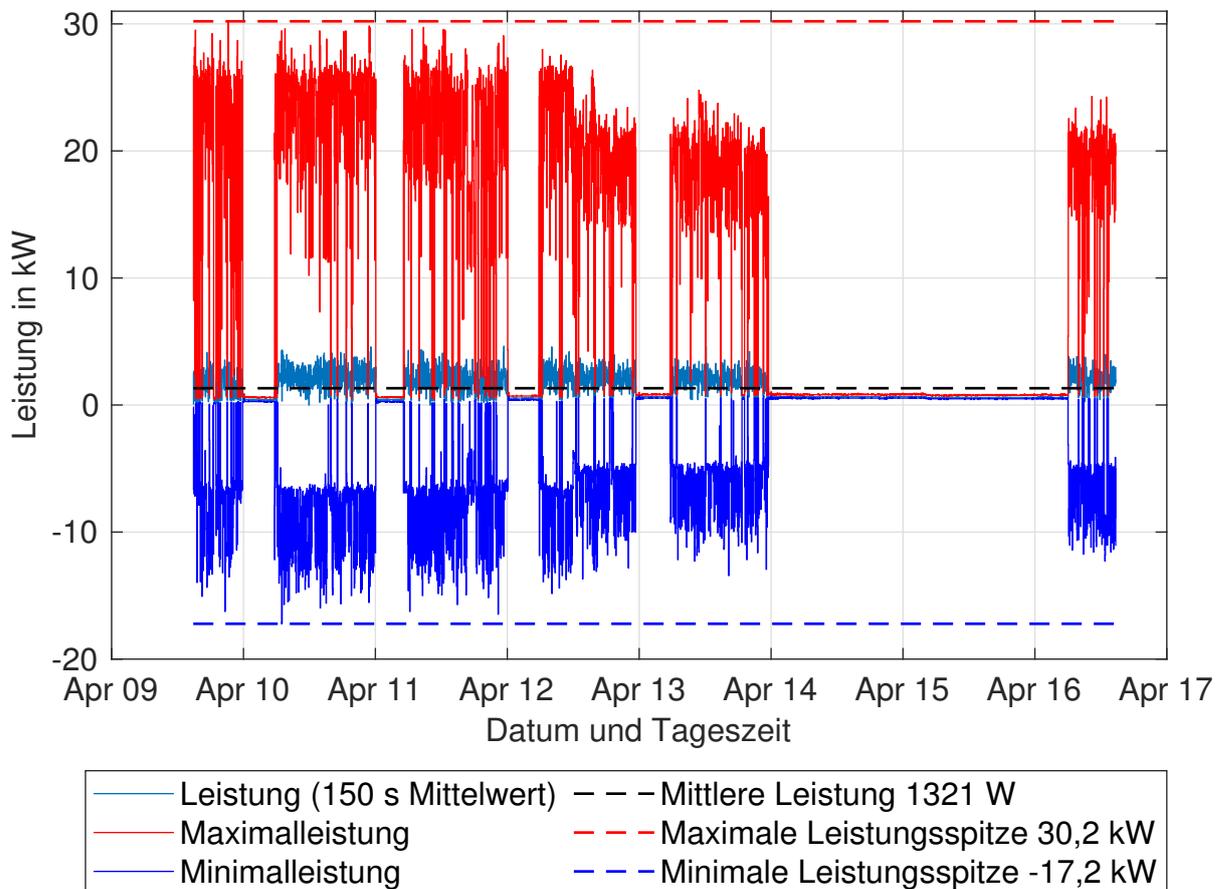


Abbildung 4-20: Leistungsaufnahme von RBG-2 über den Zeitraum von einer Woche (vgl. [Rüc-2018c])

Dargestellt sind der gemessene Mittelwert der Leistung und die jeweils in einem Intervall gemessenen maximalen und minimalen Leistungswerte. In der Nacht von 00:00 Uhr bis 06:00 Uhr schwankt die Grundlast zwischen 450 W und 600 W. Im Schnitt betrug die Grundlast des Geräts ca. 500 W. Der Mittelwert der Leistung über den kompletten Messzeitraum hinweg beträgt 1321 W. Damit werden ca. 38 % des Energiebedarfs durch die Grundlast verursacht. Dieser Anteil zeigt, dass die Reduktion der Grundlast ein hohes Optimierungspotenzial bietet.

Die zurückgespeisten Leistungsspitzen sind durchwegs deutlich geringer als die aufgenommenen Leistungsspitzen. Auffällig sind die hohen Leistungsspitzen im Vergleich zur geringen mittleren Leistung. Diese Charakteristik wird besonders durch die Rückspeiseeinheit gefördert. Nach einer Woche hat das Gerät damit laut Messung 225,59 kWh an elektrischer Energie benötigt. Das gesamte HRL beinhaltet vier Gasen. Extrapoliert man die mittlere Leistung auf vier RBGs, dann liegt diese bei ca. 5300 W für das HRL. Vergleicht man diese Leistung mit der gesamten Leistungsaufnahme des Logistikzentrums, dann fällt auf, wie wenig Leistung ein effizientes HRL

eigentlich benötigt. Im Anhang B.2 sind die Messergebnisse für die beiden Niederspannungshauptversorgungen des Betriebs für den Zeitraum von jeweils einer Woche dargestellt. Die mittlere Leistungsaufnahme liegt oberhalb von 200 kW. Damit benötigt das HRL in etwa 2,5 % der mittleren Leistung. Teile der Erkenntnisse aus diesen Langzeitmessungen werden in Abschnitt 8.2 zur Abschätzung der Relevanz der Arbeit verwendet.

4.5 Messungen an RBG-3

Ursprünglich waren im Rahmen der Messungen an RBG-3 nur Langzeitmessungen geplant. Vor Betriebsbeginn werden im Rahmen einer Kurzzeitmessung zusätzlich einige Einzelfahrten vermessen. Dabei werden neben der Leistung auch die Beschleunigungen der Antriebe des Geräts gemessen und damit die Angaben der kinematischen Parameter überprüft. Auch hier zeigt sich, dass das Gerät seinen vorgegebenen Beschleunigungsdaten genau folgt. Das Gerät konnte vor den Messungen nicht warmgefahren werden und eine mehrfache Wiederholung der Einzelfahrten ist nicht möglich. Insgesamt werden vier Messungen durchgeführt. Es werden zwei Fahrbewegungen, eine Hub- und Senkbewegung und eine kombinierte Bewegung vermessen. In Abbildung 4-21 ist die Leistungskurve der Einzelfahrten bei einem Messintervall von $t_{MI} = 0,5 \text{ s}$ dargestellt.

Die Messergebnisse der Einzelfahrten aus Messung-1 sind in Tabelle 4-4 zusammengefasst. Aufgrund der verbauten Rückspeiseeinheit werden Hub- und Senkbewegung getrennt dargestellt. Die Grundlast von RBG-3 beträgt ca. 600 W. Ohne Grundlast lässt sich eine bessere Aussage über die Effizienz der Rückspeiseeinheit treffen. Der Anteil der Grundlast verringert den Bedarf beim Hub und erhöht die zurückgespeiste Energie, da diese ja schon zur Deckung der Grundlast in dem Zeitraum verwendet wird. Von den 58,71 kJ, die beim Hub aufgenommen werden, können nur 24,39 kJ zurückgewonnen werden. Das entspricht einem Anteil von 41,5%. Dieser Anteil ist deutlich kleiner als der meist mit ca. 90 % angegebene Wirkungsgrad einer Rückspeiseeinheit. Neben den mechanischen Widerständen im System ist aber vermutlich ein geringerer effektiver Wirkungsgrad im realen Einsatz die Ursache. Nachdem die Rückspeiseeinheit einen großen elektrischen Leistungsbereich abdecken muss, kann sie nicht immer in ihrem optimalen Betriebszustand arbeiten.

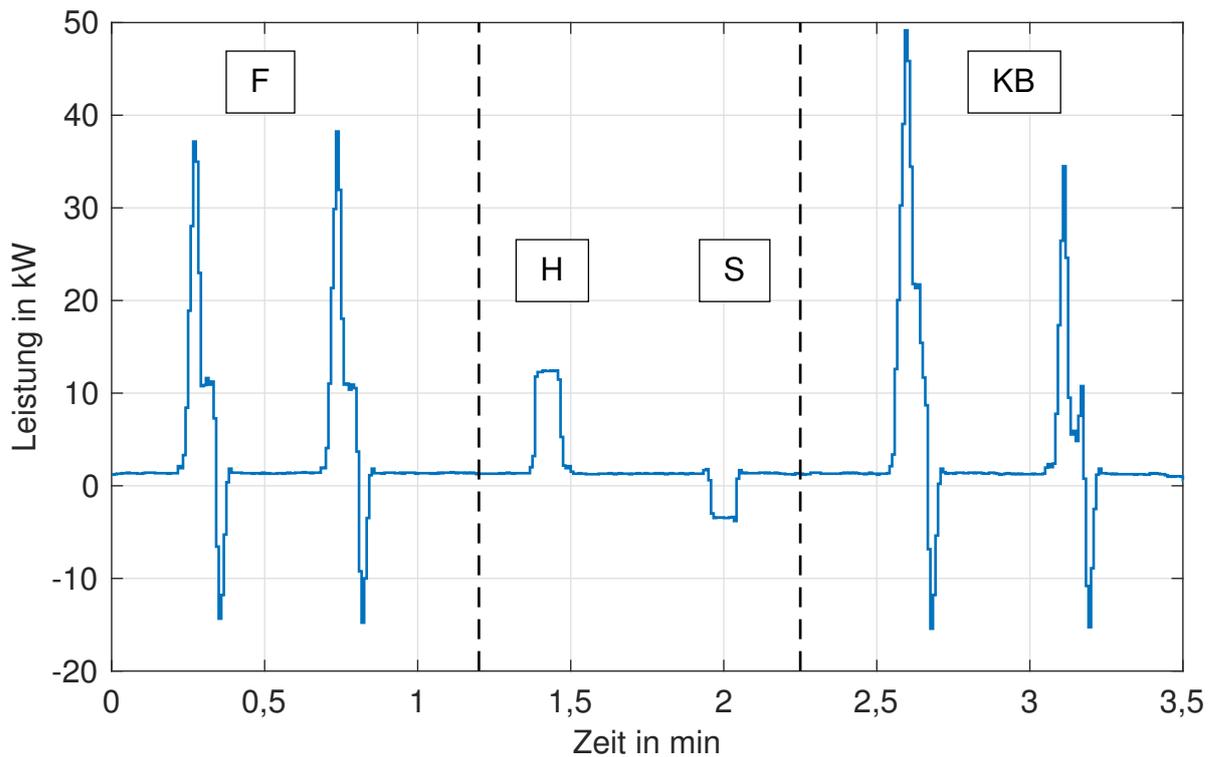


Abbildung 4-21: Leistungsaufnahme von RBG-3 während Messung-1
 F: Fahrbewegung, H: Hubbewegung, S: Senkbewegung und KB: kombinierte Bewegung (vgl. [Fot-2018, S. 86])

Tabelle 4-4: Ergebnisse der untersuchten Fahrten von RBG-3 aus Messung-1 inklusive Grundlast (F = Fahrbewegung, H = Hubbewegung, S = Senkbewegung, KB = Kombinierte Bewegung)

Bewegungsart	Strecke in x-Richtung m	x-in	Hubhöhe in y-Richtung in m	Energiebedarf Messung in kJ mit Anzahl Bewegungen [n] mit Grundlast	Energiebedarf Messung in kJ mit Anzahl Bewegungen [n] ohne Grundlast
F	36,2		0,0	91,10 (n = 2)	77,29 (n = 2)
H	0,0		10,4	69,49 (n = 1)	58,71 (n = 1)
S	0,0		-10,4	-16,98 (n = 1)	-24,39 (n = 1)
KB (Hinfahrt)	36,2		10,4	147,66 (n = 1)	134,86 (n = 1)
KB (Rückfahrt)	-36,2		-10,4	64,40 (n = 1)	50,26 (n = 1)

Nach der Aufnahme der Einzelfahrten werden drei längere Messungen durchgeführt. Diese ermöglichen eine Aussage über die generelle Leistungsaufnahme im Betrieb des Geräts. Exemplarisch ist in Abbildung 4-22 die Leistungsaufnahme während Messung-2 über den Zeitraum von 36 min mit einem Messintervall von 0,5 s dargestellt. Zusätzlich sind der globale Mittelwert der Leistung über die gesamte Messdauer und die Grundlast eingezeichnet.

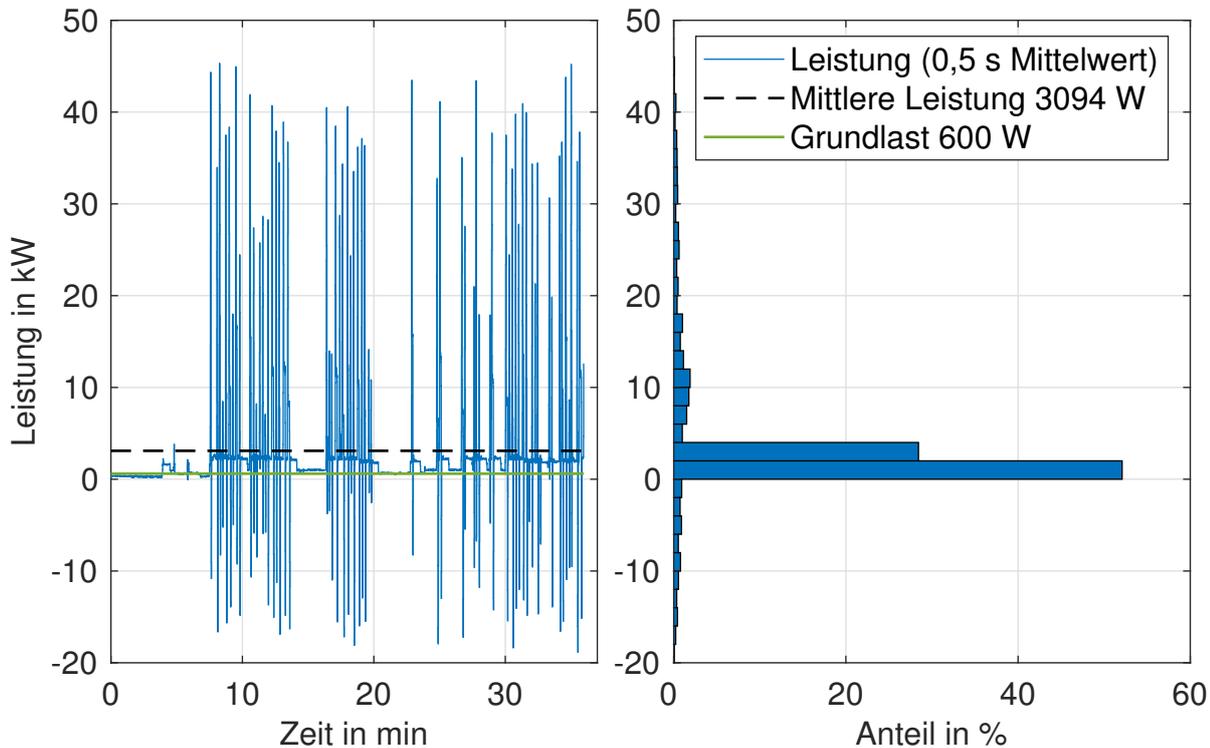


Abbildung 4-22: Leistungsaufnahme von RBG-3 während Messung-2
Balkenhöhe im Histogramm: 2000 W

Neben der Leistungskurve ist ein Histogramm der Leistung in 2 kW Schritten und der Häufigkeit der gemessenen Leistungswerte dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass der Leistungsverlauf hauptsächlich durch hohe Leistungsspitzen und eine moderate mittlere Leistung geprägt ist. Die zurückgespeisten Leistungsspitzen sind durchwegs kleiner als die Spitzenwerte der Leistungsaufnahme. Die Ursache kann nicht allein in den mechanischen Widerständen liegen, da diese wesentlich geringer als die Verzögerungskraft sind. Das spricht dafür, dass die Rückspeiseeinheit die hohen Leistungsspitzen nur mit vermindertem Wirkungsgrad verarbeiten kann. Fasst man die Ergebnisse der Messungen-2 bis -4 zusammen, erhält man die in Abbildung 4-23 dargestellten Leistungskurven. Da die Messintervalle während der drei Messungen zwischen 0,5 s und 5 s liegen, werden die Messergebnisse im Nachgang auf ein einheitliches Intervall gemittelt. Um die Darstellung zu entzerren, wird ein Messintervall von 60 s festgelegt. Der 60 s Mittelwert schwankt dann nur noch gering um den globalen Mittelwert der Leistung.

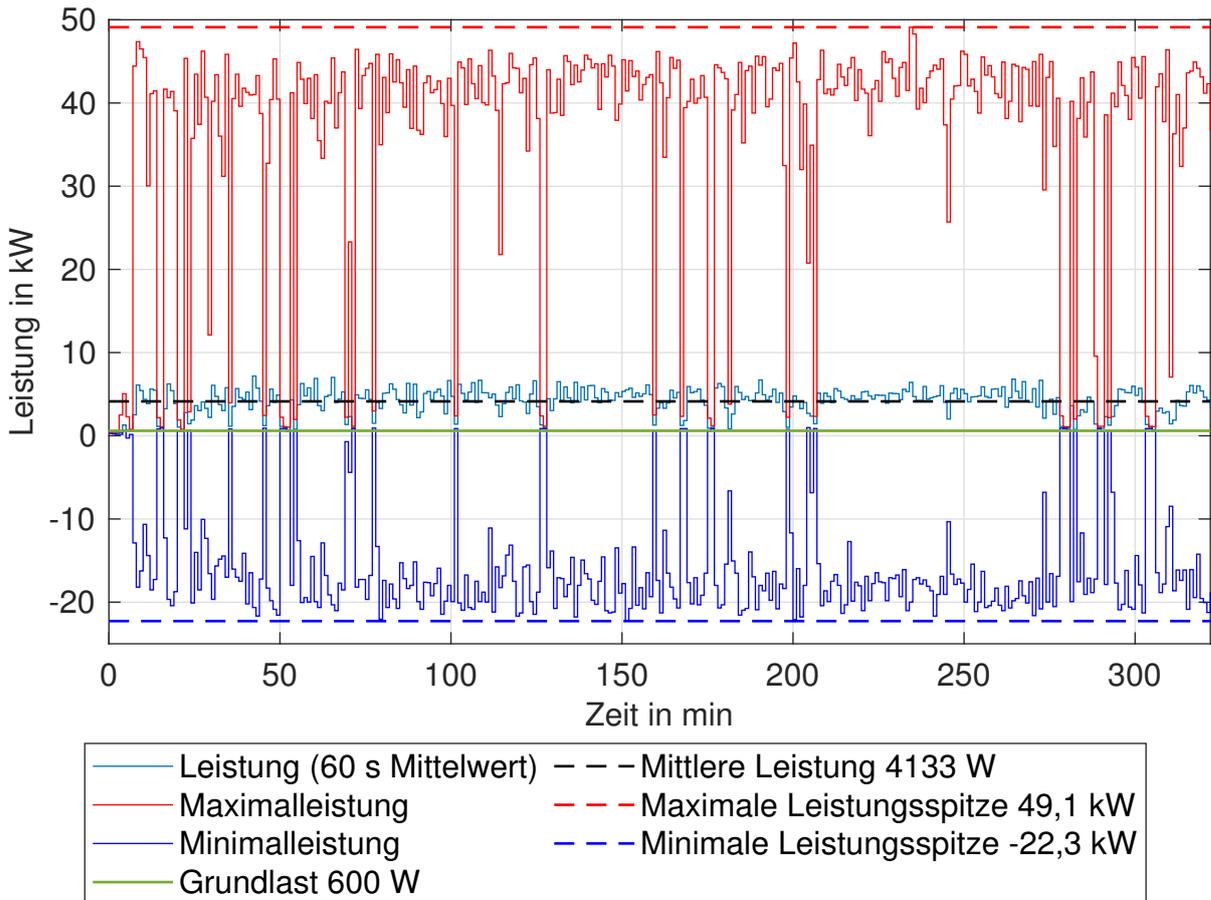


Abbildung 4-23: Leistungsaufnahme von RBG-3 während der Messungen 2 bis 4

Alle Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 4-5 dargestellt. Der Anteil der zurückgespeisten Energie berücksichtigt nur Energie, die tatsächlich vom Gerät an das Netz zurückgespeist wird. Tatsächlich gewinnt die Rückspeiseeinheit, wie oben beschrieben, etwas mehr zurück. Diese Energie wird aber teilweise zur Deckung der Grundlast verwendet. Die maximal zurückgespeisten Leistungsspitzen sind zudem deutlich kleiner als die maximal aufgenommenen Leistungsspitzen.

4.6 Messungen an RBG-4

An RBG-4 werden keine Einzelfahrten vermessen. Es konnte lediglich der Betrieb an einem Tag in mehreren Zeiträumen vermessen werden. Insgesamt werden drei Messungen mit unterschiedlichen Messintervallen durchgeführt. Exemplarisch ist wieder die erste Messung mit einem Messintervall von $t_{MI} = 0,5$ s und 36 min Messdauer mit detaillierter Leistungskurve und Histogramm in Abbildung 4-24 dargestellt. Der Betrieb zeichnet sich durch ein ähnliches Verhalten wie der von RBG-3 aus. Die mittlere Leistung liegt bei ca. 4,1 kW. Interessant ist, dass sich die Leistungsaufnahme von RBGs in AKLs mit hohen Fahrgeschwindigkeiten nicht zu stark von Geräten in großen APLs

Tabelle 4-5: Ergebnisse der Messungen 2, 3 und 4 an RBG-3

Parameter	Messung-2	Messung-3	Messung-4	Messungen kombiniert
Messzeit in min	36	253	36	325
Messintervall in s	0,5	5,0	0,5	60
Energieverbrauch Brutto in kJ	7584,31	69 871,49	9080,52	86 536,32
Rückgespeiste Energie in kJ	884,68	3312,32	1336,33	5533,34
Energieverbrauch Netto in kJ	6699,63	66 559,16	7744,19	81 002,98
Anteil der Rückspeisung in %	13,20	4,98	17,25	6,39
Mittlere Leistung in kW	3,09	4,37	3,58	4,13
Maximale Leistung in kW	47,37	49,11	46,39	49,11
Minimale Leistung in kW	-21,02	-22,27	-21,29	-22,27

unterscheidet. Für die hohen Leistungsspitzen sind in beiden Fällen die Fahrbewegungen, oft in Kombination mit gleichzeitig startenden Hubbewegungen, verantwortlich.

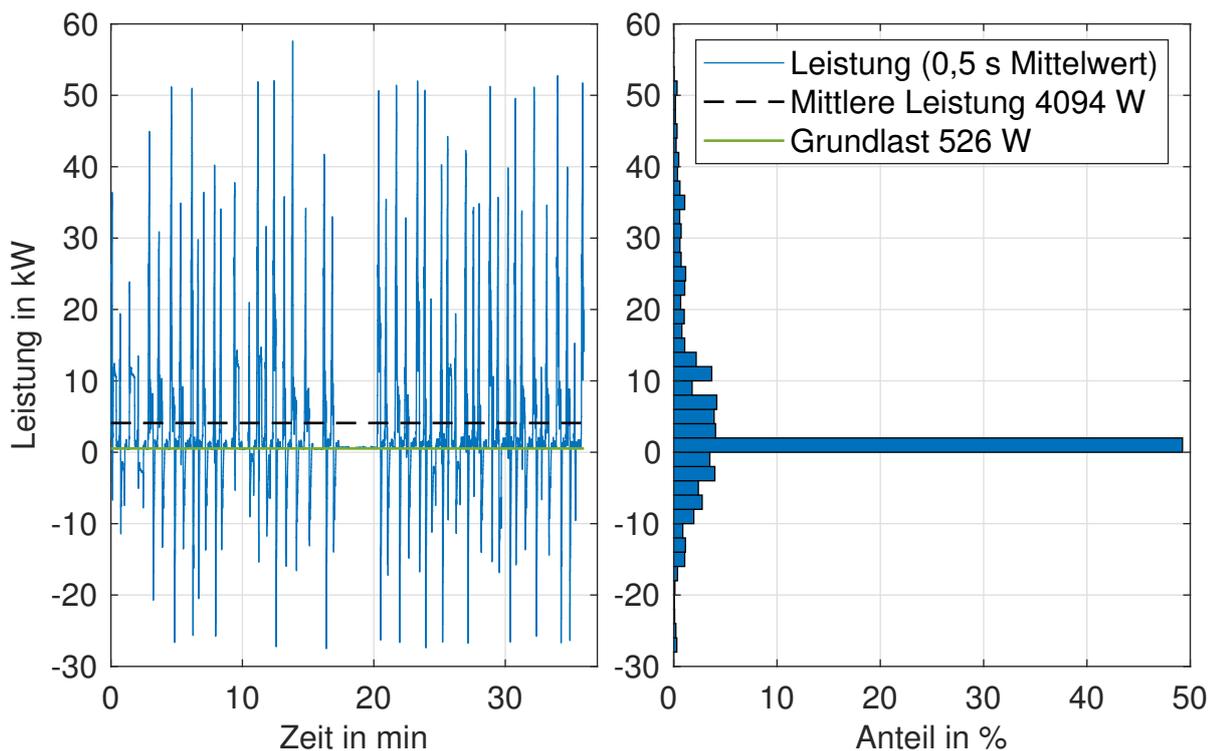


Abbildung 4-24: Leistungsaufnahme von RBG-4 während Messung-1
Balkenhöhe im Histogramm: 2000 W

Die Zusammenfassung der drei Messintervalle ist analog zu den Messungen von RBG-3 in Abbildung 4-25 dargestellt. Die maximal gemessene Leistungsspitze lag bei 60,62 kW bei einer mittleren Leistung über alle Messungen von ca. 4 kW. Damit erfolgt auch der Betrieb von RBG-4 mit einer geringe mittlere Leistung und zwischenzeitlich

auftretenden hohen Leistungsspitzen. Die Grundlast liegt mit ca. 526 W in einem ähnlichen Bereich wie die der vorherigen Geräte.

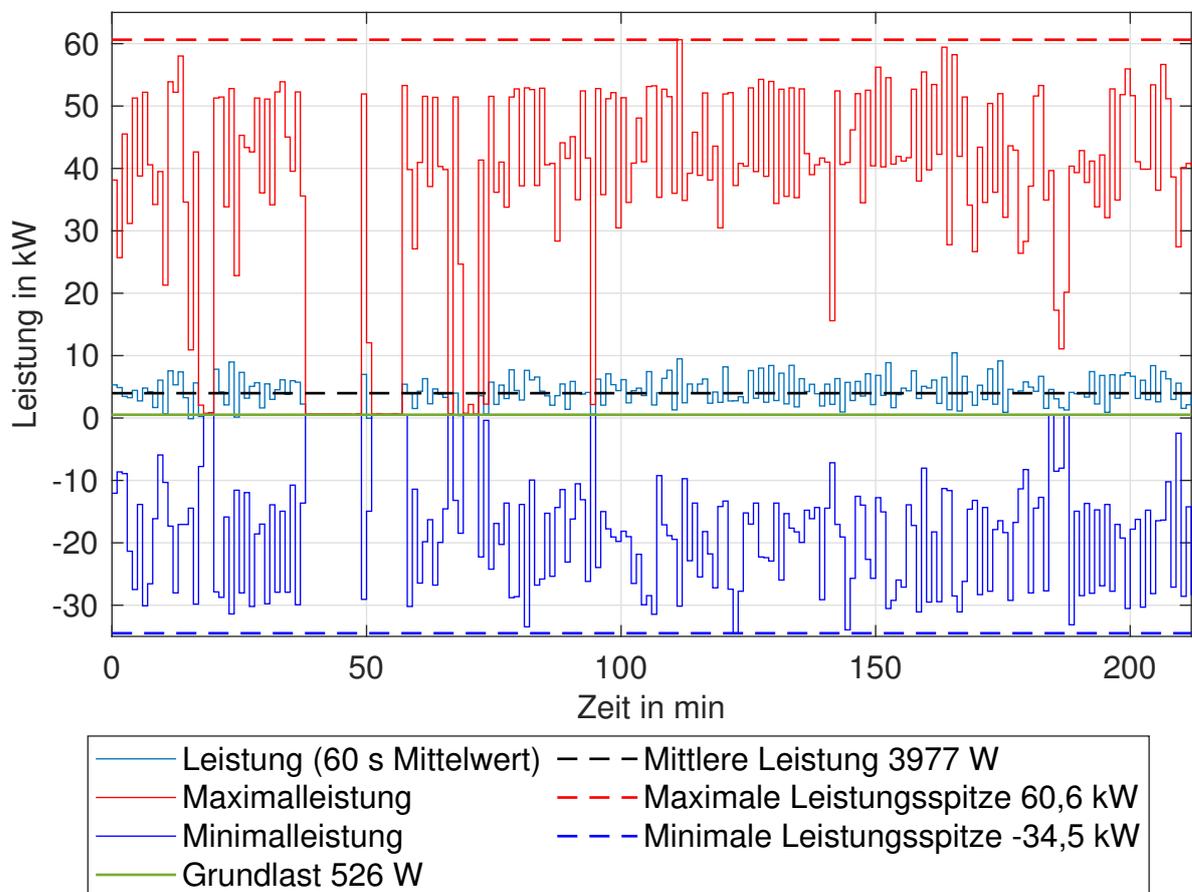


Abbildung 4-25: Leistungsaufnahme von RBG-4 während der Messungen 1 bis 3

Die zusammengefassten Messwerte sind abschließend in Tabelle 4-6 dargestellt. Die Anteile tatsächlich zurückgespeister Energie sind höher als bei RBG-3. Das kann einerseits an einem Betrieb mit weniger Unterbrechungen und andererseits an der für die Rückspeiseeinheit günstigeren Betriebsweise des Geräts liegen. Vergleichbar sind hier am besten Messungen mit gleichem Messintervall. Wird das Messintervall zu lang, kann die zurückgespeiste Energie nicht mehr zuverlässig aus der Leistungskurve berechnet werden.

4.7 Fazit der Messungen

In den Messungen an den vier Geräten konnten verschiedene Zusammenhänge untersucht werden. Einerseits werden mit den Messreihen an RBG-1 vorhandene Ergebnisse aus [Sch-2012a] zum Einfluss kinematischer Parameter bestätigt. Andererseits konnten mit der Untersuchung des Ruckverhältnisses neue Ergebnisse in diesem Bereich vorgestellt werden. Es wird erstmalig eine Untersuchung des Zusammenhangs

Tabelle 4-6: Ergebnisse der Messungen 1, 2 und 3 an RBG-4

Parameter	Messung-1	Messung-2	Messung-3	Messungen kombiniert
Messzeit in min	36	36	144	216
Messintervall in s	0,5	0,5	2,0	60
Energieverbrauch Brutto in kJ	11 657,58	5467,04	50 036,34	67 160,96
Rückgespeiste Energie in kJ	2801,42	1167,84	11 479,06	15 448,32
Energieverbrauch Netto in kJ	8856,17	4299,20	38 557,27	51 712,64
Anteil der Rückspeisung in %	24,03	21,32	22,94	23,00
Mittlere Leistung in kW	4,09	1,99	4,45	3,98
Maximale Leistung in kW	58,02	53,29	60,62	60,62
Minimale Leistung in kW	-31,40	-30,20	-34,50	-34,50

von Ruckverhältnis bzw. der Form des Beschleunigungsprofils und Energiebedarf vorgestellt. Auch eine sinnvolle Anzahl von 20 Wiederholungen für eine einzelne Fahrt wird im Rahmen der Untersuchungen festgelegt. Die ermittelten Daten von Einzelfahrten werden in Abschnitt 5.3 für die Validierung des Simulationsmodells benutzt.

Im Rahmen der Langzeituntersuchungen an RBG-1 werden Warmlaufeffekte messtechnisch untersucht und deren Einfluss belegt. Zum Warmlaufverhalten existierten bis jetzt nur Erklärungsansätze von Braun [Bra-2016a, S. 172–174]. Ihre qualitativen Aussagen konnten um konkrete Werte für die Abnahme der mittleren Leistung ergänzt werden.

Ähnliche Charakteristika in den Leistungskurven, also hohe Leistungsspitzen bei niedriger mittlerer Leistung, konnten bei allen vier Geräten festgestellt werden. Der Einfluss der Grundlast auf den Energiebedarf von RBGs in der Praxis konnte mit den Messungen unterstrichen werden. Auf Basis der Messungen an vier Geräten lässt sich keine allgemein gültige Aussage treffen, aber die Übereinstimmung in den Daten der Geräte lässt doch einen gewissen Schluss zu, dass die Grundlast ein relevanter Faktor für den gesamten Energiebedarf ist. Dieser Effekt tritt aber vor allem durch die in der Praxis nicht vermeidbaren Stillstände auf. Diese Effekte konnten damit zum ersten Mal messtechnisch sichtbar gemacht werden.

Im Rahmen der Messungen an den vier Geräten konnten die Einflüsse vieler Parameter nicht detailliert untersucht werden. Aus diesem Grund und um die Erkenntnisse aus den Messungen auf eine Vielzahl von Geräten übertragen zu können, sind weitere Untersuchungen auf Basis von Simulationen notwendig. Diese dienen vor allem dazu, unterschiedliche Regalabmessungen, kinematische Parameter und Gerätemassen im Zusammenspiel berücksichtigen zu können. Dazu werden die Erkenntnisse aus dem Stand der Wissenschaft (siehe Kapitel 2) und den Messungen (siehe Kapitel 4) im Kapitel 5 zur Entwicklung des Simulationsmodells verwendet.

5 Untersuchung von Durchsatz und Energiebedarf über Simulation

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Simulationsmodells, seine Validierung und die Umsetzung der Simulationsstudien vorgestellt. Das beschriebene Modell und die Vorgehensweise zur Ermittlung der Ergebnisse sind bereits zum Teil in [Rüc-2020a] veröffentlicht worden. In Abschnitt 5.1 werden zunächst die Grundlagen des Modells vorgestellt, anschließend wird in Abschnitt 5.2 die Simulation der Energie- und Zeitbedarfe erläutert. In Abschnitt 5.3 wird die Validierung des Modells beschrieben und abschließend wird in Abschnitt 5.4 die Durchführung der Simulationsstudien vorgestellt.

5.1 Grundlagen des Simulationsmodells

Die Entwicklung des Simulationsmodells orientiert sich an der Struktur des Modellbildungsprozesses nach VDI 4465. Dabei kommen folgende Schritte zum Einsatz [VDI-4465, S. 4]:

- Aufgaben- und Zielformulierung
- Struktur- und Funktionsanalyse
- Datenerhebung und -analyse
- Bestimmung der relevanten Modellaspekte
- Problemdekomposition
- Bestimmung des Modelltyps
- System- und Prozessbeschreibung
- dauerhafte Verifikation und Validierung sowie Dokumentation und Kommunikation.

Für die Erstellung und Durchführung von Simulationsstudien existieren verschiedene weitere Vorgehensmodelle, aber im Kern finden sich immer ähnliche Schritte [Rab-2008, S. 29]. Einige der Schritte werden explizit durchgeführt, während andere nur implizit in den durchgeführten Arbeiten enthalten sind. Zunächst werden die Aufgaben und Ziele des Modells formuliert. Das Modell soll die Bestimmung der mittleren Spielzeit und des mittleren Energiebedarfs verschiedener RBGs ermöglichen. Dazu soll das Modell in der Lage sein, eine große Anzahl an zufällig generierten Arbeitsspielen zu simulieren. Gleichzeitig soll das Modell genutzt werden, nach Referenzspielen für den mittleren Energiebedarf zu suchen und die Berechnung einer Energieeffizienzkennzahl zu ermöglichen. Der Energiebedarf eines sogenannten „Referenzspiels“ soll dem mittleren Energiebedarf aller möglichen Spiele möglichst genau entsprechen.

Die Grundidee zur Bestimmung eines Referenzspiels mittels Simulation basiert auf einer Veröffentlichung von Azzi et al. [Azz-2011]. Dort wurde eine Monte Carlo Simulationsstudie mit zufällig generierten Vierfachspielen genutzt, um repräsentative Fachfahrten für die Spielzeit von Vierfachspielen zu finden. Damit wurden die bestehenden Einzel- und Doppelspiele aus der FEM 9.851 um ein Vierfachspiel ergänzt [FEM-9851]. Mithilfe des Modells soll ein Parameterraum untersucht werden, der einen Großteil der marktüblichen Geräte abdeckt.

Die Struktur- und Funktionsanalyse wird bereits in Teilen im Stand der Wissenschaft und Technik in Kapitel 2 vollzogen. Dort werden die Komponenten und dabei insbesondere die Antriebe eines RBGs beschrieben. Die Abbildung der Komponenten im Simulationsmodell wird dann in Abschnitt 5.2 näher erläutert. Die Datenerhebung und -analyse sowie die System- und Prozessbeschreibung finden in mehreren Schritten statt. Zunächst wird eine geeignete Berechnungsmethode für den Energiebedarf eines RBGs recherchiert. In der Dissertation von Braun wurden drei Modelle mit ansteigender Komplexität zur Modellierung des Energiebedarfs vorgestellt [Bra-2016a, S. 137–146]. Im ersten Modell wird eine statische Quantifizierung des Energiebedarfs mittels potenzieller und kinetischer Energie und einem Gesamtwirkungsgrad verwendet. Das im Rahmen der eigenen Simulationen zum Einsatz kommende Basismodell ist an das zweite Modell von Braun „Quantifizierung über Bilanzierung der mechanischen Verluste sowie des elektrischen Wirkungsgrads“ angelehnt [Bra-2016a, S. 138–140]. Es basiert auf einer einfachen 3-Phasen Bewegung und beschreibt Spielzeit und damit Durchsatz und Energiebedarf mittels analytischer Gleichungen. Es wird ausgewählt, da es weniger rechenintensiv als das dritte Modell „Parameterbasiertes analytisches Simulationsmodell“ ist. Statt einer vollständigen zeitlichen Auflösung der elektrischen Leistungsaufnahme wird diese über einzelne Zeitabschnitte mithilfe linearer Funktionen approximiert. Der detaillierte Leistungsverlauf wird für die Ermittlung von Durchsatz und Energiebedarf nicht benötigt. Zusätzlich wird die Fahrzeit über analytische Gleichungen berechnet. Mit dieser Auswahl wird gleichzeitig der Modelltyp festgelegt. Daher kommt im Rahmen der eigenen Simulationen ein deterministisches und zeitgesteuertes Modell, das keine zufallsbasierten Einflüsse betrachtet, zum Einsatz. Das Modell wurde in der Simulationsumgebung MATLAB umgesetzt.

Eine Verifikation des Modells wird in allen Teilschritten durchgeführt. Im Rahmen der Verifikation kamen verschiedene Techniken, die von Rabe et al. beschrieben wurden, zum Einsatz [Rab-2008, S. 95–112]. Neben dem strukturierten Durchgehen werden die Ergebnisse einzelner Teilmodelle mit analytischen Rechnungen verglichen. Die eigene Arbeit wird dabei in Bezug auf Vollständigkeit, Korrektheit, Konsistenz und Eindeutigkeit kritisch überprüft [Rab-2008, S. 102]. Das strukturierte Durchgehen der Funktionen des Programms erfolgte zusammen mit den an der Entwicklung des Modells beteiligten Studenten Parr und Rief und in einer späteren Entwicklungsphase mit Karzel (siehe Kapitel A) [Rab-2008, S. 104–105]. Es wird abschließend eine Validierung des Modells

mit Messdaten durchgeführt. Diese wird in Abschnitt 5.3 beschrieben.

5.1.1 Modellarchitektur

Nach der Auswahl des Basismodells zur Berechnung von Durchsatz und Energiebedarf wird die grundlegende Architektur des Simulationsmodells entwickelt. Diese orientiert sich am realen logistischen Prozess und basiert auf einer Funktionstrennung der einzelnen Abläufe und Berechnungen innerhalb des Modells. Die Architektur ist zusätzlich stark auf die Parallelisierung von Berechnungen und damit auf Rechenzeitoptimierung ausgerichtet. Der Modellaufbau ist in Abbildung 5-1 dargestellt. Das Modell besitzt drei grundlegende Ebenen. In der Eingabeebene werden die Lager- und die RBG-Konfiguration eingelesen. In der anschließenden Simulationsebene werden die Berechnungen ausgeführt. Dazu werden vorab Leistungsverläufe und die Fahrzeiten der einzelnen Teilbewegungen in x- und y-Richtung des Geräts berechnet. Anschließend wird eine Auftragsliste mit den zu simulierenden Arbeitsspielen generiert. Im Rahmen der Simulation der Auftragsliste werden die vorab berechneten Leistungsverläufe zu vollständigen Arbeitsspielen assembliert. Das Post-processing und die anschließende Datenanalyse steuern die Speicherung und Auswertung der Daten. Die abschließende Ausgabeebene stellt die Ergebnisse in Tabellen dar.

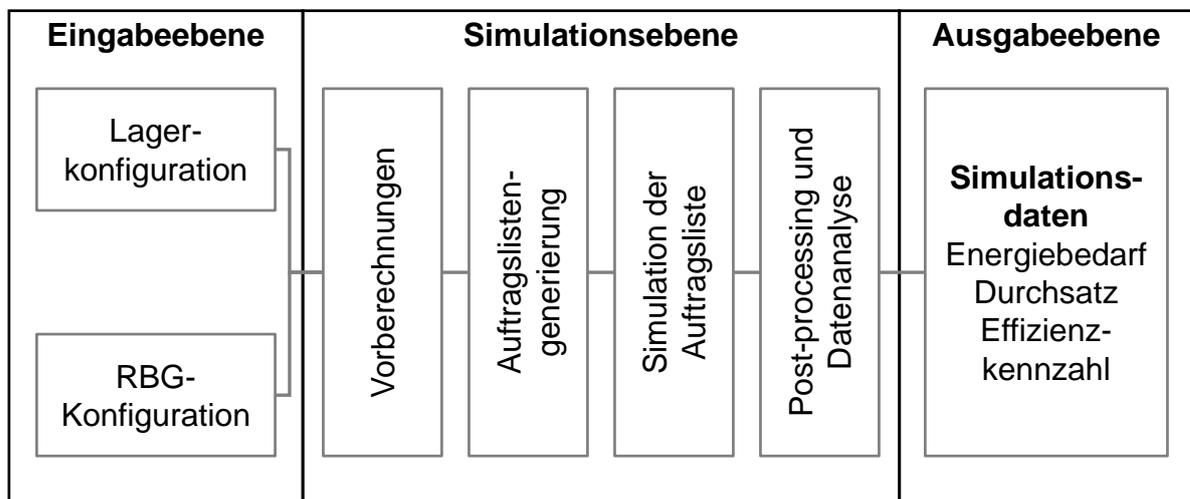


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung der Architektur des Simulationsmodells (vgl. [Rüc-2020a])

Durch das Entkoppeln der Vorberechnungen aus der eigentlichen Simulation der Auftragsliste, lässt sich die Berechnung sehr stark beschleunigen, da identische Berechnungsabläufe nicht immer wieder neu ausgeführt werden müssen. In Abbildung 5-2 ist das für den Simulationsprozess erstellte Aktivitätsdiagramm dargestellt. Die strichlierten Linien stehen für Schleifen im Programm. Am Anfang des Simulationsprozesses werden die Simulationsparameter für alle zu simulierenden Konfigurationen definiert. Die anschließenden Prozesse laufen in einer großen Schleife über die einzelnen

Konfigurationen hinweg. Zuerst werden die Zeit- und Energiebedarfe aller horizontalen und vertikalen Bewegungen und der Ein- und Auslagervoränge berechnet. Danach wird eine Auftragsliste für die jeweilige Konfiguration erzeugt. Im Anschluss erfolgt die Assemblierung der Leistungsverläufe der einzelnen Spiele in der Auftragsliste. Abschließend erfolgt die Auswertung der kompletten Berechnungsergebnisse mittels statistischer Methoden und die Visualisierung der Ergebnisse. Die Details der einzelnen Schritte werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Zunächst werden hier die getroffenen Annahmen und Einschränkungen näher erläutert.

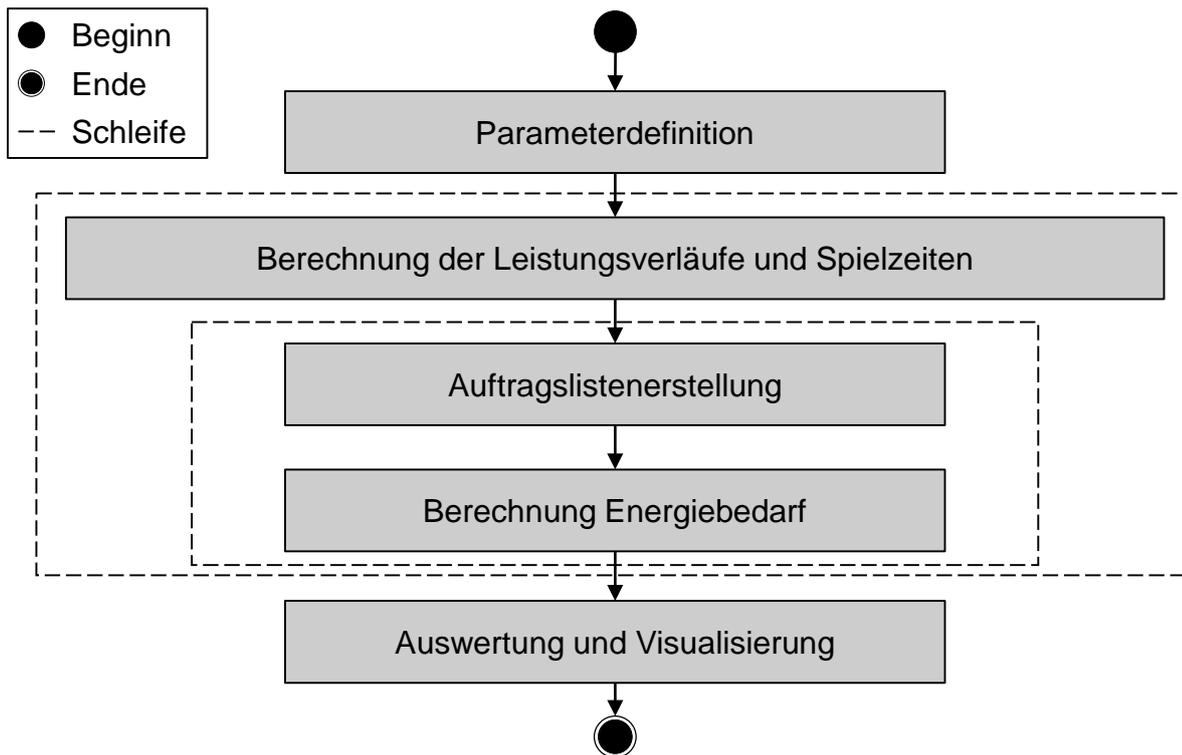


Abbildung 5-2: Aktivitätsdiagramm des kompletten Simulationsprozesses

5.1.2 Getroffene Annahmen und Einschränkungen

Nachdem es sich bei dem Modell um ein vereinfachtes Abbild eines realen Gerätes handelt, müssen einige Einschränkungen und Annahmen getroffen werden. Die hier gelisteten getroffenen Annahmen sind in Zusammenarbeit mit Rief entstanden und finden sich auch in [Rie-2018, S. 36–37]. Teile der Einschränkungen sind aus der Arbeit von Braun übernommen worden (vgl. [Bra-2016a, S. 133]). Sie werden für diese Arbeit noch einmal angepasst und erweitert.

- Fokus der Simulation ist eine Regalgasse, in der sich genau ein RBG befindet. Die Lagervorzone wird nicht betrachtet. (vgl. [Bra-2016a, S. 133])
- Alle Lagerplätze haben identische technische Eigenschaften (vgl. [Bra-2016a, S. 133]).

- Es gibt zwei verwendete Formen von Ladeeinheiten – KLTs und Paletten.
- Alle Lagerplätze werden gleich häufig angefahren.
- Die in jedem Spiel anzufahrenden Punkte werden von außen vorgegeben. Eine zyklenübergreifende Optimierung der Anfahrtpunkte findet nicht statt.
- Der Übergabepunkt des LAMs liegt auf der Fachposition (1,1). Das LAM führt jeweils eine vollständige Bewegung zur Abgabe der auszulagernden Ladeeinheiten und zur Übernahme der einzulagernden Ladeeinheiten aus.
- Zu Beginn der Beobachtung befindet sich das RBG am Übergabepunkt.
- Eine Wartezeit aufgrund von Staus von Ladeeinheiten am Übergabepunkt tritt nicht auf (vgl. [Bra-2016a, S. 133]).
- Fahr- und Hubbewegungen des RBGs erfolgen in einer 3-Phasen-Bewegung.
- Das LAM kann erst dann agieren, wenn Fahrtrieb und Hubtrieb stillstehen (vgl. [Bra-2016a, S. 133]).
- Es werden keine Wartezeiten durch Ausschwingvorgänge berücksichtigt.
- Der Energiebedarf eines RBGs ist allein von der Strecke zwischen Start- und Zielpunkt 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-2016a, S. 66–69]. 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 75 % der möglichen Maximalbeschleunigung. Dieser Wert wird zur Vereinfachung der 7-Phasen-Bewegung auf eine 3-Phasen-Bewegung benutzt.
- Bei der Berechnung der Beschleunigungsleistung werden die Trägheitsmomente rotierender Bauteile vernachlässigt.
- Alle angesetzten Wirkungsgrade werden als konstant und lastunabhängig angenommen (vgl. [Bra-2016a, S. 133]).
- Der Leistungsbedarf von Sensoren, Steuerungen, Umrichtern und sonstigen Verbrauchern wird über eine Grundlast berücksichtigt.
- Der Energiebedarf des LAMs wird mit einer mittleren elektrischen Leistung berücksichtigt.
- Bei Horizontalbewegungen wird eine konstante Reibkraft als Fahrwiderstandskraft berücksichtigt, die Luftreibung wird nicht betrachtet.
- Bei Vertikalbewegungen wird keine Reibkraft, sondern der Widerstand im Wirkungsgrad des Antriebs berücksichtigt.
- Der Einfluss von Verschleiß und Temperatur wird im Modell nicht abgebildet (vgl. [Bra-2016a, S. 133]).
- Die HRLs sind einfachtief ausgeführt.
- Die LAM Kapazität beträgt eine Ladeeinheit und es wird ein LAM verwendet.
- Es werden keine Ausfallzeiten berücksichtigt.

5.2 Simulation der Energie- und Zeitbedarfe

Die Simulation der Energie- und Zeitbedarfe wurde in Zusammenarbeit mit Parr und Rief entwickelt und wird in zwei Studienarbeiten behandelt. Zuerst in der Arbeit von Parr in Kapitel „3 Simulationsmodell“ der Arbeit [Par-2017, S. 17–29] und anschließend in der Arbeit von Rief in Kapitel „4 Aufbau der Simulation“ der Arbeit [Rie-2018, S. 42–53]. Die Grundideen des Modells und seine Konzeption stammen maßgeblich vom Autor dieser Dissertation.

5.2.1 Grundlagen

Zunächst werden die Energie- und Zeitbedarfe der horizontalen und vertikalen Bewegungen des RBGs betrachtet. In 4.3.3 konnte gezeigt werden, dass der Beschleunigungsverlauf keinen großen Einfluss auf den Energiebedarf hat. Deswegen ist die Vereinfachung der Bewegung auf eine 3-Phasen Bewegung legitim. Der theoretische Verlauf enthält grundsätzlich positive und negative Leistungswerte. Die Entscheidung, ob die negative Leistung verarbeitet werden kann, wird während der Simulation in Abhängigkeit vom Leistungsbedarf des zweiten Antriebs und dem Vorhandensein einer eventuellen Rückspeiseeinheit entschieden. Für die Betrachtung des Energiebedarfs werden analog zum Basismodell von Braun (siehe Abschnitt 5.1) die potenzielle Energie, die kinetische Energie, mechanische Verluste und elektrische Verluste berücksichtigt. Die meisten Verluste werden mit den Antriebswirkungsgraden η_x und η_y berücksichtigt. Unten sind exemplarisch die Gleichungen für die Berechnung des Energiebedarfs einer Fahrbewegung mit ihren drei Phasen Beschleunigung (Gleichung 5-1), Konstantfahrt (Gleichung 5-2) und Verzögerung (Gleichung 5-3) beschrieben [Bra-2016a, S. 139, Gleichung 4.8, 4.9 und 4.10]. Die Widerstandskraft F_x berücksichtigt Reibungswiderstände in Fahrtrichtung. Es werden keine geschwindigkeits- oder beschleunigungsabhängigen Widerstände verwendet. Die Vorzeichen der Energien sind so definiert, dass sich im Falle einer Energieaufnahme des Antriebs ein positiver Wert und im Falle einer Energieabgabe ein negativer Wert ergibt. Die Strecken in x-Richtung s_x und in y-Richtung s_y sind entsprechend dem Koordinatensystem in Abbildung 2-4 vorzeichenbehaftet. Auf die Fahrbewegung in x-Richtung hat das keine Auswirkung, da die Fahrstrecken s_x im Betrag enthalten sind. Für die Bewegungen in y-Richtung ist s_y im Falle einer Hubbewegung positiv und im Falle einer Senkbewegung negativ.

$$E_{x,B} = \frac{(m_x \cdot a_x + F_{x,R}) \cdot |s_{x,B}|}{\eta_x} \quad (5-1)$$

$$E_{x,K} = \frac{F_{x,R} \cdot |s_{x,K}|}{\eta_x} \quad (5-2)$$

$$E_{x,V} = (-m_x \cdot a_x + F_{x,R}) \cdot |s_{x,V}| \cdot \eta_x \quad (5-3)$$

Der vollständige Satz der Energiegleichungen für alle Bewegungen findet sich in Anhang C. Dort sind neben den Gleichungen für Hub- und Senkbewegungen, auch die für das LAM aufgeführt.

Die Reibung in x-Richtung wird auf Basis des Rollwiderstands F_{WR} , der Zapfenreibung F_{WZ} und der Reibung der horizontalen Führungsrollen F_{WH} berücksichtigt (siehe Gleichung 5-4). Im Rollwiderstand finden der Hebelarm der rollenden Reibung f und der Raddurchmesser d_{Rad} Eingang. In der Zapfenreibung wird zusätzlich der Reibungskoeffizient der Wälzlager μ_{WL} und der Zapfendurchmesser d_Z berücksichtigt. Der Widerstand der Horizontalführungsrollen geht als Koeffizient w_H in die Berechnung ein. Als Masse findet die gesamte in x-Richtung bewegte Masse m_x Verwendung. Diese entspricht der gesamten Masse des RBGs m_{ges} .

$$F_{x,R} = F_{WR} + F_{WZ} + F_{WH} = g \cdot m_x \cdot \left(\frac{2 \cdot f}{d_{Rad}} + \frac{\mu_{WL} \cdot d_Z}{d_{Rad}} + w_H \right) \quad (5-4)$$

$$f = 0,5 \text{ mm}, d_{Rad} = 0,3 \text{ m}, \mu_{WL} = 3 \cdot 10^{-3}, d_Z = 0,1 \text{ m}, w_H = 1,5 \cdot 10^{-3}$$

Die Reibung kann, wie in Gleichung 5-5 beschrieben, mit einem konstanten Faktor $k_{x,R}$ berücksichtigt werden. Die Reibung in x-Richtung ist experimentell schwer zu ermitteln und konnte auch im Rahmen der Versuche an RBG-1 nicht experimentell überprüft werden.

$$F_{x,R} = g \cdot m_x \cdot k_{x,R} \quad (5-5)$$

$$k_{x,R} = 5,83 \cdot 10^{-3}$$

In y-Richtung wird keine Reibung berücksichtigt. Für die Sensitivitätsanalyse einzelner Parameter geht aber ein Reibungsterm in y-Richtung analog zum Reibungsterm in x-Richtung mit in die Berechnung ein. Dieser geht von einem pauschalen Widerstandswert $k_{y,R}$ aus. Als Masse wird die gesamte in y-Richtung bewegte Masse m_y verwendet.

$$F_{y,R} = g \cdot m_y \cdot k_{y,R} \quad (5-6)$$

$$k_{y,R} = 1,00 \cdot 10^{-3}$$

In Auslegungsrechnungen der Antriebe der Hersteller kommen ähnliche Werte für die Reibung zum Einsatz. Es werden zusätzliche weitere Verluste wie die Planschverluste des Getriebes, Spurkranz- und Seitenreibung bei APLs und verschiedene Einzelwirkungsgrade berücksichtigt. Für die Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit wird es

aber nicht als sinnvoll erachtet, die Verluste alle einzeln zu berücksichtigen. Solche Einzelverluste müssen sehr genau für jedes Gerät individuell ermittelt werden. Die Verluste werden daher vereinfacht mit der Reibung in x-Richtung und den Wirkungsgraden in x- und y-Richtung berücksichtigt. Mit einer reinen Bilanzierung der Energien können eine Zwischenkreisschaltung und eine Rückspeiseeinheit nicht korrekt berücksichtigt werden. Für die Simulation des Energiebedarfs werden deswegen nicht nur Energien bilanziert. Das Modell wird um theoretische Leistungsverläufe erweitert, mit deren Hilfe die oben genannten Elemente zur Bremsenergienutzung korrekt berücksichtigt werden können.

5.2.2 Berechnung der Leistungsverläufe

Aus den vorgestellten Gleichungen für die Berechnung des Energiebedarfs lassen sich Gleichungen für den Leistungsverlauf unterschiedlicher Bewegungen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ableiten. Exemplarisch ist abschnittsweise der Verlauf der Leistungsaufnahme des Fahrtriebs, basierend auf der Beschleunigungskraft, der Reibkraft und der Verzögerungskraft, in den Gleichungen 5-7, 5-8 und 5-9 beschrieben.

$$P_{x,B}(v_x) = \frac{(m_x \cdot a_x + F_{x,R}) \cdot |v_x|}{\eta_x} \quad [t_0, t_1] \quad (5-7)$$

$$P_{x,K}(v_x) = \frac{F_{x,R} \cdot |v_x|}{\eta_x} \quad [t_1, t_2] \quad (5-8)$$

$$P_{x,V}(v_x) = (-m_x \cdot a_x + F_{x,R}) \cdot |v_x| \cdot \eta_x \quad [t_2, t_{ges}] \quad (5-9)$$

Der theoretische Leistungsverlauf und der Beschleunigungsverlauf dieser 3-Phasen Bewegung sind in Abbildung 5-3 dargestellt.

Vergleicht man den theoretischen Leistungsverlauf mit einem gemessenen Leistungsverlauf einer Fahrbewegung von RBG-2 aus Abbildung 5-4, dann herrscht eine weitgehende Übereinstimmung der Verläufe. Das Messintervall von 0,5s führt zu einem gestuften Leistungsverlauf. Rechnet man die Grundlast heraus, dann passen die Verläufe genau zueinander. Die ungefähren Zeitpunkte von t_0 , t_1 , t_2 und t_{ges} aus Abbildung 5-3 sind in Abbildung 5-4 mit strichlierten Linien gekennzeichnet.

Zusätzlich ist in Abbildung 5-5 noch der tatsächliche Leistungsverlauf eines Hubs dargestellt. Am Beispiel dieses Verlaufs wird deutlich, dass das minimale Messintervall

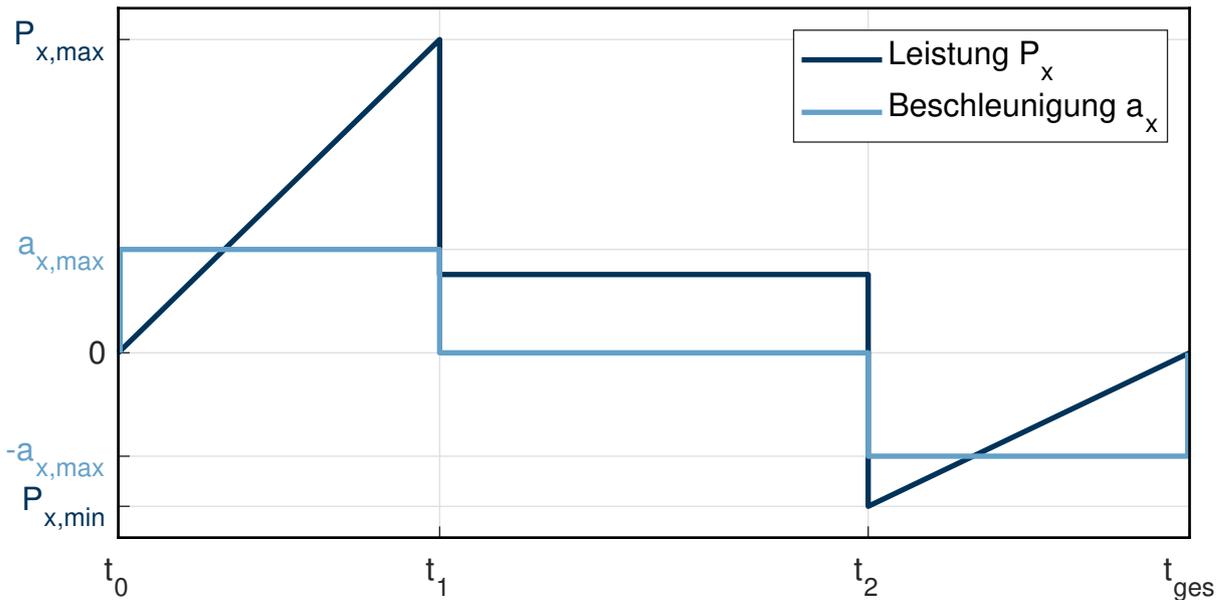


Abbildung 5-3: Theoretischer Leistungsverlauf P_x und theoretischer Beschleunigungsverlauf a_x einer Normalfahrt des Fahrtriebs (vgl. [Rie-2018, S. 20])

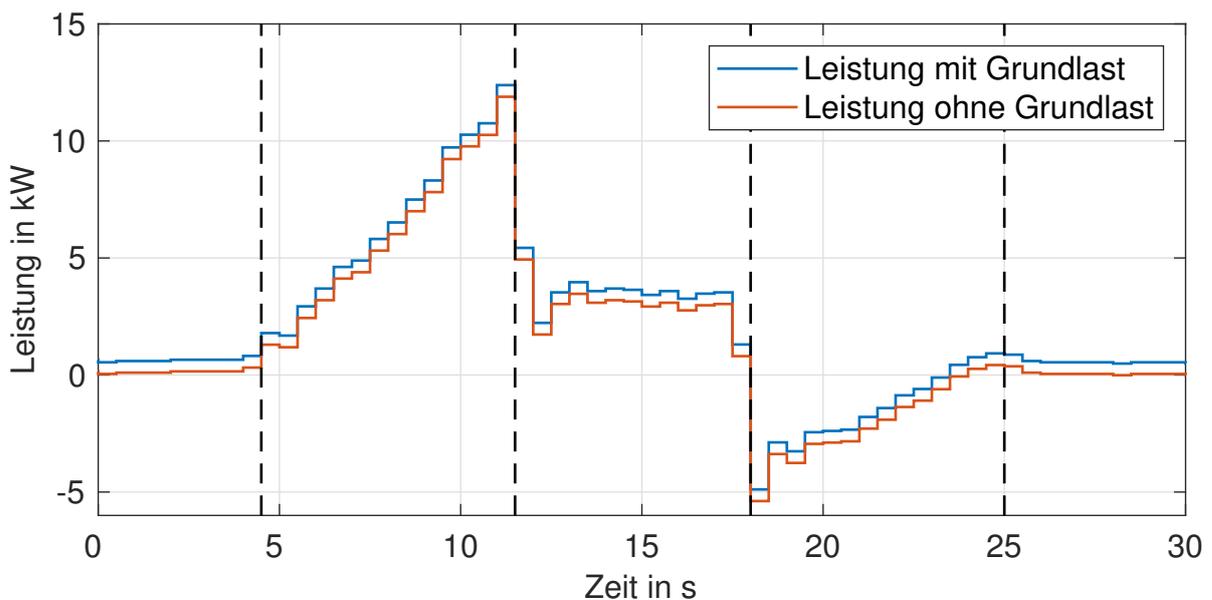


Abbildung 5-4: Gemessener Leistungsverlauf einer Normalfahrt des Fahrtriebs von RBG-2

von 0,5 s zu groß für die Aufzeichnung detaillierter Leistungsverläufe kürzerer Bewegungen ist. Vergleicht man den Verlauf mit dem theoretischen Verlauf P_y in Abbildung 5-6, so herrscht aber dennoch eine gute Übereinstimmung.

5.2.3 Assemblierung der Fahrten

Bei der Assemblierung der Fahrten werden die Leistungsverläufe der einzelnen Bewegungen in x- und y-Richtung miteinander kombiniert. Ein Beispiel für eine mögliche

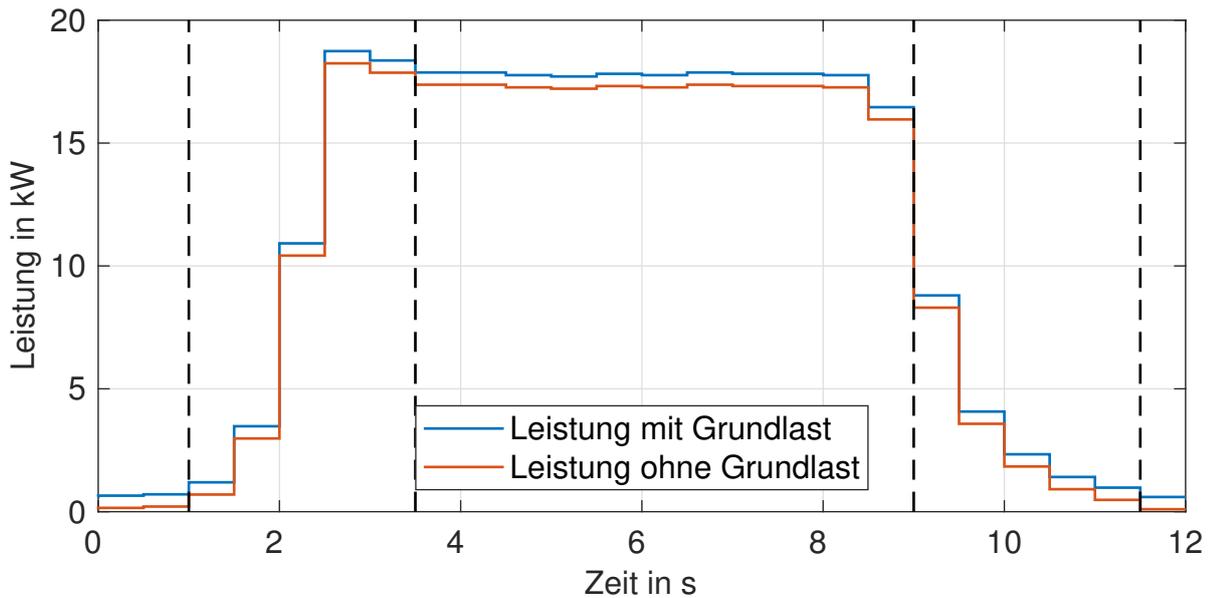


Abbildung 5-5: Gemessener Leistungsverlauf einer Normalfahrt des Hubantriebs von RBG-2

Kombination von zwei Leistungsverläufen wird nachfolgend beschrieben. In der gemeinsamen Darstellung der Leistungsverläufe von Fahr- und Hubbewegung in Abbildung 5-6 wird ersichtlich, weshalb die einfache Bilanzierung von Energien den realen Energiebedarf nicht korrekt widerspiegelt.

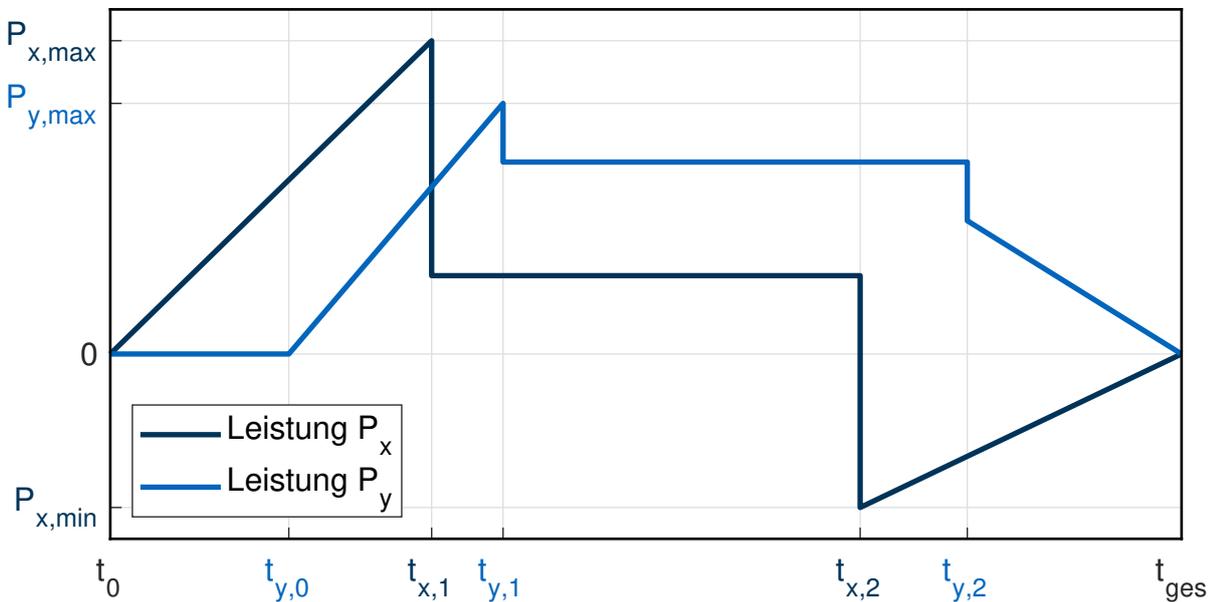


Abbildung 5-6: Theoretische Leistungsverläufe von P_x und P_y bei einer kombinierten Fahr- und Hubbewegung (vgl. [Rie-2018, S. 20 und A-2])

Relevant für die Verwendung der Leistung im Zwischenkreis sind die jeweiligen momentanen Leistungen der einzelnen Antriebe, die über einen Zwischenkreis gekoppelt sind. Im konkreten Fall steht ab dem Zeitpunkt $t_{x,2}$ elektrische Leistung aufgrund der Verzögerung des Fahrtriebs zur Verfügung. Der Hubantrieb kann die Leistung zu diesem Zeitpunkt aufnehmen. Diese wechselseitige Aufnahme muss aber für jede Fahrt geprüft werden. Im Rahmen der Kombination von Bewegungen gibt es verschiedene Möglichkeiten diese aufeinander abzustimmen. Hier enden beide Bewegungen zur gleichen Zeit. Damit wird sichergestellt, dass zum Beispiel die frei werdende Leistung bei der Verzögerung für den Hub verwendet werden kann. Diese Art der Kombination ist besonders bei Geräten ohne Rückspeiseeinheit, die nur eine Zwischenkreiskopplung haben, entscheidend. Zusätzlich sorgt die zeitliche Verschiebung der Hubbewegung für eine Verringerung der maximal aufgenommenen Leistung aus dem Netz. Bei der Simulation wird also keine reine Bilanzierung der Energien verwendet, sondern es werden theoretische Leistungsverläufe gebildet und diese entsprechend der Fachfahrt und der Konfiguration des RBGs summiert. Die Leistungsverläufe weiterer Bewegungen sind in Anhang D dargestellt.

Das Aktivitätsdiagramm des Berechnungsablaufs zur Ermittlung des Energiebedarfs ist in Abbildung 5-7 dargestellt. Nach der Initialisierung der Assemblierung mit den vorberechneten Daten werden für jede Fahrt die einzelnen Leistungsverläufe aufgerufen. Danach werden sie zeitlich passend synchronisiert. Es wird angenommen, dass Hubbewegungen immer zeitgleich mit der Fahrbewegung enden und Senkbewegungen immer direkt mit der Fahrbewegung beginnen. Wenn die Hubbewegung allerdings kürzer als die Bremsphase der Fahrbewegung dauert, startet die Hubbewegung bereits mit dem Beginn des Bremsvorgangs.

Je nach Ausstattung des RBGs werden die Leistungsverläufe kombiniert. Zu dieser Ausstattung zählen der Zwischenkreis und die Rückspeiseeinheit. Letzter Schritt ist die Integration, in der die Leistungsdaten zu Energiebedarfen aufintegriert, dann entsprechend zusammengefasst und für die Folgeberechnungen geeignet abgelegt werden.

5.2.4 Generierung von Auftragslisten

Die Generierung der Auftragsliste erfolgte in mehreren Schritten. Nach der Initialisierung mit den Parametern des HRLs erfolgt die Erstellung der initialen Belegung. Dabei werden, ausgehend von einem 100 % gefüllten Lager, solange zufällig ausgewählte Fächer geleert bis der eingestellte Lagerfüllgrad erreicht wird. Anschließend werden abhängig von der gewählten Spielwahl Einzel- oder Doppelspiele per Zufall generiert. Die Anzahl an generierten Spielen ist aufgrund der steigenden Anzahl an möglichen Spielen abhängig von der gewählten Lagergröße. Dabei wird die Anzahl der Spiele n_{Spiel} nach Gleichung 5-10 mit der Anzahl an Regalspalten n_{col} und der Anzahl an

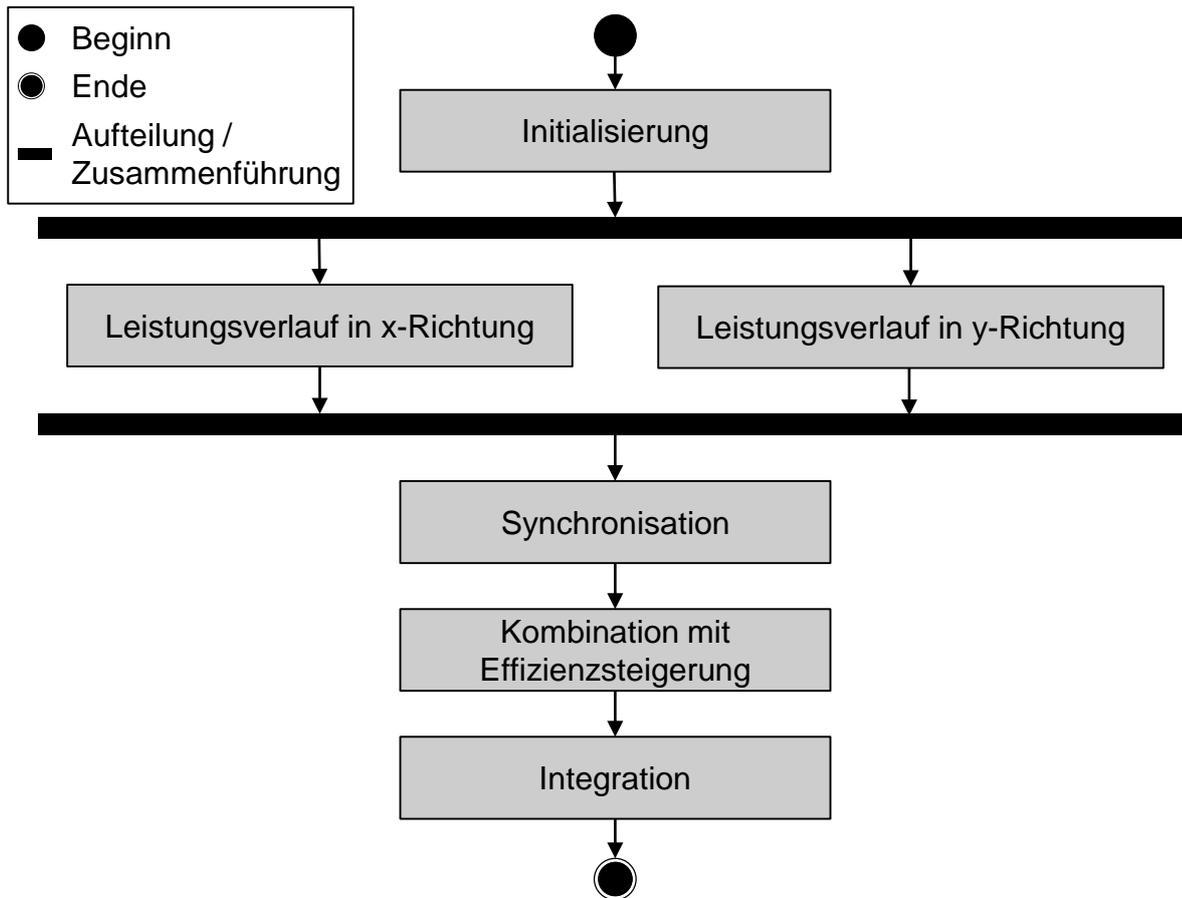


Abbildung 5-7: Aktivitätsdiagramm des Berechnungsablaufs der „Assemblierung der Leistungsverläufe“ (vgl. [Rie-2018, S. 41])

Regalebenen n_{lev} berechnet. Die Anzahl wird auf ganze 10 000 Spiele gerundet.

$$n_{Spiel} \approx n_{col} \cdot n_{lev} \cdot 1000 \quad (5-10)$$

Die Erzeugung der Arbeitsspiele läuft in einer Schleife. Um die Berechnungsabläufe zu parallelisieren, werden abhängig von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Kerne Pakete erstellt. Ein Paket enthält dann eine initiale Belegung und eine Anzahl an Spielen. Bei den verwendeten Simulationsrechnern werden jeweils sechs Kerne eingesetzt und dementsprechend sechs Pakete verwendet.

5.3 Validierung mit Messdaten

Neben der stetigen Verifizierung des Modells wird eine Validierung durchgeführt. Im Rahmen dieser Validierung erfolgt ein Vergleich mit den Messdaten der Einzelfahrten von RBG-1 und RBG-2. Die Einzelfahrten von RBG-3 sind aufgrund der geringen Anzahl an Wiederholungen nicht verwendbar. Dabei werden jeweils die Abweichungen

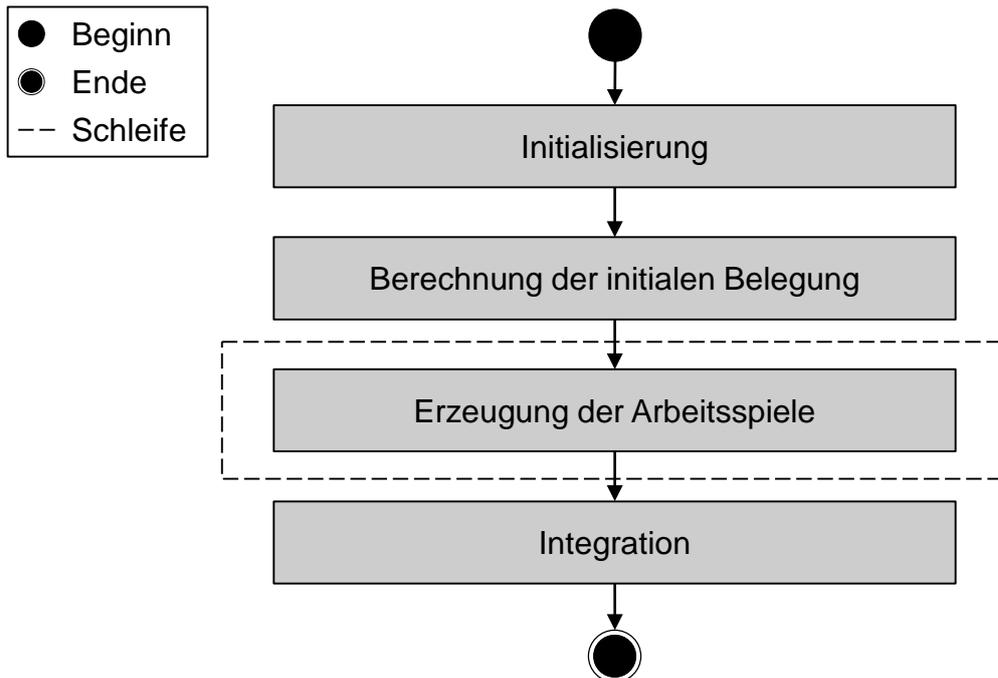


Abbildung 5-8: Aktivitätsdiagramm des Berechnungsablaufs der Auftragslistengenerierung

zwischen dem gemessenen Energiebedarf und dem simulierten Energiebedarf berechnet. Eine positive Abweichung bedeutet eine Überschätzung des Energiebedarfs in der Simulation und eine negative Abweichung analog dazu eine Unterschätzung. In der Berechnung des Energiebedarfs werden im Rahmen der Simulationsstudien die beiden Wirkungsgrade η_x und η_y variiert. Ziel der Validierung ist es, zu überprüfen, ob mit dem verwendeten Wertebereich von 0,4 bis 0,9 der Energiebedarf der einzelnen Fahrten nachgebildet werden kann. Zweck des Modells ist die Nachbildung des Energiebedarfs vieler Geräte, nicht die genaue Simulation der Leistungsaufnahme eines einzelnen RBGs. Die kinematischen Parameter und die Massen der vermessenen Geräte werden im Modell hinterlegt. Darüber hinaus wird keine genaue Kalibrierung der Parameter der Reibung und der elektrischen Wirkungsgrade durchgeführt. Die Anpassung der Wirkungsgrade deckt auch gleichzeitig den Alterungs- und Verschleißzustand des jeweiligen Geräts ab.

5.3.1 Validierung mit Messdaten von RBG-1

Bei RBG-1 werden zunächst die Ergebnisse der Messreihen mit unterschiedlicher Fahr- oder Hubgeschwindigkeit und unterschiedlicher Nutzlast verwendet. Abschließend werden die Messdaten einer kombinierten Bewegung mit der Simulation verglichen. Aufgrund der umfangreichen Voruntersuchungen, den betriebswarmen Antrieben und der Möglichkeit die Fahrten 20-mal zu wiederholen, wird ein Toleranzbereich

für die Validierung von $\pm 5\%$ festgelegt.

Fahrtrieb Der Wirkungsgrad des Fahrtriebs verändert sich mit der Fahrgeschwindigkeit (vgl. [Rüc-2018b]). Deswegen wird bei der Validierung jeweils für eine Geschwindigkeit ein eigener Wirkungsgrad verwendet, der einen möglichst kleinen Fehler über die verschiedenen Zuladungen ermöglicht. Damit wird nachgewiesen, dass mit einem festen Antriebswirkungsgrad der Energiebedarf eines Geräts ausreichend genau berechnet werden kann. Eine Änderung der Fahrgeschwindigkeit im Betrieb eines RBG ist in der Praxis eher selten. Da sich die Nutzlast auch bei Geräten im Einsatz ändert, wird der Wirkungsgrad nicht speziell für die einzelnen Nutzlasten angepasst. Die Abweichungen aufgetragen über Nutzlast und Fahrgeschwindigkeit sind in Abbildung 5-9 dargestellt.

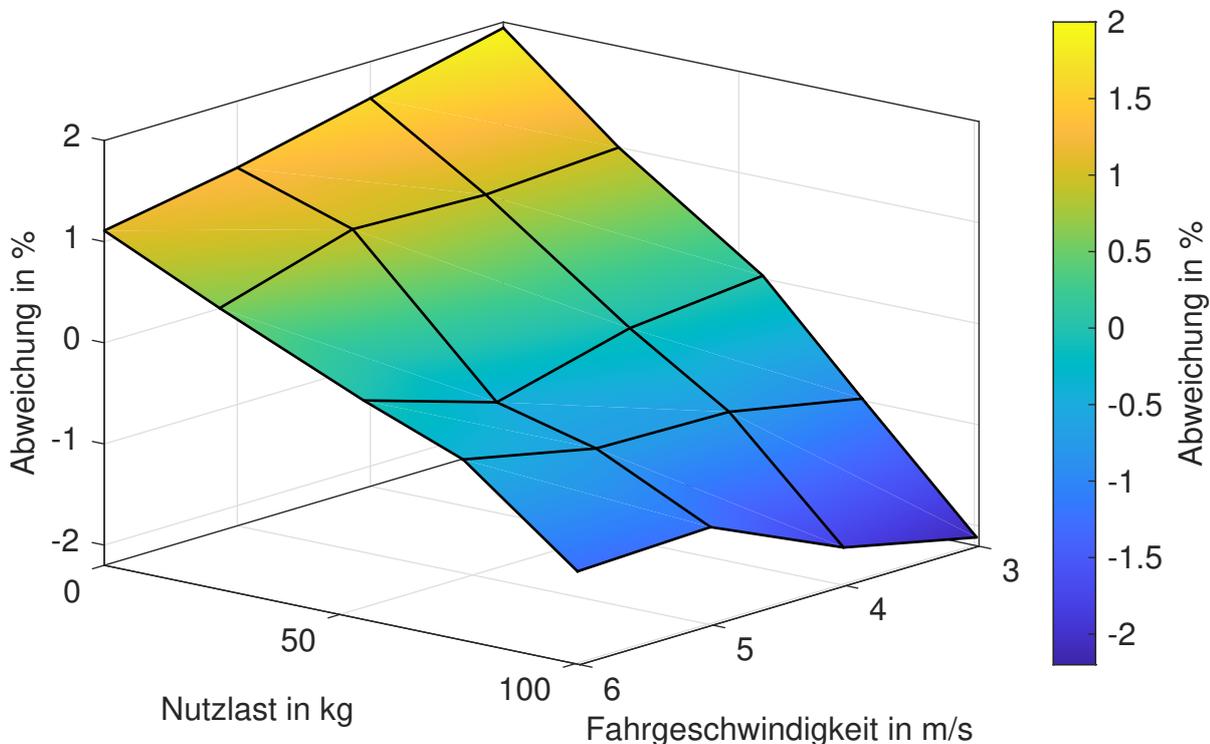


Abbildung 5-9: Abweichung zwischen Messung und Simulation des Fahrtriebs

Die Abweichungen liegen zwischen $-2,12\%$ und $1,94\%$ und verteilen sich durchgängig über die verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten und Nutzlasten als schräg im Raum liegende Fläche. Bei niedrigen Nutzlasten wird der Energiebedarf eher überschätzt und bei hohen Nutzlasten eher unterschätzt. Die Dellen und Spitzen in der Fläche sind mit Restunsicherheiten in der Messung erklärbar. Die Schwankungen liegen im Bereich von $\pm 0,2\%$. Die Ergebnisse des Vergleichs für den Fahrtrieb sind auch in Tabelle 5-1 aufgelistet. In der Tabelle sind die in der Simulation verwendeten Wirkungsgrade und zusätzlich die Werte der Energiebedarfe aus Abbildung 4-8 enthalten.

Tabelle 5-1: Vergleich von Ergebnissen aus Messung und Simulation des Fahrtriebs von RBG-1

Fahrstrecke in m	Geschwindigkeit in m/s	Nutzlast in kg	Wirkungsgrad des Fahrtriebs	Energiebedarf Messung in kJ	Energiebedarf Simulation in kJ	Abweichung in %
20,978	3	0,0	0,38	36,32	37,04	1,94
20,978	3	24,5	0,38	37,02	37,40	1,00
20,978	3	55,1	0,38	37,83	37,84	0,03
20,978	3	76,2	0,38	38,53	38,15	-0,98
20,978	3	100,5	0,38	39,32	38,51	-2,12
20,978	4	0,0	0,50	42,96	43,67	1,64
20,978	4	24,5	0,50	43,70	44,11	0,92
20,978	4	55,1	0,50	44,70	44,66	-0,10
20,978	4	76,2	0,50	45,36	45,04	-0,72
20,978	4	100,5	0,50	46,30	45,47	-1,83
20,978	5	0,0	0,60	51,73	52,43	1,34
20,978	5	24,5	0,60	52,46	52,97	0,97
20,978	5	55,1	0,60	53,88	53,64	-0,44
20,978	5	76,2	0,60	54,48	54,11	-0,69
20,978	5	100,5	0,60	55,32	54,64	-1,23
20,978	6	0,0	0,69	62,52	63,22	1,11
20,978	6	24,5	0,69	63,51	63,88	0,58
20,978	6	55,1	0,69	64,73	64,70	-0,03
20,978	6	76,2	0,69	65,54	65,27	-0,41
20,978	6	100,5	0,69	66,77	65,92	-1,28

Hubantrieb Der Wirkungsgrad des Hubantriebs ist über Zuladung und Hubgeschwindigkeit relativ konstant (vgl. [Rüc-2018b]) und wird für den Vergleich mit den Messdaten zu 0,59 angesetzt. Es erfolgt also keine Anpassung des Wirkungsgrad an die Hubgeschwindigkeit wie beim Fahrtrieb. Analog zur Darstellung der Abweichungen des Fahrtriebs sind die Abweichungen zwischen Messung und Simulation des Hubantriebs in Abbildung 5-10 verdeutlicht. Die Ausrichtung der Achsen ist hier anders als in Abbildung 5-9. Sie wird so gewählt, dass die entstehende Fläche möglichst gut dargestellt werden kann.

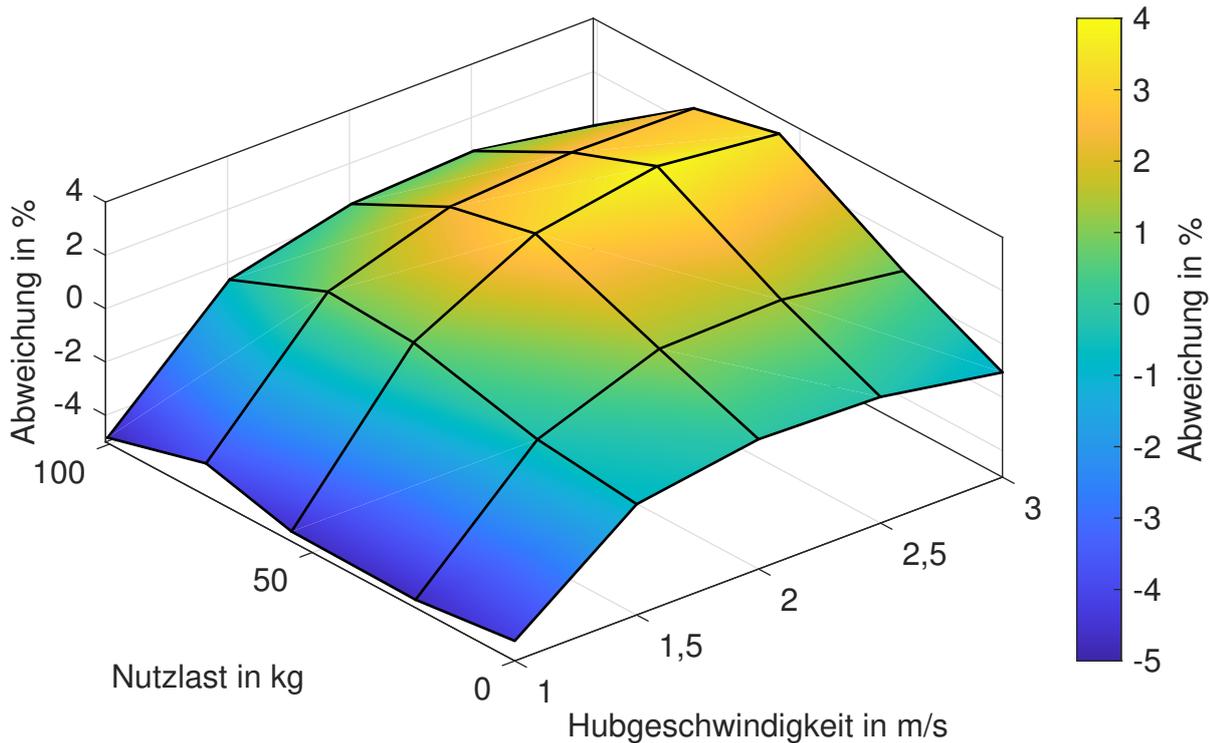


Abbildung 5-10: Abweichung zwischen Messung und Simulation des Hubantriebs

Die Abweichungen liegen zwischen $-4,80\%$ und $3,91\%$ und sind damit etwas höher als beim Fahrtrieb. Sie sind trotz der fehlenden Anpassung an die Hubgeschwindigkeit mit weniger als 5% immer noch gering. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 5-2 aufgelistet. Diese Tabelle beinhaltet auch die Ergebnisse der Energiebedarfe aus Abbildung 4-9.

Tabelle 5-2: Vergleich von Ergebnissen aus Messung und Simulation des Hubantriebs von RBG-1

Hubstrecke in m	Geschwindigkeit in m/s	Nutzlast in kg	Wirkungsgrad des Hubantriebs	Energiebedarf Messung in kJ	Energiebedarf Simulation in kJ	Fehler in %
6,255	1,0	0,0	0,59	36,43	34,94	-4,25
6,255	1,0	24,5	0,59	39,27	37,51	-4,70
6,255	1,0	55,1	0,59	42,60	40,71	-4,63
6,255	1,0	76,2	0,59	44,55	42,92	-3,79
6,255	1,0	100,5	0,59	47,65	45,47	-4,80
6,255	1,5	0,0	0,59	34,36	34,07	-0,84
6,255	1,5	24,5	0,59	36,79	36,64	-0,41
6,255	1,5	55,1	0,59	39,55	39,84	0,74
6,255	1,5	76,2	0,59	41,66	42,05	0,93
6,255	1,5	100,5	0,59	44,86	44,60	-0,60
6,255	2,0	0,0	0,59	33,72	33,68	-0,13
6,255	2,0	24,5	0,59	35,79	36,25	1,27
6,255	2,0	55,1	0,59	38,23	39,45	3,11
6,255	2,0	76,2	0,59	40,67	41,66	2,39
6,255	2,0	100,5	0,59	43,98	44,21	0,52
6,255	2,5	0,0	0,59	33,56	33,47	-0,27
6,255	2,5	24,5	0,59	35,54	36,04	1,38
6,255	2,5	55,1	0,59	37,71	39,24	3,91
6,255	2,5	76,2	0,59	40,33	41,45	2,71
6,255	2,5	100,5	0,59	43,65	44,00	0,79
6,255	3,0	0,0	0,59	33,72	33,36	-1,07
6,255	3,0	24,5	0,59	35,66	35,93	0,75
6,255	3,0	55,1	0,59	37,80	39,14	3,41
6,255	3,0	76,2	0,59	40,25	41,35	2,64
6,255	3,0	100,5	0,59	43,88	43,89	0,03

Kombinierte Bewegung Abschließend wird eine kombinierte Fahrt mit einer Fahrgeschwindigkeit von 3 m/s und einer Hubgeschwindigkeit von 2 m/s gemessen. Es wird eine Nutzlast von 100,5 kg transportiert. Analog zu den vorherigen Validierungen werden die Wirkungsgrade aus dem Vergleich mit Fahr- und Hubantrieb verwendet. Die Bewegung besteht aus einer kombinierten Fahr- und Hubbewegung und einer Fahr- und Senkbewegung. Sie beinhaltet also die Hin- und Rückfahrt. Die Abweichung bei dieser kombinierten Bewegung liegt unter 1 %. Die Zahlenwerte sind in Tabelle 5-3 aufgelistet.

Tabelle 5-3: Vergleich von Ergebnissen aus Messung und Simulation bei einer kombinierten Bewegung von RBG-1

Fahrstrecke in m	Hubstrecke in m	Nutzlast in kg	Energiebedarf Messung in kJ	Energiebedarf Simulation in kJ	Fehler in %
±20,978	±6,255	100,5	97,30	97,84	0,55

5.3.2 Validierung mit Messdaten von RBG-2

Aufgrund der fehlenden Voruntersuchungen, den nicht betriebswarmen Antrieben und der geringen Anzahl an Fahrten, wird ein Toleranzbereich für die Validierung von $\pm 10\%$ festgelegt. Während der Validierung wird festgestellt, dass für die genaue Nachbildung des Leistungsverlaufs im Modell die in x- und y-Richtung bewegten Massen angepasst werden müssen. Diese Tatsache erscheint erst einmal kontraintuitiv, da die Massen meist sehr genau bekannt sind. Siegel et al. haben sich mit dieser Thematik bereits näher befasst. Sie haben festgestellt, dass die Erhöhung einer Masse als Ausgleich für die nicht berücksichtigte Trägheit einer rotierenden Masse im System dienen kann [Sie-2013].

Der Betreiber des RBGs hat die gesamte in y-Richtung bewegte Masse mit 1500 kg angegeben. Aus verschiedenen analytischen Rechnungen geht hervor, dass die Masse höher sein muss. Deswegen wird sie für die Validierung mit etwa 1600 kg angesetzt. Die Nutzlast war im Lagerverwaltungssystem mit 435 kg hinterlegt. Auch hier wird vermutet, dass die hinterlegte Masse nicht der tatsächlichen Masse entspricht. Aus diesem Grund wird nur die Messreihe ohne Nutzlast verwendet.

Der Wirkungsgrad des Fahrtriebs wird zu 0,69 und der des Hubtriebs zu 0,74 gesetzt. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 5-4 aufgelistet. Die Abweichungen bewegen sich im Bereich von $-8,57\%$ bis $8,20\%$. Die Energiebedarfe der Messung sind aber aufgrund der geringen Anzahl an Fahrten auch selbst mit höheren Unsicherheiten behaftet. Deswegen werden Abweichungen des Modells innerhalb von -10% und 10% als akzeptabel angesehen.

Tabelle 5-4: Vergleich von Ergebnissen aus Messung und Simulation von RBG-2

Fahrstrecke m	in	Hubstrecke in m	Energiebedarf Messung in kJ	Energiebedarf Simulation in kJ	Abweichung in %
17,6		0,0	40,59	42,95	5,49
30,0		0,0	58,10	55,04	-5,57
0,0		4,8	110,93	108,14	-2,58
0,0		-4,8	-20,91	-22,78	8,20
0,0		15,9	344,79	351,87	2,01
0,0		-15,9	-83,20	-76,63	-8,57
±17,6		±4,8	148,82	140,04	-6,27

5.3.3 Fazit der Validierung

Die Vergleiche der Simulationsergebnisse mit den Messdaten verschiedener Geräte zeigen die grundsätzliche Eignung des Modells zur Simulation des Energiebedarfs. Die Abweichungen können mithilfe der Anpassung des Wirkungsgrads größtenteils unter den festgelegten Grenzen gehalten werden. Im Vergleich mit den Messdaten von RBG-1 liegen die absoluten Abweichungen unter 5 %. Im Bereich der Validierung von RBG-2 liegen die absoluten Abweichungen unter 10 %. Die höheren Abweichungen sind mit den größeren Unsicherheiten bei der Aufnahme der Messdaten erklärbar. Für die genaue Simulation eines bestimmten Geräts müssten aber zusätzlich Anpassungen bei den Reibungsparametern, den Gerätemassen und den Wirkungsgraden der Rückspeiseeinheit und des Zwischenkreises vorgenommen werden. Dazu müssten zusätzliche geschwindigkeitsabhängige Terme für Reibungsverluste und leistungsabhängige Terme für die elektrischen Verluste eingeführt werden. Nachdem das aber kein Ziel der Simulation ist, werden solche Terme nicht verwendet. In den Simulationsstudien werden die einzelnen einflussgebenden Massen variiert. Damit kann sichergestellt werden, dass eine große Anzahl von Geräten korrekt berücksichtigt wird.

5.4 Durchführung der Simulationsstudien

Die Durchführung der Simulationsstudien lehnt sich an die Vorgehensweise zur Durchführung einer Simulationsstudie nach VDI 3633 an [VDI-3633, Blatt 1 S. 18–21]. Dabei werden folgende Phasen unterschieden:

- Aufgabendefinition
- Systemanalyse
- Modellformalisierung
- Implementierung

- Experimente und Analyse
- parallele Datenbeschaffung und Datenaufbereitung.

Die Phasen Aufgabendefinition, Systemanalyse, Modellformalisierung und Implementierung werden großteils schon in der Entwicklung des Simulationsmodells abgebildet. Die Implementierung berücksichtigt bereits den Wunsch, eine große Anzahl an Konfigurationen zu berechnen und zu vergleichen. Die Ausgestaltung der Simulationsstudien basiert auf der Unterteilung der Konfigurationen in Grundkonfigurationen und Einzelkonfigurationen. Eine Einzelkonfiguration beinhaltet die variierten Parameter, die mittels eines Latin Hypercube Sampling Algorithmus (LHSA) [Sie-2017, S. 205–209] ausgewählt werden. Dieser Algorithmus ist in der Lage, in einem multidimensionalen Parameterraum zufallsbasiert Konfigurationen für die Simulation auszuwählen. Diese Einzelkonfigurationen sind dann in verschiedenen Grundkonfigurationen enthalten. Die Grundkonfigurationen beinhalten Parameter, die eine grundlegende Einteilung der Geräte vornehmen und diskrete Werte annehmen. Dazu zählen unter anderem die Unterscheidung zwischen AKL und APL oder die Unterscheidung von Einzel- und Doppelspielbetrieb. In den Studien der Parameter wird darüber hinaus zwischen Basisparametern und erweiterten Parametern unterschieden.

5.4.1 Studie 1 - Basisparameter

Im Rahmen der Studie 1 werden die Basisparameter für die Untersuchung von Durchsatz und Energiebedarf bei RBGs untersucht. Der grundlegende Aufbau der Studie und die Ableitung der Ergebnisse sind bereits in [Rüc-2020a] veröffentlicht worden. Im Unterschied zu [Rüc-2020a] werden die Intervalle der untersuchten Parameter noch einmal deutlich erweitert. Zum Beispiel wird das Intervall der Wirkungsgrade der Antriebe von 0,4 bis 0,7 auf 0,4 bis 0,9 vergrößert. Auch die Intervalle der anderen Parameter werden nach zusätzlicher Recherche in der Literatur und nach Rücksprache mit Herstellern erweitert. Im Rahmen der Studie 1 wird der Basisparameterraum mithilfe von acht Grundkonfigurationen und 5000 Einzelkonfigurationen abgedeckt. Neben der Auswahl zwischen AKL oder APL und der Unterscheidung zwischen Einzel- und Doppelspielbetrieb wird in den Grundkonfigurationen ausgewählt, ob ein Gerät eine Rückspeiseeinheit besitzt oder nicht. Es werden die folgenden acht Grundkonfigurationen simuliert (vgl. [Rie-2019, S. 30]):

- AKL im Doppelspielbetrieb ohne Rückspeiseeinheit (*AKL-DS-RU0*²¹)
- AKL im Doppelspielbetrieb mit Rückspeiseeinheit (*AKL-DS-RU1*)
- AKL im Einzelspielbetrieb ohne Rückspeiseeinheit (*AKL-ES-RU0*)
- AKL im Einzelspielbetrieb mit Rückspeiseeinheit (*AKL-ES-RU1*)

²¹ RU0 steht für Konfigurationen ohne Rückspeiseeinheit und RU1 für Konfigurationen mit Rückspeiseeinheit.

- APL im Doppelspielbetrieb ohne Rückspeiseeinheit (*APL-DS-RU0*)
- APL im Doppelspielbetrieb mit Rückspeiseeinheit (*APL-DS-RU1*)
- APL im Einzelspielbetrieb ohne Rückspeiseeinheit (*APL-ES-RU0*)
- APL im Einzelspielbetrieb mit Rückspeiseeinheit (*APL-ES-RU1*).

Damit werden insgesamt 20 000 unterschiedliche Geräte im Einzel- und Doppelspielbetrieb simuliert. Diese Unterscheidung führt zu einer einfacheren Anwendbarkeit des LHSAs. Mit dessen Hilfe werden die 5000 Einzelkonfigurationen ausgewählt. Die Einzelkonfigurationen bilden die Intervalle der zwölf Parameter aus Tabelle 5-5 ab. Dabei werden für die zwei Gerätetypen AKL und APL jeweils andere Wertebereiche verwendet. Die Wertebereiche werden auf Basis von Literatur, Expertengesprächen und Annahmen bestimmt. Es kommen jeweils 5000 Einzelkonfigurationen für die vier AKL-Grundkonfigurationen und 5000 Einzelkonfigurationen für die vier APL-Grundkonfigurationen zum Einsatz.

Tabelle 5-5: Auflistung der variierten Basisparameter und der Grenzen ihrer Intervalle (Erweiterung der Parameter aus [Rüc-2020a])

Parameter	AKL Min	AKL Max	APL Min	APL Max
Anzahl der Regalspalten n_{col}	30	150	20	120
Anzahl der Regalebenen n_{lev}	10	50	6	20
Beschleunigung des Fahrwerks a_x	2,0 m/s ²	5,0 m/s ²	0,5 m/s ²	1,5 m/s ²
Beschleunigung des Hubwerks a_y	1,0 m/s ²	3,0 m/s ²	0,2 m/s ²	1,0 m/s ²
Geschwindigkeit des Fahrwerks v_x	3,0 m/s	6,0 m/s	1,0 m/s	4,0 m/s
Geschwindigkeit des Hubwerks v_y	1,5 m/s	3,0 m/s	0,5 m/s	2,0 m/s
Wirkungsgrad des Fahr- und Hubwerks η_x, η_y	0,4	0,9	0,4	0,9
Masse des Fahrwerks m_{FW}	700 kg	2000 kg	2000 kg	20 000 kg
Masse des Hubwagens m_{HW}	150 kg	450 kg	1000 kg	4500 kg
Masse der Nutzlast m_{NL}	25 kg	100 kg	500 kg	1500 kg
Lagerfüllgrad O_{cc}	0,4	0,9	0,4	0,9

Die Werte für Abmaße und kinematische Parameter der AKLs basieren auf [Ert-2016a, S. 148]. Für APLs werden die Abmaße auf Basis von Werten von [Lud-2021, S. 88 und B-3] gewählt.

Abmaße des Regals Die Anzahl der Regalspalten und Regalebenen reflektieren gängige Abmaße von HRLs. Im AKL wird ein Abstand zwischen zwei Spalten von

0,57 m und zwischen zwei Ebenen von 0,5 m verwendet [Ert-2016a, S. B-1]. Dabei werden KLTs nach [VDA-4500] mit den Abmaßen 600 mm mal 400 mm mal 280 mm für Länge, Breite und Höhe verwendet. Damit ergeben sich zusammengefasst Regallängen von ca. 17 m bis 86 m und Regalhöhen von ca. 5 m bis 25 m.

Analog wird in einem APL ein Abstand zwischen zwei Spalten von 1,05 m und zwischen zwei Ebenen von 2,0 m verwendet [Lud-2021, S. C-2–C-4]. Es werden Europaletten mit einer Grundfläche von 1200 mm mal 800 mm gelagert und es wird eine uniforme Gesamthöhe von Palette und Nutzlast von 1,5 m angesetzt. Die Anzahl Ebenen in einem APL ist auf 20 begrenzt, um eine maximale Regalhöhe von ca. 40 m abzubilden. Damit ergeben sich zusammengefasst Regallängen von ca. 21 m bis 126 m und Regalhöhen von ca. 12 m bis 40 m.

Kinematische Parameter Bei den kinematischen Parametern werden im Bereich der AKLs hohe Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte berücksichtigt, um auch neuesten Bauweisen Rechnung zu tragen. Moderne Geräte erreichen Fahrbeschleunigungen von bis zu 5 m/s^2 und Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 6 m/s. Die Hubantriebe sind üblicherweise mit Geschwindigkeiten im Bereich bis 3 m/s und mit Beschleunigungen bis 3 m/s^2 zu finden. In der Praxis wird auch schon ein Regalbediengerät mit einer Fahrbeschleunigung von über 5 m/s^2 und einer Hubbeschleunigung von 4 m/s^2 vorgestellt [Kau-2018]. Solche Geräte stellen aber noch eine Ausnahme dar.

Im Bereich der APLs werden Fahrgeschwindigkeiten bis 4 m/s und Fahrbeschleunigungen bis $1,5 \text{ m/s}^2$ berücksichtigt. Beim Hubwerk kommen Beschleunigungen bis 1 m/s^2 und Geschwindigkeiten bis 2 m/s zum Einsatz.

Wirkungsgrade Die Antriebswirkungsgrade berücksichtigen hauptsächlich elektrische Verluste im System der Antriebe. Sie werden für AKLs und APLs im Bereich zwischen 40 % und 90 % variiert und reflektieren eine große Bandbreite an Komponenten mit unterschiedlichen Wirkungsgraden. Der Zwischenkreis wird mit einem Wirkungsgrad von 90 % berücksichtigt. Bei der Rückspeiseeinheit wird ein Wirkungsgrad von 80 % angesetzt. Dieser Wert basiert auf den Messergebnissen.

Massen Die Gerätemasse im Modell setzt sich aus der Masse des Fahrwerks m_{FW} , der Masse des Hubwagens m_{HW} und der Masse des Masts m_{Mast} zusammen. In der Masse des Hubwagens m_{HW} sind die Masse des Hubschlittens und des LAMs enthalten. Sie entspricht zusammen mit der Masse der Nutzlast m_{NL} der in y-Richtung bewegten Masse m_y . Der Mast wird mit einer längenbezogenen Masse von 44 kg/m im AKL bzw. 400 kg/m im APL berücksichtigt. Andere Gerätemassen, wie die Masse des Schaltschranks, sind vereinfacht in der Masse des Fahrwerks m_{FW} enthalten. Die

in x-Richtung bewegte Masse m_x besteht somit aus der Masse des Fahrwerks m_{FW} , des Hubwagens m_{HW} und des Masts m_{Mast} . Für AKLs wird m_{FW} zwischen 700 kg und 2000 kg und für APLs zwischen 2000 kg und 20 000 kg variiert. Analog wird m_{HW} bei AKLs zwischen 150 kg und 450 kg und bei APLs zwischen 1000 kg und 4500 kg variiert.

Lagerfüllgrad Der Lagerfüllgrad wird in einem Bereich gewählt, in dem ein ungestörter Betrieb des HRLs möglich sein sollte. Die Variation des Füllgrads wird hauptsächlich durchgeführt, um Einflüsse durch den Füllgrad ausschließen zu können. In den Untersuchungen von strategischen Einflussgrößen in [Kar-2020], die auch mit diesem Modell durchgeführt werden, ist der Lagerfüllgrad ein mitbestimmender Faktor.

Leistungen Unter den Leistungen sind die Grundlast P_{GL} , die Leistung des LAMs und die Leistung der Rückspeiseeinheit zusammengefasst. Die mittlere Leistung des LAMs eines AKLs wurde von Ertl mit 600 W beziffert (vgl. [Ert-2016a, S. B-2]). In Messungen an RBG-1 wird die mittlere Leistung mit ca. 900 W gemessen. Für APLs werden Messdaten von RBG-2 verwendet, um eine Leistung von ca. 1500 W zu ermitteln. Diese mittleren Leistungen stellen eine starke Vereinfachung dar. Diese Vereinfachung wird aber akzeptiert, da der Energiebedarf für einen Ein- oder Auslagervorgang deutlich kleiner ist, als der Energiebedarf für die zugehörigen Fachanfahrten. Der Energiebedarf für einen Ein- oder Auslagervorgang beträgt im AKL Bereich ca. 3,0 kJ bis 5,0 kJ und im APL Bereich ca. 3,0 kJ bis 20,0 kJ. Damit sind die Werte meist um einen Faktor 10 niedriger als der Energiebedarf für eine Fachanfahrt.

In Tabelle 5-6 sind die festen Parameter des Simulationsmodells noch einmal zusammengefasst. Dabei ist vor allem die zusätzliche Leistung für den Einsatz einer Rückspeiseeinheit von 200 W interessant (vgl. [Ert-2016a, S. B-2]). Diese entsteht durch die aufwändigere Leistungselektronik, die für die Rückspeiseeinheit der elektrischen Energie in das Versorgungsnetz vonnöten ist. Ein Teil dieser Parameter werden dann in Studie 2 zusätzlich variiert.

5.4.2 Studie 2 - Erweiterte Parameter

In der zweiten Simulationsstudie werden zusätzlich vier Parameter variiert, die in Studie 1 mit festen Werten versehen sind. Die acht Grundkonfigurationen und die zwölf Basisparameter bleiben gleich. Die vier neuen Parameter werden in einem größeren Bereich variiert und es werden dabei auch Extremwerte betrachtet. Zum Beispiel wird die Reibung in x-Richtung testweise auf 0 gesetzt. In y-Richtung wird Reibung überhaupt erst berücksichtigt. Die Grundlast wird zwischen 0 W und 1200 W variiert und der Wirkungsgrad der Rückspeiseeinheit zusätzlich zwischen 0,5 und 1,0. Mit diesen

Tabelle 5-6: Auflistung der fixen Parameter für AKL und APL

Parameter	AKL	APL
Abstand in x-Richtung	0,57 m	1,05 m
Abstand in y-Richtung	0,5 m	2,0 m
Wirkungsgrad Zwischenkreis	90 %	90 %
Wirkungsgrad Rückspeiseeinheit	80 %	80 %
Faktor effektive Beschleunigung	75 %	75 %
Längenbezogene Masse des Masts	44 kg/m	400 kg/m
Mittlere Leistung des LAM	900 W	1500 W
Grundlast P_{GL}	600 W	600 W
Leistung der Rückspeiseeinheit	200 W	200 W

Änderungen soll überprüft werden, inwieweit sich der Parameterraum verändert, wenn diese in Studie 1 konstanten Parameter zusätzlich verändert werden.

Tabelle 5-7: Auflistung der zusätzlich variierten Parameter und der Grenzen ihrer Intervalle in Studie 2

Parameter	AKL/APL Min	AKL/APL Max
Grundlast P_{GL}	0 W	1200 W
Wirkungsgrad RU	0,5	1,0
Reibung x-Richtung $k_{x,R}$	0,0	$10,66 \cdot 10^{-3}$
Reibung y-Richtung $k_{y,R}$	0,0	$2,00 \cdot 10^{-3}$

6 Simulationsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der beiden Simulationsstudien in den Abschnitten 6.1 und 6.2 vorgestellt. Dieses Kapitel baut direkt auf der Entwicklung des Simulationsmodells in Kapitel 5 auf. Ein Teil der Ergebnisse sind in reduzierter Form²² bereits in [Rüc-2020a] veröffentlicht worden. Eine abschließende Diskussion der Ergebnisse und der daraus ableitbaren Handlungsempfehlungen findet in Kapitel 8 statt. Im anschließenden Kapitel 7 werden die Entwicklung und die Simulationsergebnisse der Effizienzkennzahl vorgestellt. Für die Simulationsstudien wird zunächst jeweils der Ergebnisraum vorgestellt, anschließend werden ableitbare Korrelationen und abschließend die Haupteffekte präsentiert.

6.1 Ergebnisse der Studie 1 – Basisparameter

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Simulationsstudie 1 in mehreren Abschnitten vorgestellt. Auf diesen Daten basierend wird in Kapitel 7 die Effizienzkennzahl und die Bewertung abgeleitet. In den Ergebnisdaten werden zwei Parameter ausgewertet. Einerseits wird der Durchsatz TP_{AKL} oder TP_{APL} in Ladeeinheiten pro Stunde, andererseits der mittlere Energiebedarf E_{AKL} oder E_{APL} in kJ pro Einzel- oder Doppelspiel betrachtet. Zunächst wird in Abschnitt 6.1.1 der Ergebnisraum der Simulationsstudie präsentiert. Danach werden in Abschnitt 6.1.2 die Pearson Korrelationen für den Doppelspielbetrieb von AKLs und APLs vorgestellt. Damit können die Effekte der Parameter im Überblick dargestellt und grundlegende Zusammenhänge untersucht werden. In Abschnitt 6.1.3 werden die Ergebnisse in Regressionsmodelle überführt. Damit lassen sich quantitative Effekte einzelner Parameter für AKLs und APLs im Einzel- und Doppelspielbetrieb vergleichend darstellen. Abschließend wird in Abschnitt 6.1.4 der Einfluss des Regalwandfaktors diskutiert.

6.1.1 Ergebnisraum

In den Diagrammen der Ergebnisdarstellung wird meist auf Punktdarstellungen²³ zurückgegriffen. Dabei stellt jeder Punkt eine einzelne simulierte Konfiguration dar. Um den Ergebnisraum der untersuchten Geräte zu visualisieren, werden alle simulierten AKL Konfigurationen (siehe Abbildung 6-1) und APL Konfigurationen (siehe Abbildung

²²Der betrachtete Parameterraum ist in der veröffentlichten Untersuchung kleiner.

²³nachfolgend Punkteplot genannt

6-2) in zwei Punkteplots dargestellt. Auf den Achsen werden der mittlere Energiebedarf und der Durchsatz dargestellt. In den Abbildungen sind Einzelspiel- und Doppelspielbetrieb getrennt dargestellt. Im Doppelspielbetrieb werden generell etwas höhere Durchsätze erreicht. Der mittlere Energiebedarf von Einzel- und Doppelspielbetrieb kann nicht direkt verglichen werden. Der Energiebedarf muss dafür auf die Anzahl an Ladeeinheiten pro Spiel bezogen werden, also beim Doppelspiel halbiert werden.

Die Darstellungen zeigen, dass sich ein großer Teil der Geräte in einem zentralen dreiecksförmigen Feld befinden. Die Verteilungen von Einzel- und Doppelspiel stellen, auch separat betrachtet, jeweils dreieckige Formen dar. Die dreieckige Verteilung ergibt sich hauptsächlich aufgrund der Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit, Lagergröße und Durchsatz. Im Bereich niedriger Durchsätze und niedriger Energiebedarfe liegen die langsamen Geräte in eher kleinen Lagern. Die linke ansteigende Flanke wird dann durch Geräte mit höheren Geschwindigkeiten und damit höheren Durchsätzen gebildet. Die Spitze bilden dann die Geräte mit den größten Geschwindigkeiten in großen Lagern mit hohem mittleren Energiebedarf. Die höchsten Durchsätze werden aber dann tendenziell wieder in kleineren Lagern erreicht. Der mittlere Energiebedarf kleinerer Lager ist aufgrund der reduzierten Abmessungen nach oben hin begrenzt. Durch kleinere Lager mit hohen Geschwindigkeiten bei gleichzeitig fallenden mittleren Energiebedarfen entsteht die rechts abfallende Flanke der dreieckigen Form.

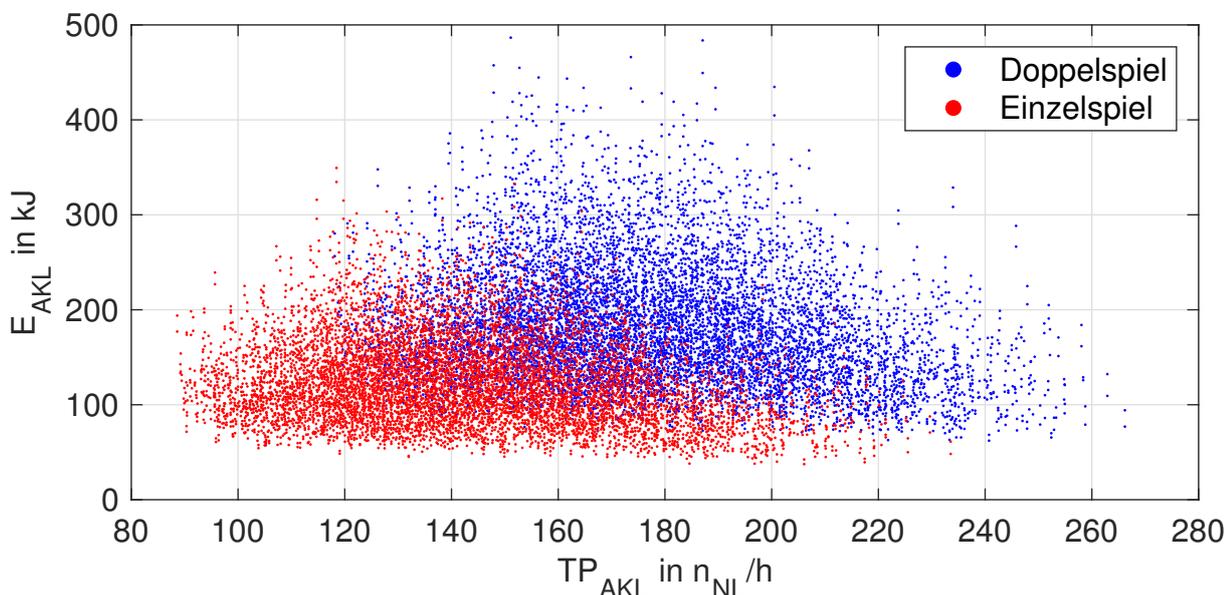


Abbildung 6-1: Ergebnisraum der untersuchten AKL Konfigurationen aus Studie 1 als Punkteplot von Durchsatz und mittlerem Energiebedarf

Gleichzeitig gibt es auch Geräte, die als sogenannte Ausreißer außerhalb des zentralen Felds von Geräten liegen. Nachdem die 12 Basisparameter über den LHSA festgelegt werden, kommt es vor, dass extreme Konfigurationen entstehen. Bei diesen Konfigurationen sind dann die meisten Parameter so gewählt, dass sie die Ausgangs-

größe in eine Richtung beeinflussen. Dadurch entstehen in einzelnen Fällen extreme Konfigurationen, die relativ weit außerhalb des zentralen Bereichs liegen.

Generell gibt es in den Ergebnisräumen der AKLs und APLs hauptsächlich Unterschiede in den Absolutwerten von Durchsatz und mittlerem Energiebedarf. Die Durchsätze sind im APL Bereich um ca. 50 % kleiner und die mittleren Energiebedarfe gleichzeitig um ca. den Faktor 10 größer als im AKL Bereich.

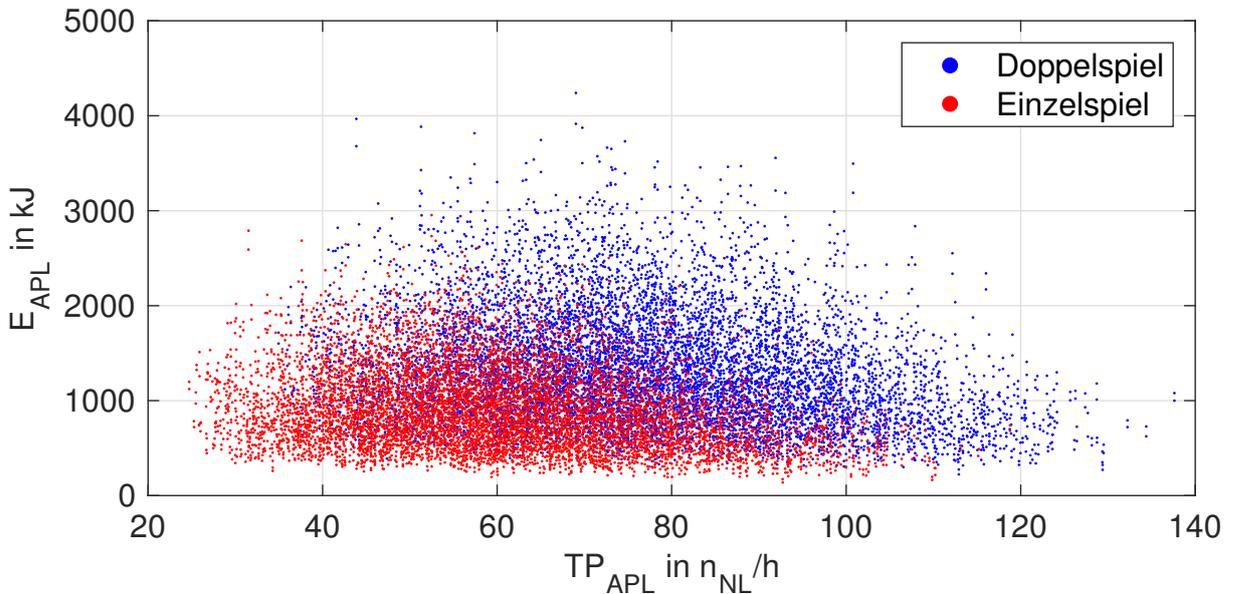


Abbildung 6-2: Ergebnisraum der untersuchten APL Konfigurationen aus Studie 1 als Punkteplot von Durchsatz und mittlerem Energiebedarf

6.1.2 Korrelationen

Um den generellen Einfluss der Parameter darzustellen, werden diese zuerst mit der linearen Korrelation nach Pearson untersucht. Diese Korrelation ist eine häufig eingesetzte Kennzahl zur Beschreibung der Abhängigkeit zweier Variablen x und y . Sie ist nach Gleichung 6-1 mit den Einzelwerten x_i, y_i , den Mittelwerten \bar{x}, \bar{y} und der Gesamtzahl der Experimente n_r definiert. Ein linearer Zusammenhang und eine Normalverteilung der beiden Variablen wird vorausgesetzt. Der Parameter der Pearson-Korrelation nimmt Werte im Bereich von $r \in [-1, 1]$ an. Ein Wert von $|r| = 1$ steht für eine perfekte lineare Korrelation und ein Wert von $r = 0$ für keine lineare Korrelation. Damit kann bei nichtlinearen Zusammenhängen $r = 0$ sein, obwohl ein quadratischer Zusammenhang vorliegt. Zusätzlich kann mit einer Korrelation noch kein kausaler Zusammenhang belegt werden. Aus diesen Gründen werden die Daten in Abschnitt 6.1.3 in ein Regressionsmodell überführt. Damit können kausale Zusammenhänge zwischen zwei Variablen nachgewiesen werden.

Die Signifikanz S , die p -Werte und die Signifikanzgrenze α werden in den Ergebnistabellen zusätzlich mitangegeben, um die statistische Signifikanz des Vorhandenseins

der Korrelation mitzubestimmen. Der Korrelationskoeffizient sagt nichts über die kausale Beziehung zweier Variablen aus, sondern beschreibt lediglich einen mathematischen Zusammenhang. [Sie-2017, S. 381–383]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n_r} (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_r} (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n_r} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6-1)$$

Im ersten Schritt ist in Abbildung 6-3 eine einzelne Korrelation für den mittleren Energiebedarf der simulierten AKL Konfiguration im Doppelspielbetrieb mit der Beschleunigung des Fahrantriebs dargestellt. In diesem Plot sind die 5000 Basiskonfigurationen mit und ohne Rückspeiseeinheit, also insgesamt 10 000 simulierte Konfigurationen, dargestellt. Eingezeichnet sind die Intervallgrenzen des variierten Parameters auf der x-Achse. Links oben steht der Wert des Korrelationsparameters r und zusätzlich ist eine lineare Ausgleichsgerade, bestimmt nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, eingezeichnet. Auf der y-Achse wird entweder der Wert des mittleren Energiebedarfs $E_{AKL/APL}$ für ein Spiel in kJ oder der Durchsatz $TP_{AKL/APL}$ in Ladeeinheiten pro Stunde dargestellt.

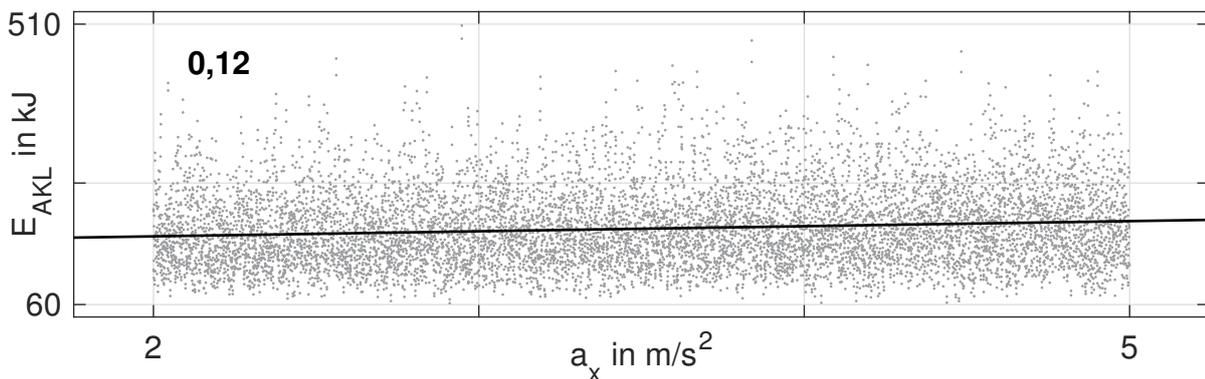


Abbildung 6-3: Pearson Korrelation zwischen a_x und E_{AKL} im Doppelspielbetrieb mit und ohne Rückspeiseeinheit

Allgemeine Aussagen Die Korrelationen für alle 12 untersuchten Parameter im Doppelspielbetrieb sind in der Abbildung 6-4 für AKLs und in der Abbildung 6-5 für APLs dargestellt. Auf der y-Achse wird entweder der Wert des mittleren Energiebedarfs $E_{AKL/APL}$ für ein Spiel in kJ oder der Durchsatz $TP_{AKL/APL}$ in Ladeeinheiten pro Stunde dargestellt. Die Grenzwerte der Parameter auf der x-Achse sind analog zu Tabelle 5-5 dargestellt. Für $E_{AKL/APL}$ verteilen sich die Datenpunkte nicht symmetrisch um die Ausgleichsgerade, wohingegen die Datenpunkte von $TP_{AKL/APL}$ sich in etwa symmetrisch um die Ausgleichsgerade verteilen. Dieser Zusammenhang ergibt sich daher, dass bei geringem $E_{AKL/APL}$ der Anteil, der durch die Grundlast entsteht, eine größere Rolle spielt. Durch die Grundlast wird $E_{AKL/APL}$ nach unten hin begrenzt. Nach

oben hin können Ausreißer bei $E_{AKL/APL}$ durch Kombinationen von Extremwerten der Parameter entstehen.

Der Wert des Korrelationskoeffizienten im Zusammenhang mit den Achsenwerten auf der x- und y-Achse lässt einen Vergleich der Einflüsse zu. Grundsätzlich werden aber nicht alle Parameter mit der gleichen Spanne variiert. So wird n_{col} im AKL Bereich zwischen 30 und 150 verändert. Also entspricht der Maximalwert dem fünffachen Minimalwert. Bei v_x entspricht der Maximalwert lediglich dem doppelten Minimalwert. Dies sollte bei der Bewertung der Korrelationskoeffizienten berücksichtigt werden. In der Darstellung wird aber auf der y-Achse immer der gleiche Wertebereich abgebildet. Damit lassen sich die Einflüsse der einzelnen Parameter vergleichen. In den Korrelationsabbildungen ist gleichzeitig ein Vergleich der Einflüsse eines Parameters auf $TP_{AKL/APL}$ und auf $E_{AKL/APL}$ möglich. Eine bessere quantitative Bewertung erfolgt dann mittels Regressionsmodell in Abschnitt 6.1.3.

Auf $TP_{AKL/APL}$ haben nur die Lagerabmessungen n_{col}, n_{lev} und die kinematischen Parameter a_x, a_y, v_x, v_y einen Einfluss. Die Wirkungsgrade η_x, η_y und Massen m_{FW}, m_{HW}, m_{NL} können aufgrund der Modellierung keinen Einfluss haben, da sie in der Berechnung des Durchsatzes nicht verwendet werden. Es zeigt sich, dass der Lagerfüllgrad Occ innerhalb der simulierten Grenzen keine Auswirkung auf $TP_{AKL/APL}$ und $E_{AKL/APL}$ hat.

Im Korrelationsdiagramm lassen sich die Tendenzen der Auswirkungen einzelner Parameter grafisch darstellen. Bei den Parametern n_{col} und n_{lev} zeigt sich die diskrete Auflösung auf der x-Achse. Nach der Auswahl durch den LHSA wird die Anzahl an Spalten und Ebenen auf eine ganze Zahl gerundet. Die Werte reihen sich dadurch entlang von vertikalen Linien auf. Die Bildung der Korrelation wird davon nicht beeinflusst.

Die Werte aus den Abbildungen 6-4 und 6-5 sind in den Tabellen 6-1 und 6-2 aufgelistet. Die Tabellen enthalten, zusätzlich zum Korrelationskoeffizienten r , die Signifikanzgrenze α , den p -Wert und die Signifikanz S . Es wird eine angepasste Signifikanzgrenze, die mit der Anzahl der Variablen kleiner wird, verwendet. Die Signifikanzgrenze wird den p -Werten sortiert zugeordnet. Dem größten p -Wert wird auch die höchste Signifikanzgrenze von $\alpha = 5\%$ zugewiesen. Die Signifikanz S wird mit Plus oder Minus beschrieben. Wenn der p -Wert kleiner als die Signifikanzgrenze α ist, dann ist S positiv (+) und die Korrelation ist statistisch signifikant.

Aussagen zu AKL Die Lagerabmessungen n_{col} und n_{lev} weisen beide signifikante Zusammenhänge mit TP_{AKL} und E_{AKL} auf. Mit steigenden Abmessungen sinkt TP_{AKL} und E_{AKL} steigt. n_{lev} korreliert stärker mit E_{AKL} , wohingegen n_{col} stärker mit TP_{AKL} korreliert. Mit dem höchsten Korrelationskoeffizienten von $r = -0,85$ herrscht zwischen n_{col} und TP_{AKL} fast ein linearer Zusammenhang.

Die Beschleunigungen a_x, a_y und Geschwindigkeiten v_x, v_y korrelieren positiv mit $TP_{AKL/APL}$. Die Parameter a_x und v_x korrelieren positiv mit E_{AKL} , wohingegen für a_y und v_y keine lineare Korrelation mit E_{AKL} vorherrscht. Geschwindigkeit und Beschleunigung spielen für den Energiebedarf einer Bewegung in y-Richtung nur eine kleine Rolle. Rein physikalisch betrachtet hängt dieser von der potenziellen Energie und damit von der Masse, der Strecke und der Erdbeschleunigung ab. Diese Zusammenhänge konnten auch mit den Messungen an RBG-1 bestätigt werden (siehe Abschnitte 4.3.2 und 4.3.3). Im Vergleich mit den Abmessungen weist von den kinematischen Parametern nur v_x einen ähnlich hohen Einfluss auf.

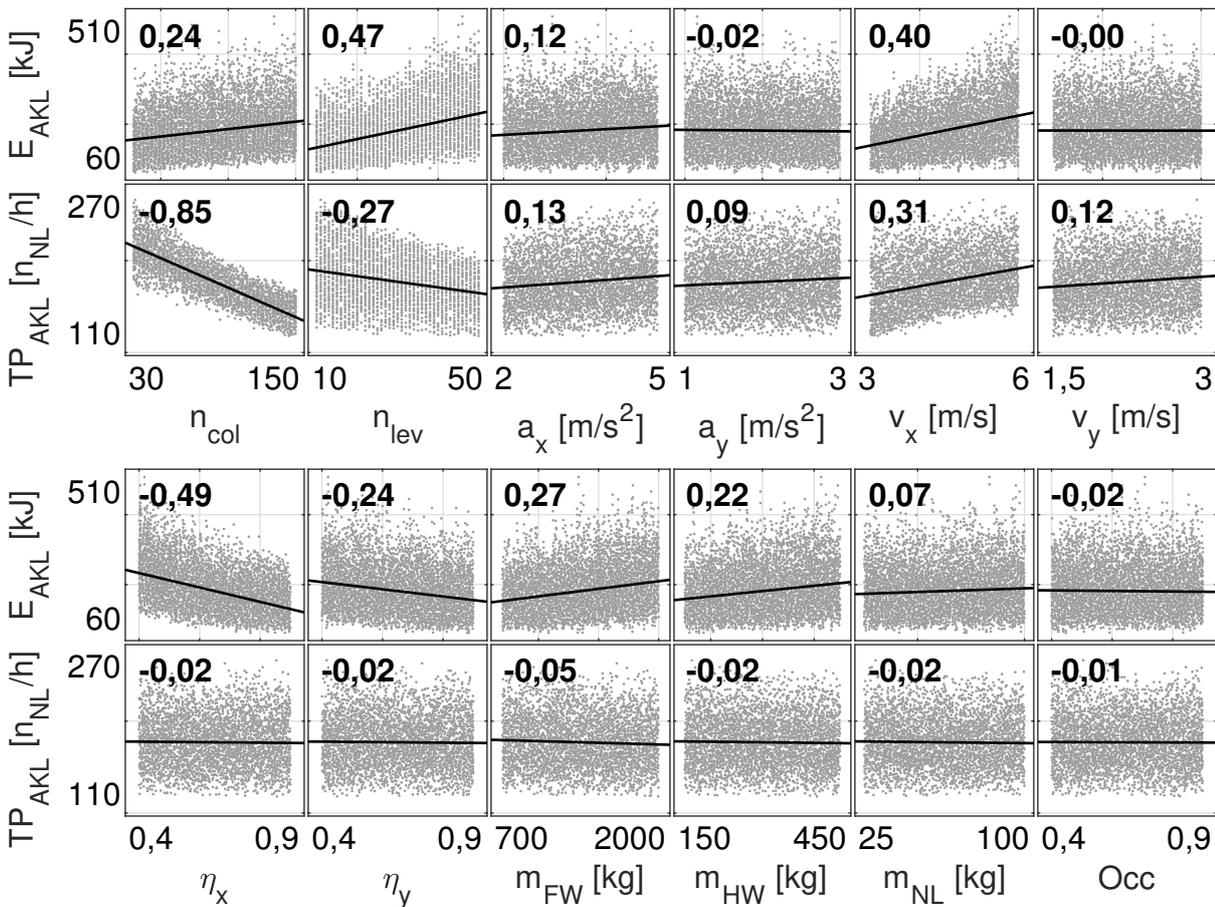


Abbildung 6-4: Pearson Korrelationen der variierten Parameter der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb (vgl. [Rüc-2020a])

Die Wirkungsgrade korrelieren negativ mit E_{AKL} , wobei besonders η_x stärker korreliert. Im AKL Bereich spielt besonders die Bewegung in x-Richtung eine größere Rolle, da dabei das gesamte RBG auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt wird. Relativ dazu trägt die Hubbewegung nur zu einem kleineren Anteil zu E_{AKL} bei.

Die Massen korrelieren alle positiv mit E_{AKL} . Wobei die Korrelation von m_{FW} und m_{HW} ähnlich groß sind, obwohl m_{HW} deutlich kleinere Werte annimmt. m_{HW} trägt aber zu einer Erhöhung des Energiebedarfs in x- und y-Richtung bei.

Die signifikante Korrelation mit $r = -0,05$ zwischen m_{FW} und TP_{AKL} ist eine Scheinkor-

relation, die vermutlich durch den LHSA entsteht. Wahrscheinlich kommt es durch den Eingriff in die Parameterauswahl bei n_{col} und n_{lev} zu einer geringfügigen Verzerrung des Parameterfelds. Es konnten nicht signifikante Scheinkorrelationen zwischen Parametern die den Durchsatz beeinflussen und m_{FW} nachgewiesen werden. Summiert man diese Korrelationen auf, ergibt sich die statistisch signifikante Scheinkorrelation zwischen m_{FW} und TP_{AKL} . In verschiedenen Versuchen konnte keine andere Erklärung gefunden werden. Die Werte aus Abbildung 6-4 sind in Tabelle 6-1 aufgelistet.

Tabelle 6-1: Korrelationswerte der variierten Parameter der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb mit Signifikanzgrenze α , p -Wert und Signifikanz S (Tabellenwerte der Abbildung 6-4)

Parameter	Energiebedarf				Durchsatz			
	α in %	p in %	S	r	α in %	p in %	S	r
n_{col}	0,31	0,00	+	0,24	0,25	0,00	+	-0,85
n_{lev}	0,21	0,00	+	0,47	0,28	0,00	+	-0,27
a_x	0,45	0,00	+	0,12	0,38	0,00	+	0,13
a_y	0,83	5,28	-	-0,02	0,50	0,00	+	0,09
v_x	0,22	0,00	+	0,40	0,26	0,00	+	0,31
v_y	5,00	85,94	-	0,00	0,42	0,00	+	0,12
η_x	0,23	0,00	+	-0,49	1,25	12,80	-	-0,02
η_y	0,29	0,00	+	-0,24	1,67	13,13	-	-0,02
m_{FW}	0,28	0,00	+	0,27	0,56	0,00	+	-0,05
m_{HW}	0,33	0,00	+	0,22	0,63	4,23	-	-0,02
m_{NL}	0,56	0,00	+	0,07	0,71	4,73	-	-0,02
O_{cc}	1,00	6,15	-	-0,02	2,50	50,15	-	-0,01

Aussagen zu APL Wie oben erwähnt ist TP_{APL} im Schnitt um ca. 50% kleiner als TP_{AKL} und E_{APL} ca. um den Faktor 10 größer als E_{AKL} .

Im APL Bereich steigen, verglichen mit dem Verhältnis bei AKLs, die Absolutwerte der Korrelationskoeffizienten von n_{lev} im Vergleich zu n_{col} an. Dieser Effekt zeigt sich bereits bei TP_{APL} und noch stärker bei E_{APL} . Im APL Bereich scheint die Wichtigkeit von n_{lev} zuzunehmen. Dieser mögliche Zusammenhang ist auf zwei Faktoren zurückzuführen. Die Maximalwerte von v_x sind im APL Bereich geringer. Nachdem der Energiebedarf von v_x^2 abhängt, wirkt sich die geringere Maximalgeschwindigkeit stark aus. Zusätzlich steigt mit n_{lev} , aufgrund der höheren längenbezogenen Masse des Masts, die Gesamtmasse m_{ges} im APL Bereich stärker an.

Die kinematischen Parameter weisen grundsätzlich ähnliche Zusammenhänge wie im AKL Bereich auf. Die Korrelationen von v_x und v_y mit TP_{APL} sind jeweils stärker, als die Korrelation von v_x mit E_{APL} ist.

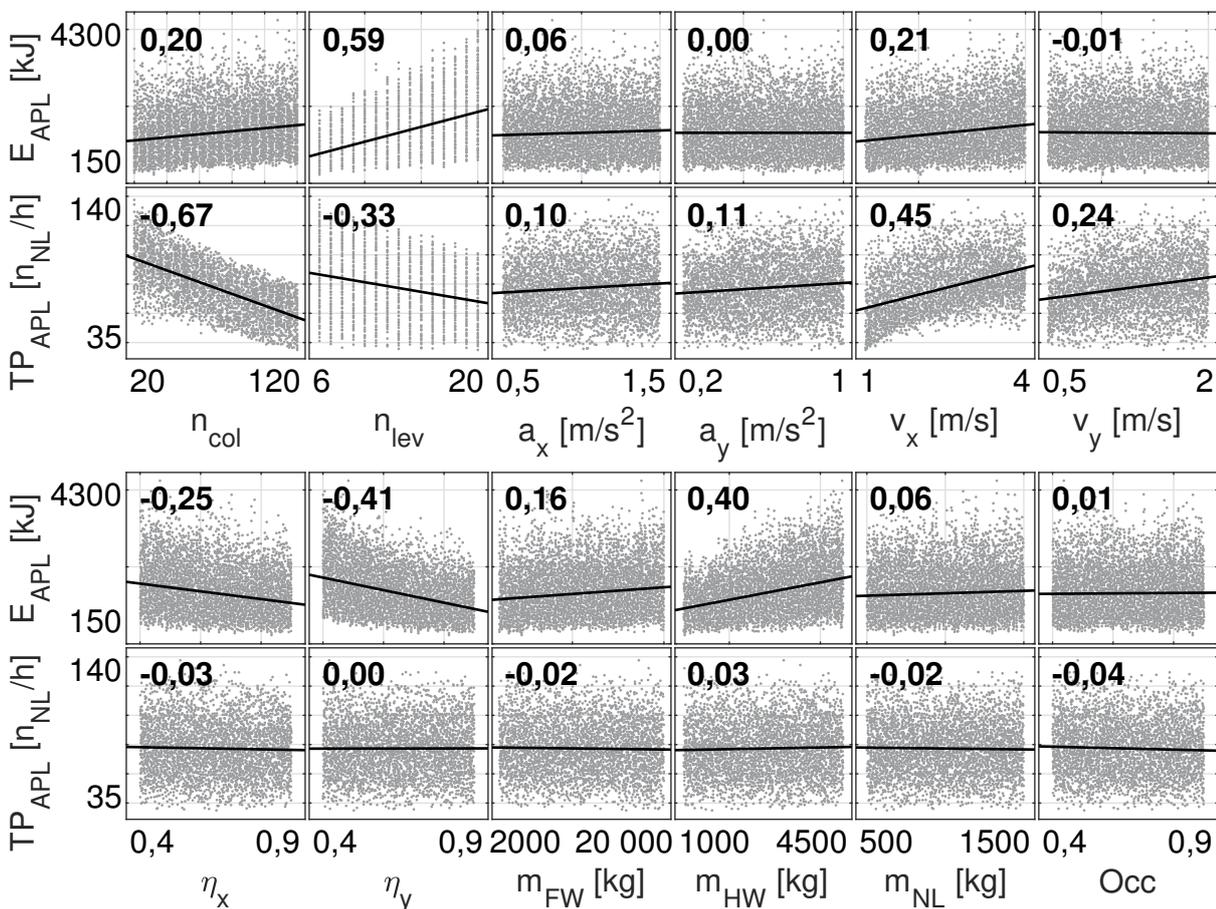


Abbildung 6-5: Pearson Korrelationen der variierten Parameter der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb (vgl. [Rüc-2020a])

Im Bereich der Wirkungsgrade ergibt sich auch eine klare Verschiebung der Bedeutung von η_x zu η_y hin. Durch den erhöhten Beitrag der Bewegung in y-Richtung zu E_{APL} ergibt sich für η_y die stärkere Korrelation.

Bei den Massen zeichnet sich ein ähnliches Bild ab. m_{HW} korreliert im Vergleich zu

m_{FW} stärker mit E_{APL} . Auch bei TP_{APL} gibt es drei signifikante Scheinkorrelationen mit den Parametern η_x , m_{HW} und O_{cc} . Auch diese kommen nach Überprüfung der Zusammenhänge aus dem LHSA.

Tabelle 6-2: Korrelationswerte der variierten Parameter der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb mit Signifikanzgrenze α , p -Wert und Signifikanz S (Tabellenwerte der Abbildung 6-5)

Parameter	Energiebedarf				Durchsatz			
	α in %	p in %	S	r	α in %	p in %	S	r
n_{col}	0,36	0,00	+	0,20	0,25	0,00	+	-0,67
n_{lev}	0,21	0,00	+	0,59	0,28	0,00	+	-0,33
a_x	0,56	0,00	+	0,06	0,45	0,00	+	0,10
a_y	5,00	99,29	-	0,00	0,42	0,00	+	0,11
v_x	0,33	0,00	+	0,21	0,26	0,00	+	0,45
v_y	1,67	16,92	-	-0,01	0,31	0,00	+	0,24
η_x	0,29	0,00	+	-0,25	0,83	0,24	+	-0,03
η_y	0,22	0,00	+	-0,41	2,50	79,32	-	0,00
m_{FW}	0,36	0,00	+	0,16	0,83	2,71	-	-0,02
m_{HW}	0,24	0,00	+	0,40	0,71	0,11	+	0,03
m_{NL}	0,50	0,00	+	0,06	1,00	4,19	-	-0,02
O_{cc}	1,25	16,84	-	0,01	0,63	0,00	+	-0,04

In Anhang E.1 sind die Korrelationswerte für den Einzelspielbetrieb in den Tabellen E-1 und E-2 aufgelistet.

6.1.3 Haupteffekte

Ein Haupteffekt repräsentiert die Stärke des Einflusses eines bestimmten Prädiktors auf die Untersuchungsgröße. Berechnet wird er als Differenz der Mittelwerte der Untersuchungsgröße bei Maximal- und Minimalwert des Prädiktors [Sie-2017, S. 12]. Haupteffekte können positiv oder negativ sein. Wenn nachfolgend davon gesprochen wird, dass ein Haupteffekt größer als ein anderer ist, dann werden die Beträge der Haupteffekte miteinander verglichen.

Um die Haupteffekte der einzelnen Parameter zu quantifizieren, wird ein quadratisches Regressionsmodell verwendet. Damit können auch nichtlineare Effekte einzelner Parameter abgebildet werden. Die Zusammenhänge im Modell sind hauptsächlich linear oder quadratisch. Das quadratische Regressionsmodell liefert für die vorliegenden Daten die besten Ergebnisse. Modelle höherer Ordnung weisen schlechtere Gütegrade auf. Die zwölf Einzelmodelle repräsentieren die drei Parameter: Durchsatz

$TP_{AKL/APL}$, Energiebedarf $E_{AKL/APL}$ und Effizienzkennzahl $k_{EE,AKL/APL}$ in jeweils vier Ausprägungen: AKL-ES, AKL-DS, APL-ES und APL-DS. Die Ergebnisse für $k_{EE,AKL/APL}$ werden in Kapitel 7 vorgestellt.

Im Rahmen der Ergebnisdarstellung werden AKLs und APLs im Einzel- und Doppelspielbetrieb zusammen dargestellt. Mit dieser Darstellung lassen sich AKLs und APLs im Einzel- und Doppelspielbetrieb vergleichen. In Abbildung 6-6 sind die Fehlerwerte als R^2 Werte für die zwölf Modelle aufgetragen. Die R^2 Werte liegen durchweg über 0,95 und weisen auf eine hohe Güte des Modells hin. Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist ein Gütekriterium für ein Regressionsmodell [Sie-2017, S. 236–237]. Für jedes Modell werden 13 unabhängige Parameter als Prädiktoren benutzt. Neben den zwölf bekannten Basisparametern wird zusätzlich die Verwendung einer Rückspeiseeinheit als eigene Variable RU dargestellt. Die Variable nimmt ohne Verwendung einer Rückspeiseeinheit den Wert 0 oder bei Verwendung einer Rückspeiseeinheit den Wert 1 an. Damit ergeben sich für jedes Regressionsmodell 104 Terme, die aus 13 rein linearen, 13 rein quadratischen und 78 gemischt-quadratischen Termen bestehen.

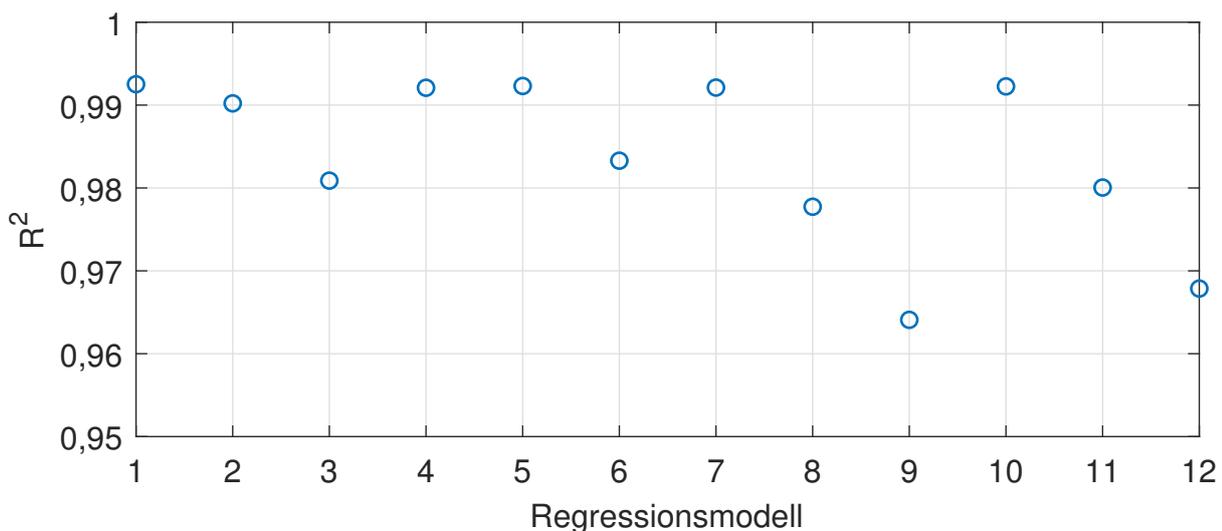


Abbildung 6-6: R^2 Werte der einzelnen Regressionsmodelle von Studie 1

In der Darstellung der Ergebnisse wird für den Durchsatz $TP_{AKL/APL}$ und den mittleren Energiebedarf $E_{AKL/APL}$ zuerst das Haupteffekt-Diagramm und nachfolgend die jeweiligen Adjusted response Diagramme präsentiert. In den Adjusted response Diagrammen sind nur noch Variablen enthalten, die auch einen Haupteffekt liefern.

Allgemeine Aussagen Generell können die Haupteffekte als absoluter Wert oder als normierter relativer Wert dargestellt werden. Für die Normierung wird der jeweilige Mittelwert aller Konfigurationen benutzt. Zum Beispiel werden die Haupteffekte des Durchsatzes für den Einzelspielbetrieb von AKLs mit dem Mittelwert des Durchsatzes

aller AKL Konfigurationen im Einzelspielbetrieb normiert.

Für die meisten Parameter sind die Betragswerte der relativen Haupteffekte im Einzelspielbetrieb größer. Dieser Zusammenhang erscheint erst einmal kontraintuitiv, da die Doppelspiele höhere Fahrzeiten bzw. längere zurückgelegte Strecken haben und damit auch Effekte größere Auswirkungen haben müssten. Die relativen Haupteffekte im Einzelspielbetrieb sind größer, da die Zeiten für Ein- und Auslagerung einen geringeren Anteil an der gesamten Spielzeit haben. Dadurch wird ein höherer Anteil des gesamten Spiels von den varrierten Parametern beeinflusst. Die Vergleichswerte von $TP_{AKL/APL}$ und $E_{AKL/APL}$ sind im Einzelspielbetrieb gleichzeitig kleiner und damit sind die relativen Änderungen größer als im Doppelspielbetrieb. Eine Ausnahme bildet m_{NL} , da es bei DS anteilmäßig weniger Leerfahrten gibt und daher einer Änderung von m_{NL} anteilmäßig eine größere Rolle spielt. Betrachtet man die Absolutwerte der Haupteffekte, dann sind die Effekte im Doppelspielbetrieb für alle Parameter größer. Sinken die Absolutwerte unter eine Grenze, dann ist der relative Einfluss im Doppelspielbetrieb wieder größer. Diese Ausnahme tritt zum Beispiel für die Haupteffekte von a_x , v_y und m_{NL} auf den Energiebedarf auf. Der Lagerfüllgrad spielt weder für $TP_{AKL/APL}$ noch für $E_{AKL/APL}$ eine Rolle.

Durchsatz In Abbildung 6-7 sind die relativen Haupteffekte des Durchsatzes abgebildet. Wie schon auf Basis der Korrelationsdiagramme angenommen, spielen für den Durchsatz nur die Regalabmessungen und die kinematischen Parameter eine Rolle. Die Scheinkorrelationen werden im Regressionsmodell nicht abgebildet. Ein Punkt im Haupteffektdiagramm stellt die relative Änderung des Durchsatzes zwischen den beiden Extremwerten der Variable auf der y-Achse dar. Im AKL Bereich sinkt der Durchsatz, bei einer Änderung von n_{col} von 30 auf 120 Spalten, um 51,9%. In Abbildung E-1 im Anhang sind die absoluten Haupteffekte dargestellt.

Die Lagerabmessungen beeinflussen den Durchsatz stark. Das liegt auch an der großen Bandbreite, die die Abmessungsparameter abdecken. n_{col} wird jeweils um einen Faktor von 5 bis 6 und n_{lev} um einen Faktor von 4 bis 5 verändert. Die Effekte sind im Bereich der APLs noch größer. Hier sind die geringeren absoluten Geschwindigkeiten ausschlaggebend. Im Vergleich hat n_{lev} deutlich kleinere Einflüsse auf $TP_{AKL/APL}$. Die Beschleunigungen und Geschwindigkeiten haben alle einen positiven Einfluss auf den Durchsatz. Besonders hervorzuheben sind die größeren Einflüsse von v_x , v_y auf TP_{APL} . Hier wird auch absolut gesehen stärker varriert als im AKL Bereich. v_x wird im AKL Bereich um 100%²⁴ und im APL Bereich um 300%²⁵ verändert. Der Einfluss von a_x liegt bei ca. 10% über alle Konfigurationen hinweg. a_x wird im AKL Bereich um

²⁴ 3 m/s bis 6 m/s

²⁵ 1 m/s bis 4 m/s

150 %²⁶ und im APL Bereich um 200 %²⁷ verändert.

Die Wirkungsgrade, die Massen, der Lagerfüllgrad und die Verwendung einer Rückspeiseeinheit weisen keine nennenswerten Haupteffekte auf. Ihre fehlende Auswirkung auf den Durchsatz wird im Regressionsmodell korrekt abgebildet.

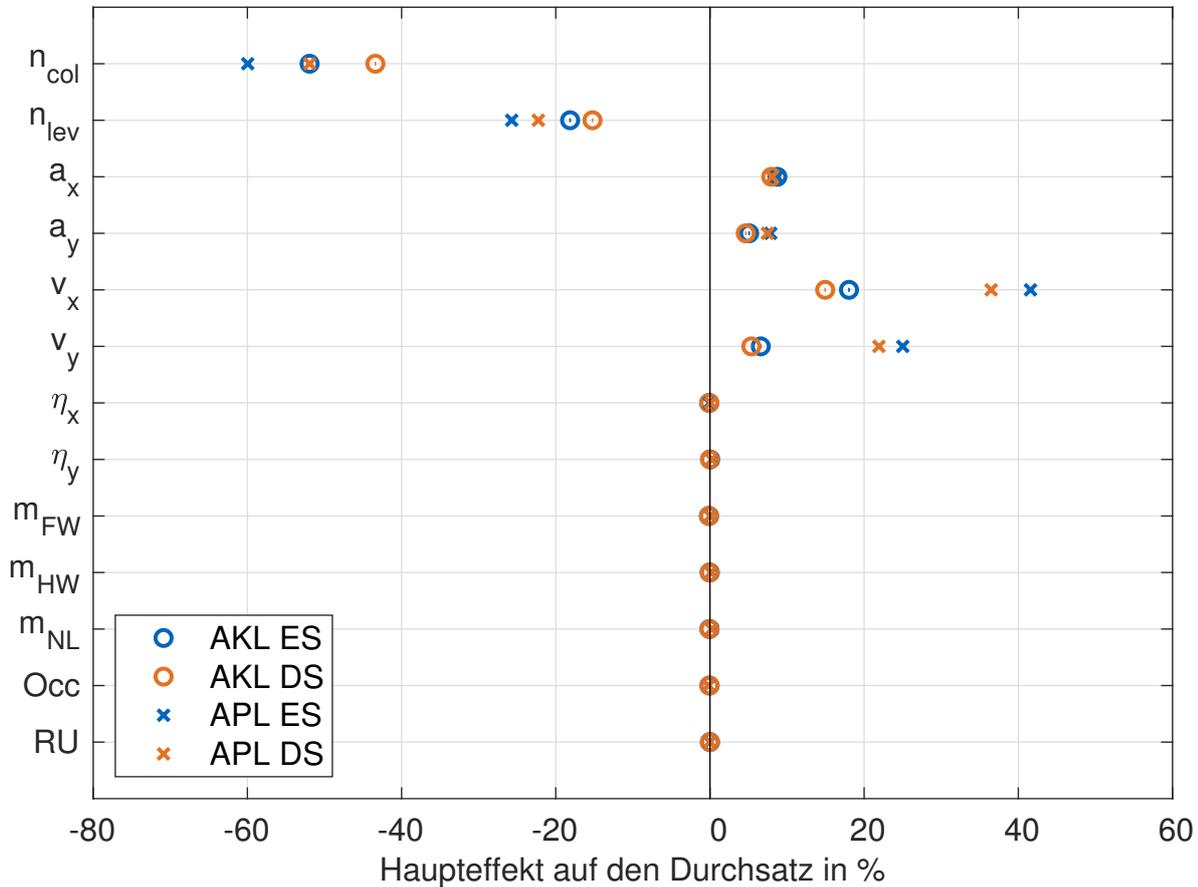


Abbildung 6-7: Haupteffekte der Basisparameter und des Einsatzes einer Rückspeiseeinheit auf den Durchsatz

Die Werte aus Abbildung 6-7 sind in den Tabellen in Anhang E.3 zu finden.

Verläufe der Effekte auf den Durchsatz Die Adjusted response²⁸ bildet den Verlauf eines einzelnen Haupteffekts ab. Dabei wird für den Effekt eines Prädiktors eine Funktion zwischen Prädiktor und Zielvariable abgebildet. Man erhält damit einen Verlauf eines relativen Haupteffekts über die absolute Änderung des Prädiktors. Bei einem rein linearen Zusammenhang durchläuft die Funktion den Mittelwert der x-Achse bei einem Wert von 1,0 auf der y-Achse. Die Differenz der Extremwerte auf der y-Achse entspricht dem relativen Haupteffekt. Nachfolgend werden nur die Verläufe für

²⁶ 2 m/s² bis 5 m/s²

²⁷ 0,5 m/s² bis 1,5 m/s²

²⁸ Siehe auch: <https://de.mathworks.com/help/stats/linearmodel.plotadjustedresponse.html>, abgerufen am 18.10.2021

den Doppelspielbetrieb dargestellt. Die in Abschnitt E.4 dargestellten Verläufe für den Einzelspielbetrieb sind sehr ähnlich und unterscheiden sich nur in ihren Extremwerten geringfügig.

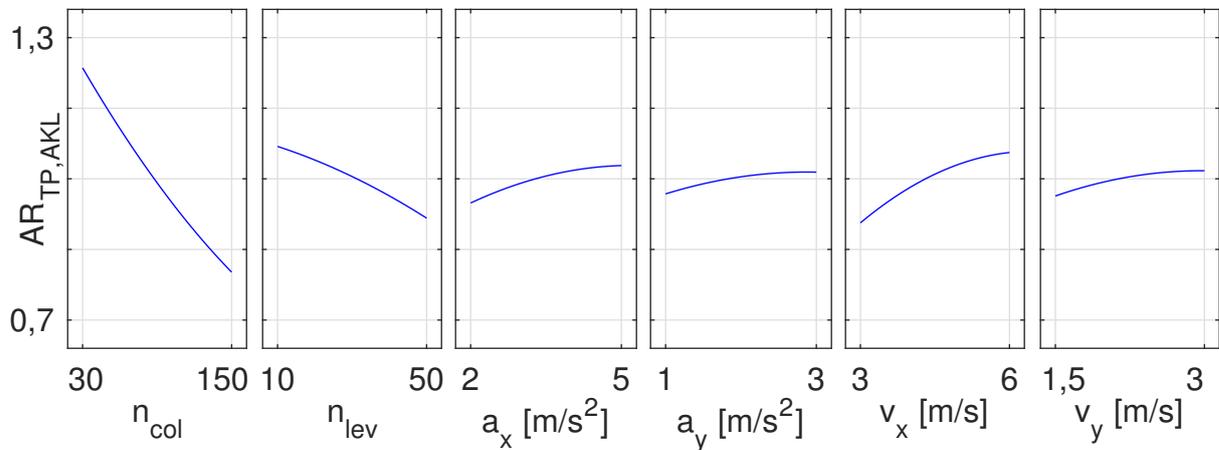


Abbildung 6-8: Adjusted response des Durchsatzes der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb

In den Abbildungen 6-8 und 6-9 sind die AKL und APL Verläufe für die einflussgebenden Parameter im Doppelspielbetrieb dargestellt. Mit diesen Verläufen kann abgeschätzt werden, ob ein Einfluss eher linear oder eher quadratisch verläuft. Grundsätzlich unterscheiden sich die Verläufe für den AKL und APL Bereich, mit Ausnahme der Geschwindigkeiten, nicht sehr stark.

Die Abmessungen gehen hauptsächlich linear in die Spielzeitberechnung ein und je größer ein Lager, desto niedriger der Durchsatz. Für die Abmessungen sind die Kurven von n_{col} daher stark abfallend und haben einen hohen linearen Anteil. Die entsprechenden Kurven für n_{lev} fallen deutlich schwächer ab.

Grundsätzlich haben sowohl die Beschleunigungen a_x, a_y als auch die Geschwindigkeiten v_x, v_y im AKL Bereich ähnliche Verläufe mit unterschiedlichen Absolutwerten. Die kinematischen Parameter haben alle einen positiven Effekt auf den Durchsatz, der sich zu höheren Werten hin abschwächt. Der Zusammenhang ist für APLs grundsätzlich ähnlich, allerdings ergibt sich hier eine wichtige Änderung. Die Geschwindigkeiten v_x und v_y scheinen im APL Bereich ab einer gewissen Grenze wieder einen leicht negativen Einfluss zu haben. Tatsächlich ist der Verlauf bei APLs ähnlich zu dem bei AKLs. Also eine asymptotische Annäherung auf einen bestimmten Wert hin. Dieser Effekt hat mehrere Ursachen. Ab einer gewissen Fahrgeschwindigkeit nimmt die Durchsatzerhöhung immer weiter ab, da die benötigte Zeit für die Ein- und Auslagervorgänge eines Spiels konstant bleibt. Die höchsten Durchsätze werden gleichzeitig tendenziell in den kleinsten Lagern erreicht. In diesen Lagern ist aber der Effekt der Erhöhung der Geschwindigkeit auf TP_{APL} klein, da häufig die maximale Geschwindigkeit nicht erreicht wird. Das wirkt sich besonders bei APLs mit niedrigen Beschleunigungen aus.

Für den Verlauf der Kurve kommt ein weiteres Problem hinzu. Ein Regressionsmodell mit quadratischer Kurve kann diesen asymptotischen Verlauf nicht abbilden. Ein

Modell höherer Ordnung konnte den Verlauf an dieser Stelle nicht besser abbilden. Der reale Verlauf könnte durch eine Exponentialfunktion abgebildet werden. Durch die Stauchung der Kurve in der Darstellung mit einer x-Achse, die deutlich kürzer als die y-Achse ist, wirkt der Abfall auch optisch stärker, als er tatsächlich ist.

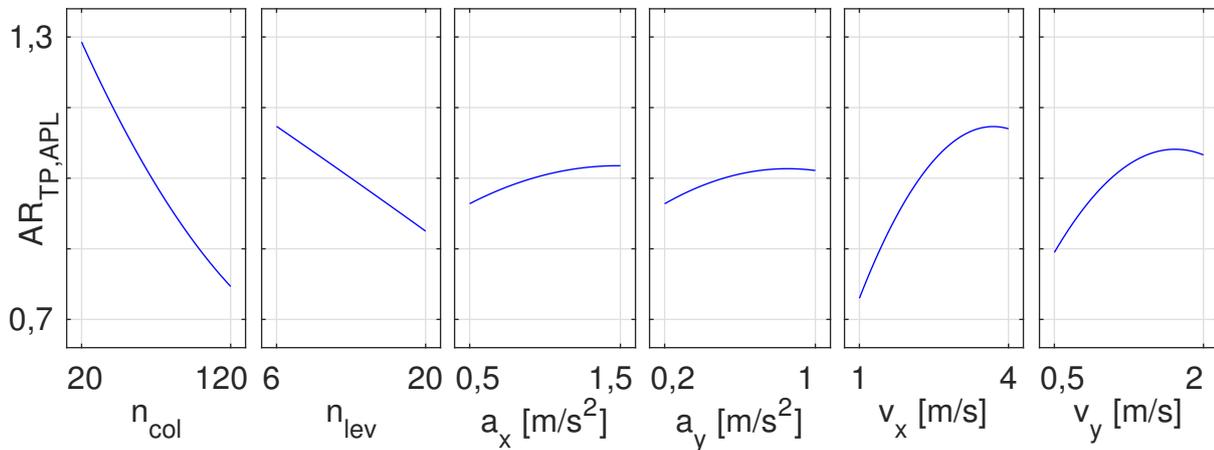


Abbildung 6-9: Adjusted response des Durchsatzes der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb

Energiebedarf In Abbildung 6-10 sind die relativen Haupteffekte für den Energiebedarf dargestellt. Ergänzend sind in Abbildung E-2 im Anhang die absoluten Haupteffekte auf den Energiebedarf abgebildet. In dieser Abbildung ist auch ersichtlich, dass die absoluten Effekte im Doppelspielbetrieb für alle Parameter größer sind als im Einzelspielbetrieb.

Mit steigenden Lagerabmessungen erhöht sich auch $E_{AKL/APL} \cdot n_{col}$ hat im AKL und APL Bereich einen ähnlichen Haupteffekt von ca. 30%. n_{lev} hat im Bereich der APLs einen deutlich größeren Effekt. Auch hier zeigt sich der große Einfluss der potenziellen Energie, die bei Hubvorgängen aufgewendet werden muss und E_{APL} deutlich erhöht. Auch unter Verwendung eines Zwischenkreises und einer Rückspeiseeinheit ist dieser Effekt sehr deutlich, da sich die Widerstände und Verluste in Summe stark auswirken. Gleichzeitig konnte in den Messungen belegt werden, dass der Wirkungsgrad einer Rückspeiseeinheit nur mit ca. 80% angenommen werden kann.

Für n_{lev} kommt noch ein wichtiger Effekt hinzu. Die Gesamtmasse des RBGs nimmt aufgrund der längenbezogenen Masse des Masts linear mit der Lagerhöhe zu. Die längenbezogene Masse des Masts wird im Parameter n_{lev} abgebildet. Das Regressionsmodell kann nur mit unabhängigen Variablen arbeiten und der Einfluss kann deswegen nicht als einzelner Effekt dargestellt werden. Das führt dazu, dass die Haupteffekte von n_{lev} groß sind.

Interessant ist an dieser Stelle, dass sowohl a_y als auch v_y einen geringen negativen Haupteffekt haben. Dieser Zusammenhang rührt daher, dass die Fahrzeit und damit

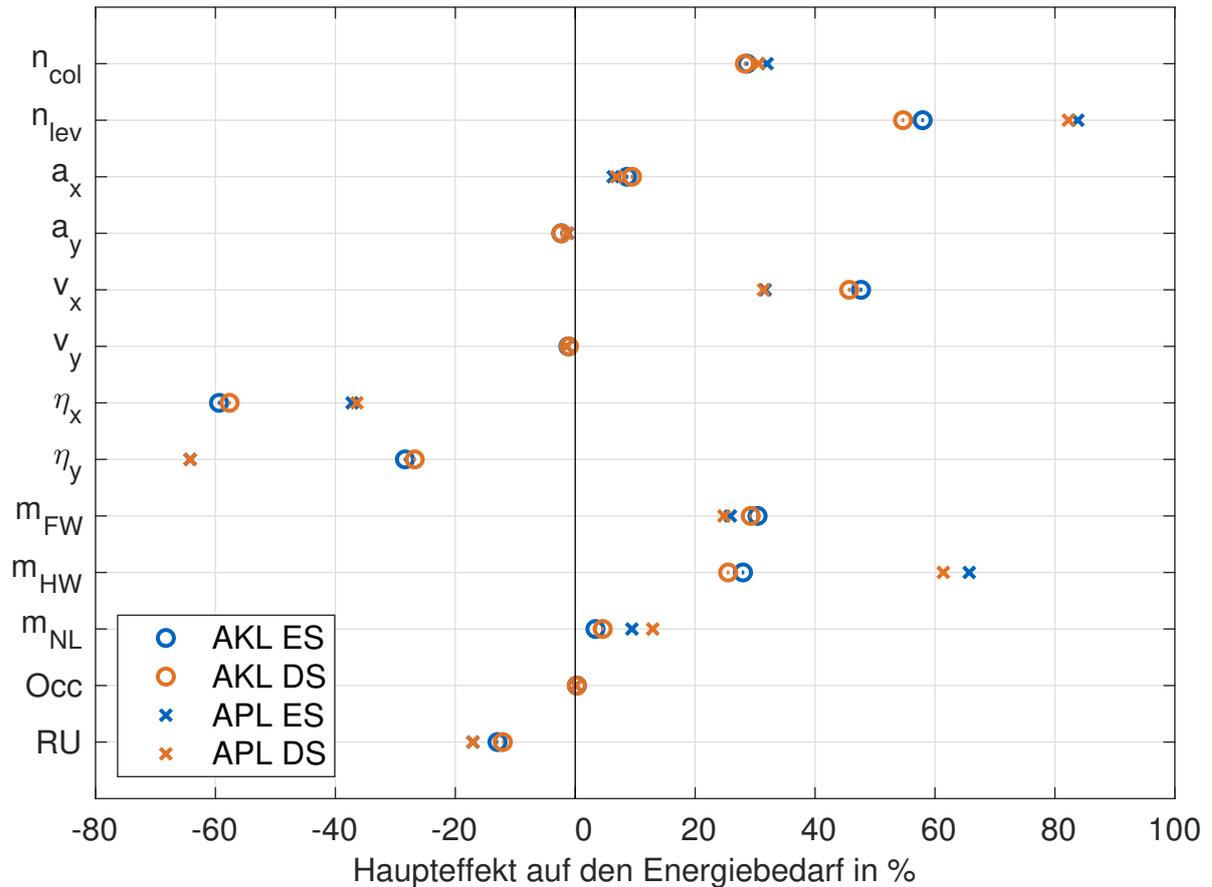


Abbildung 6-10: Haupteffekte der Basisparameter und des Einsatzes einer Rückspeiseeinheit auf den Energiebedarf

der Beitrag der Grundlast zum $E_{AKL/APL}$ bei steigender a_y und v_y sinken. Dieser Zusammenhang ist relativ schwach und hauptsächlich quadratisch und wird daher von der Pearson Korrelation nicht abgebildet. Dass a_y und v_y ohne Berücksichtigung der Grundlast keinen wesentlichen Beitrag zum Energiebedarf liefern, konnte bereits in Messungen gezeigt werden. In x-Richtung erhöhen sowohl die Beschleunigung a_x als auch die Geschwindigkeit v_x den $E_{AKL/APL}$. Nachdem die absoluten Werte von v_x im AKL Bereich höher sind und die kinetische Energie mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt, ist der relative Haupteffekt größer als im APL Bereich.

Für die Wirkungsgrade zeigt sich im AKL Bereich ein höherer Einfluss von η_x im Vergleich zum APL Bereich, wo η_y den größeren Einfluss hat. Das Verhältnis von maximaler Lagerhöhe zu maximaler Lagerlänge liegt bei AKLs und APLs bei ca. 0,3. Das Verhältnis aus maximaler Lagerhöhe und v_y ist aber im APL Bereich größer. Damit treten im Schnitt längere Fahrzeiten in y-Richtung bei APLs auf. Die Umkehr der Wichtigkeit der Einflüsse zwischen AKL und APL Bereich zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gerätetypen.

m_{FW} weist im AKL Bereich etwas größere Effekte als im APL Bereich auf. Grundsätzlich sind die Einflüsse aber ähnlich und liegen bei ca. 25%. Bei m_{HW} überwiegt der

Einfluss im APL Bereich deutlich. Das liegt am großen Anteil an potenzieller Energie, die für den Hub aufgewendet werden muss. Der relative Einfluss ist im APL Bereich, im Vergleich zur Änderung am Energiebedarf der Fahrbewegung durch die zunehmende Fahrgeschwindigkeit, deutlich größer.

Der Einsatz einer Rückspeiseeinheit sorgt für eine Reduktion des mittleren Energiebedarfs von ungefähr 15 %. Dieser Wert erscheint erst einmal gering. Die Erfahrung aus den Messungen zeigt aber, dass der Anteil an zurückgewonnener Energie geringer ist, als es die hohen Wirkungsgradangaben mancher Rückspeiseeinheiten erwarten lassen. Dafür sorgen hauptsächlich die verschiedenen Wirkungsgrade, die bei der Rückgewinnung alle nacheinander berücksichtigt werden müssen. Nachdem auch Geräte mit niedrigen Antriebswirkungsgraden²⁹ berücksichtigt werden, ist die durchschnittliche Reduktion von $E_{AKL/APL}$ relativ gering. Ein weiterer Grund für den geringeren Einfluss ist der steigende Grundlastbedarf, der durch den Einsatz einer Rückspeiseeinheit entsteht (vgl. [Ert-2016a, S. B-2]). Abschließend wird ein Teil der Bremsenergie bereits durch den Zwischenkreis genutzt. Die Rückspeiseeinheit sorgt nur dafür, dass ein zusätzlicher Anteil genutzt werden kann. Die Kombination aus diesen Faktoren führt im Mittel zu einer geringen Reduktion von $E_{AKL/APL}$. Das bedeutet aber nicht, dass eine Rückspeiseeinheit in vielen Konfigurationen nicht auch deutlich höhere Einsparungen erreichen kann. Der relative Effekt ist im APL Bereich größer, da durch die höheren bewegten Massen und die langsameren Geschwindigkeiten die Energie im Schnitt besser genutzt werden kann. Zum Vergleich: Ertl errechnet in seiner Arbeit im AKL Bereich eine mögliche Reduktion des Energiebedarfs pro Ladeinheit von 22,8 % [Ert-2016a, S. 114]. Dabei werden Konfigurationen mit einer Rückspeiseeinheit, mit Konfigurationen mit Bremswiderstand und ohne Zwischenkreis verglichen. Durch den fehlenden Zwischenkreis im Vergleich ist die von Ertl errechnete Einsparung etwas größer als die hier bestimmte. Für den Einsatz eines Zwischenkreises allein berechnet Ertl eine Einsparung von 11,9 %.

Verläufe der Effekte auf den Energiebedarf In den nachfolgenden Abbildungen 6-11 und 6-12 sind die Adjusted response Plots der obigen Haupteffekte des Doppelspielbetriebs dargestellt. Die Verläufe des Einzelspielbetriebs sind in Abschnitt E.4 dargestellt.

Die Verläufe der Effekte für n_{col} und n_{lev} sind jeweils bei AKLs und APLs ähnlich. Für n_{col} ergibt sich ein ansteigender Verlauf, mit einer tendenziellen Abflachung zu hohen Werten hin. Der mittlere Energiebedarf steigt aufgrund des kleineren Anteils von Beschleunigungsphasen, im Vergleich zu Phasen mit konstanter Fahrgeschwindigkeit, mit zunehmender Lagerlänge nicht mehr so stark an. Aufgrund der linearen Anstiege der

²⁹bis $\eta_x \geq 0,4$ und $\eta_y \geq 0,4$

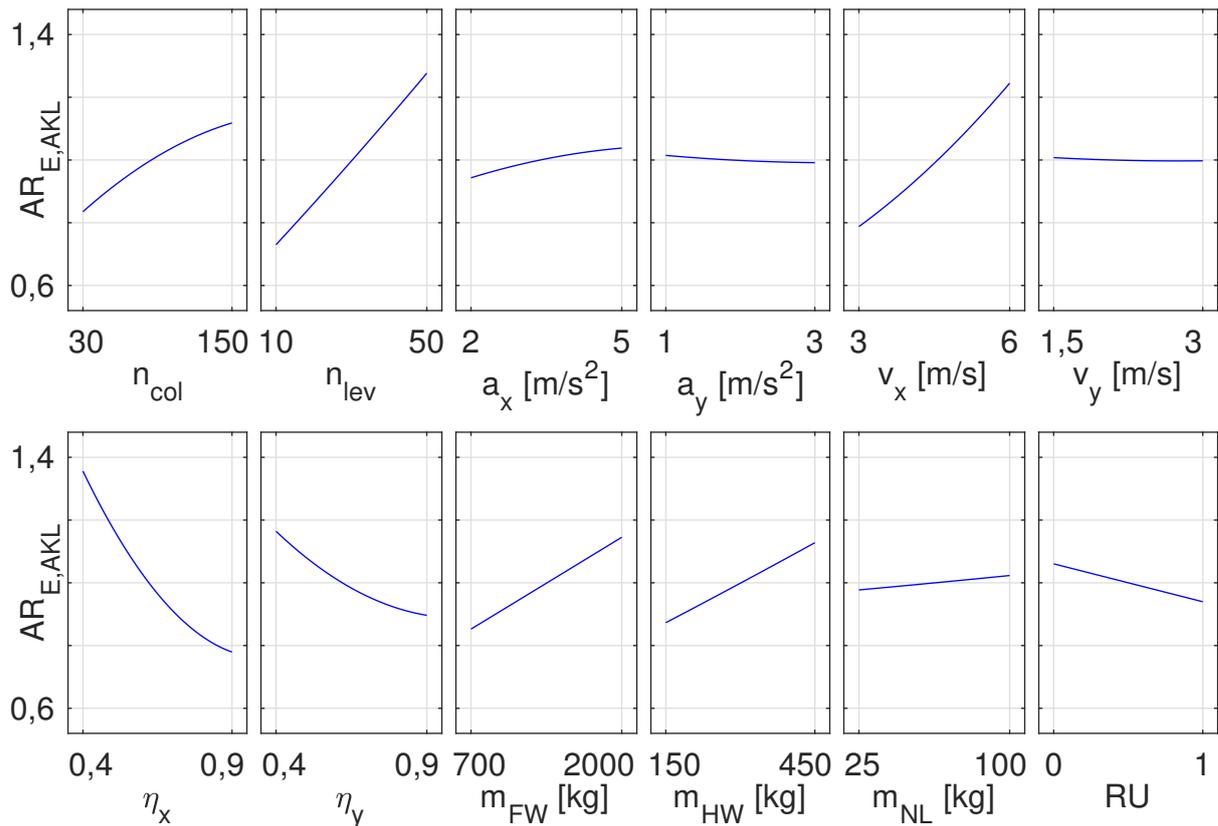


Abbildung 6-11: Adjusted response des Energiebedarfs der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb

potenziellen Energie und der Gesamtmasse mit zunehmendem n_{lev} steigt $E_{AKL/APL}$ linear mit zunehmender Lagerhöhe.

Die jeweiligen Verläufe der Effekte für die Beschleunigungen a_x und a_y und die Geschwindigkeiten v_x und v_y sind bei AKLs und APLs ähnlich. Der Effekt auf $E_{AKL/APL}$ von a_x nimmt zu höheren Werten hin ab. Der Einfluss der Beschleunigung auf den Energiebedarf wird durch die Grundlast kompensiert. Durch die abnehmende Fahrzeit sinkt der Energiebedarf wegen des geringeren Energiebedarfs der Grundlast ab. Der Einfluss von v_x weist einen quadratisch ansteigenden Verlauf auf. Der Verlauf lässt sich mit dem quadratischen Einfluss der Geschwindigkeit auf die kinetische Energie, die zum Beschleunigen des RBGs nötig ist, begründen. Geschwindigkeit und Beschleunigung in y-Richtung haben nur einen sehr geringen Einfluss, der oben bereits beschrieben wird.

Die Wirkungsgrade η_x und η_y haben im AKL und APL Bereich quadratisch abfallende Verläufe. Die Einflüsse der Wirkungsgrade haben quadratische Anteile, da sie einerseits den Energiebedarf zur Beschleunigung und andererseits die elektrisch nutzbare Bremsenergie beeinflussen. Ein Teil der Energie in der Bilanzierung des Energiebedarfs ist damit quadratisch mit den Wirkungsgraden verknüpft. Die Umkehr der Relevanz von x- und y-Richtung zwischen AKLs und APLs ist oben bereits beschrieben worden.

Die Massen m_{FW} , m_{HW} und m_{NL} haben alle einen relativ linearen Einfluss auf den Energiebedarf. Auch in den Verläufen ist der oben beschriebene hohe relative Einfluss von m_{HW} deutlich erkennbar.

Für den Einsatz der Rückspeiseeinheit ergibt sich ein linearer Verlauf. Dieser entsteht durch die Verbindung der beiden diskreten Punkte.

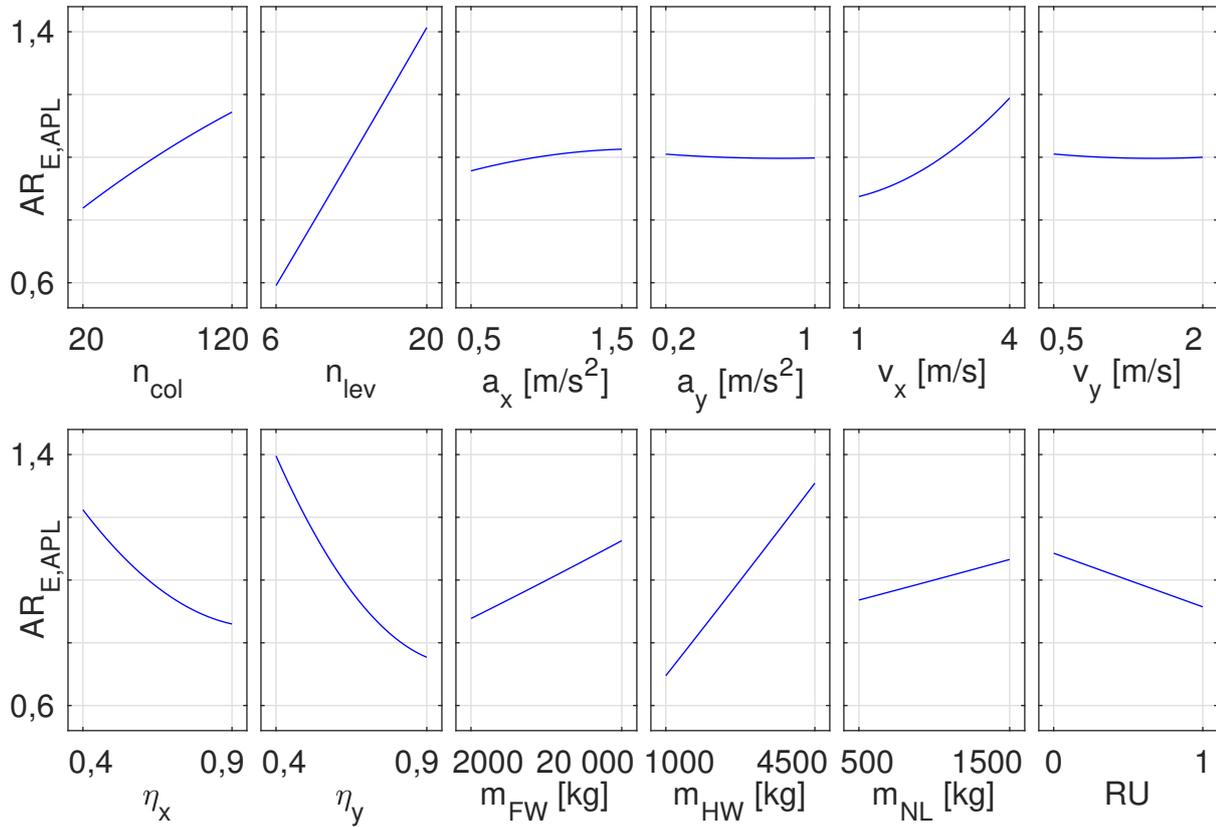


Abbildung 6-12: Adjusted response des Energiebedarfs der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb

6.1.4 Einfluss des Regalwandfaktors

Um RBGs grob zu charakterisieren, kann der Regalwandfaktor RWF nach [FEM-9851] verwendet werden. Um bei der Auslegung von RBGs als Richtwert zu dienen, wird der Einfluss des Regalwandfaktors hier und in Abschnitt 7.1.4 näher untersucht. Der Regalwandfaktor setzt die maximalen Fahrzeiten in x-Richtung t_x und in y-Richtung t_y ins Verhältnis. Dabei werden in Gleichung 6-2 nach [FEM-9851] der maximale Fahrweg in x-Richtung L und der maximale Fahrweg in y-Richtung H (siehe Abbildung 7-14) mit den Geschwindigkeiten v_x und v_y ins Verhältnis gesetzt. Bei einem Regalwandfaktor von $RWF = 1$ benötigt das RBG für eine Fahrt über die komplette Lagerlänge die gleiche Zeit wie für einen Hub über die komplette Lagerhöhe [Fot-2018, S. 39].

$$RWF = \frac{t_y(y = H)}{t_x(x = L)} = \frac{H}{L} \cdot \frac{v_x}{v_y} \quad (6-2)$$

Nachdem die Vereinfachung in Gleichung 6-2 keine Beschleunigung und keine Verzögerung berücksichtigt, ist sie für einen Vergleich der untersuchten Geräte nicht geeignet. Nachfolgend wird nur noch von der Beschleunigung gesprochen, es sind aber immer Beschleunigung und Verzögerung gemeint. Die beiden Vorgänge benötigen die gleiche Zeitdauer und das RBG legt dabei die gleiche Strecke zurück. Die Beschleunigung spielt, gerade bei niedrigen Werten, für die Fahrzeit eine erhebliche Rolle. Theoretisch können zwei Geräte, die auf Basis der Regalabmessungen und ihrer Geschwindigkeiten einen ähnlichen Wert des Regalwandfaktors aufweisen, aufgrund unterschiedlicher Beschleunigungen deutliche Abweichungen bei den Fahrzeiten haben. Deswegen wird die Definition des Regalwandfaktors für die im Simulationsmodell verwendete 3-Phasen Bewegung erweitert. Auf Basis der Fahrzeiten kann exemplarisch für t_x die Beschleunigung nach Gleichung 6-3 berücksichtigt werden. Dabei setzt sich die Fahrzeit t_x aus der Fahrzeit mit konstanter Geschwindigkeit t_K und der Beschleunigungszeit t_B zusammen. Diese lässt sich aus L , dem Weg für die Beschleunigung s_B , der Geschwindigkeit v_x und der Beschleunigung a_x berechnen.

$$t_x = t_K + 2 \cdot t_B = \frac{L - 2 \cdot s_B}{v_x} + 2 \cdot \frac{v_x}{a_x} \quad (6-3)$$

Mit der Definition von s_B nach Gleichung 6-4 kann dann in Gleichung 6-5 t_x allein über L , v_x und a_x ausgedrückt werden.

$$s_B = \frac{a_x \cdot t_B^2}{2} = \frac{v_x^2 / a_x}{2} \quad (6-4)$$

$$t_x = \frac{L - v_x^2/a_x}{v_x} + 2 \cdot \frac{v_x}{a_x} = \frac{L \cdot a_x - v_x^2}{v_x \cdot a_x} + 2 \cdot \frac{v_x^2}{v_x \cdot a_x} = \frac{L \cdot a_x + v_x^2}{v_x \cdot a_x} \quad (6-5)$$

Ersetzt man die Variablen aus der Definition für t_x analog für t_y ergibt sich die Definition des Regalwandfaktors unter Berücksichtigung der Beschleunigung nach Gleichung 6-6.

$$RWF = \frac{t_y}{t_x} = \frac{H \cdot a_y + v_y^2}{L \cdot a_x + v_x^2} \cdot \frac{v_x \cdot a_x}{v_y \cdot a_y} \quad (6-6)$$

Mit dieser Definition können Geräte in Abhängigkeit von ihrem Regalwandfaktors betrachtet werden. Lager mit Werten $RWF < 1,0$ sind eher zeitlich lange Lager, die hauptsächlich fahrzeitkritische Regalfächer haben. Wohingegen Lager mit $RWF > 1,0$ eher zeitlich kurze Lager sind, die hauptsächlich hubzeitkritische Lagerfächer haben. Fahrzeitkritisches Regalfach bedeutet, dass die Zeit für die Bewegung zu diesem Fach in y-Richtung kürzer als die für die Bewegung in x-Richtung ist. Damit ist die Fahrzeit t_x gleich der gesamten Dauer der Fachanfahrt. Analog gibt es den Begriff hubzeitkritisch für den umgekehrten Fall. Zur Veranschaulichung werden die Konfigurationen jeweils in Diagrammen mit dem Regalwandfaktor auf der x-Achse und $TP_{AKL/APL}$ oder $E_{AKL/APL}$ auf der y-Achse dargestellt. Die Werte auf der y-Achse werden jeweils mit ihrem Mittelwert normiert. Somit werden die normierten Durchsatzwerte $TP_{AKL, Norm}$ und $TP_{APL, Norm}$ und die normierten Energiebedarfswerte $E_{AKL, Norm}$ und $E_{APL, Norm}$ dargestellt. Zusätzlich werden die Werte auf der y-Achse jeweils über ein kleines Intervall der x-Achse gemittelt und als Linie dargestellt. Damit lässt sich ungefähr abschätzen, ob sich optimale Konfigurationen bei bestimmten RWF Werten ergeben. Für die Auswertung werden die Werte für Einzel- und Doppelspielbetrieb zusammengefasst. Die Diagramme sind im AKL Bereich bei $RWF = 2,5$ und im APL Bereich bei $RWF = 4,0$ abgeschnitten. Die Wertebereiche laufen eigentlich bis ca. $RWF = 3,0$ bzw. $RWF = 6,5$. Allerdings sind dort nur noch wenige Konfigurationen angesiedelt und diese für die Betrachtungen nicht relevant.

Durchsatz Zunächst werden die Verläufe des Durchsatzes über den RWF betrachtet. Dabei kann grundsätzlich festgestellt werden, dass die Aussagekraft des dargestellten Mittelwerts, zu höheren Werten von RWF hin, abnimmt. Im AKL Bereich ab ca. $RWF > 2,0$ und bei APL ab ca. $RWF > 2,5$. Die Diagramme sind so zugeschnitten, dass die Wertebereiche auf der y-Achse gleich groß sind und damit der Vergleich zwischen AKLs und APLs leicht möglich ist. In Abbildung 6-13 sind die AKL Konfigurationen abgebildet. Bis zu einem Wert von $RWF = 1,0$ steigt der mittlere Durchsatz an. Im RWF Bereich von ca. 1,0 bis 2,0 ist der mittlere Durchsatz relativ konstant und

nimmt zu höheren RWF Werten hin langsam wieder ab. Allerdings wird die Aussagekraft für größere Werte des RWF aufgrund der geringen Anzahl an Konfigurationen kleiner. Es wird vermutet, dass der Mittelwert ab $RWF = 2,0$ tendenziell wieder abnimmt. Das kann anhand der Daten aber nicht belegt werden.

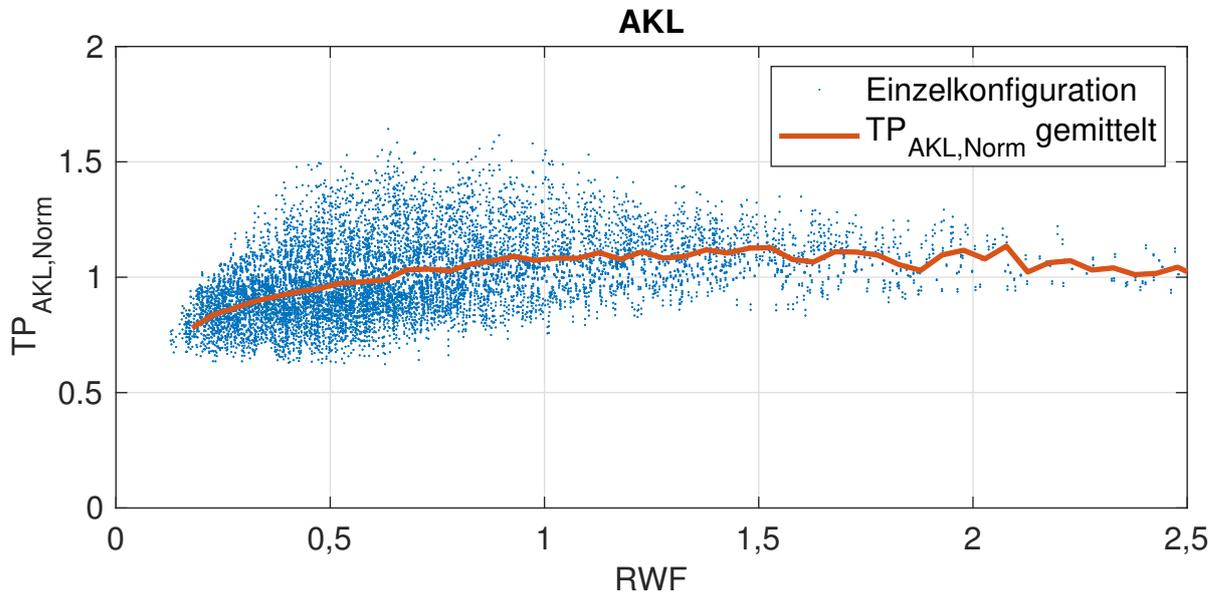


Abbildung 6-13: Ergebnisraum der AKL Konfigurationen mit normiertem Durchsatz und gemittelten Durchsatzwerten aufgetragen über dem Regalwandfaktor

Im APL Bereich, der in Abbildung 6-14 dargestellt ist, stellt sich nach einem deutlichen Anstieg bis ca. $RWF = 1,0$, ein Maximum des Mittelwerts bei RWF Werten von ca. 1,0 bis 1,5 ein.

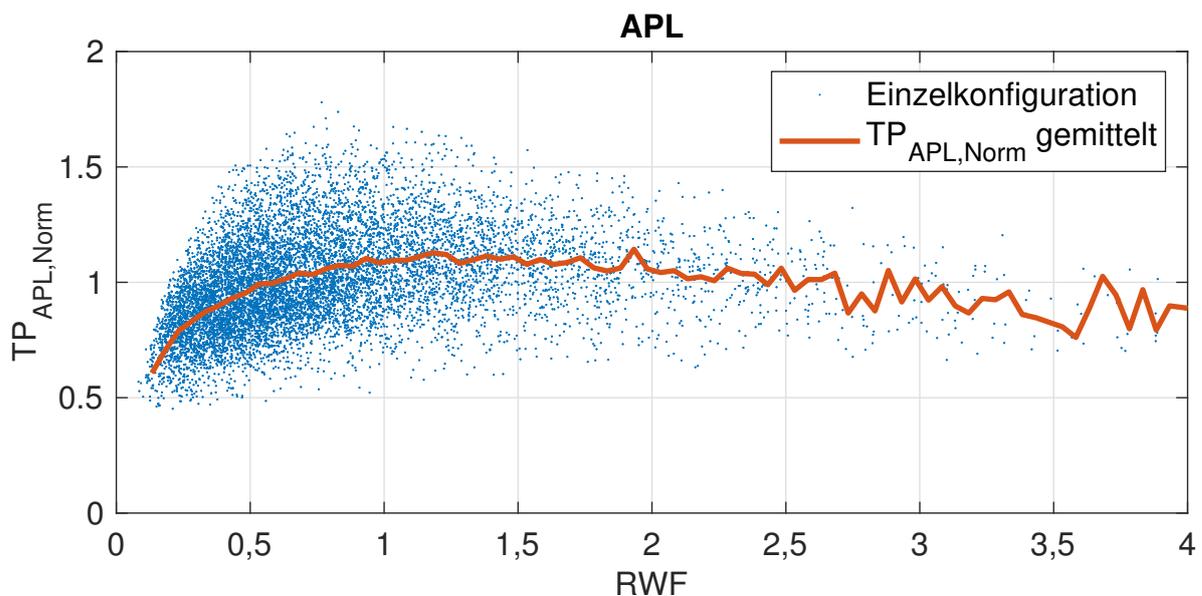


Abbildung 6-14: Ergebnisraum der APL Konfigurationen mit normiertem Durchsatz und gemittelten Durchsatzwerten aufgetragen über dem Regalwandfaktor

Der Durchsatz fällt zu größeren RWF Werten hin wieder leicht ab. Ab $RWF = 2,5$ sind

bereits deutliche Schwankungen im Mittelwert vorhanden. Es wird vermutet, dass der Mittelwert ab $RWF = 2,5$ auch hier tendenziell wieder abnimmt. Das kann anhand der Daten aber nicht belegt werden.

Energiebedarf Die nächsten Abbildungen zeigen die Verläufe von RWF im Energiebedarf. Die x-Achsen sind analog zu den Darstellungen des Durchsatzes skaliert. Die y-Achsen stellen einen Wertebereich von 0,0 bis 3,0 dar. Damit lassen sich die AKL und APL Ergebnisse gut gegenüberstellen. Zunächst ist in Abbildung 6-15 der AKL Ergebnisraum mit Mittelwert dargestellt. Dabei ergibt sich ein Verlauf der bis zu einem $RWF = 1,0$ leicht ansteigt und dann in etwa einen konstanten Wert hält. An dieser Stelle wird deutlich, dass das Feld von E_{AKL} deutlich stärker verteilt ist als das von TP_{AKL} . Neben einem zentralen Feld zeigen sich viele Ausreißer im Energiebedarf nach oben.

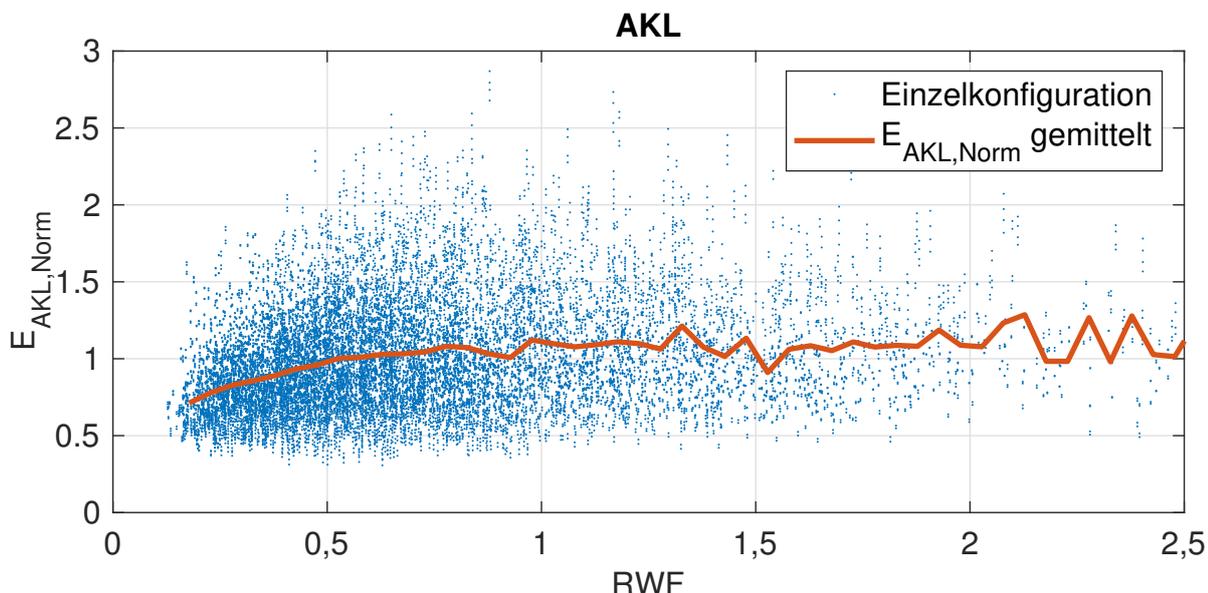


Abbildung 6-15: Ergebnisraum der AKL Konfigurationen mit normiertem Energiebedarf und gemittelten Energiebedarfswerten aufgetragen über dem Regalwandfaktor

In Abbildung 6-16 wird abschließend der Verlauf durch den Ergebnisraum von E_{APL} gezeigt. Nach einem anfänglich stärkeren Anstieg bis zu einem $RWF = 1,0$ steigt E_{APL} bis $RWF = 2,0$ weiter leicht an. Für Werte $RWF > 2,0$ ist der Mittelwert aber nicht mehr gut interpretierbar.

6.2 Ergebnisse der Studie 2 – Erweiterte Parameter

Abschließend werden die Ergebnisse der Simulationsstudie 2 an dieser Stelle beleuchtet. Dabei werden zunächst die Ergebnisräume noch einmal mit Studie 1 verglichen

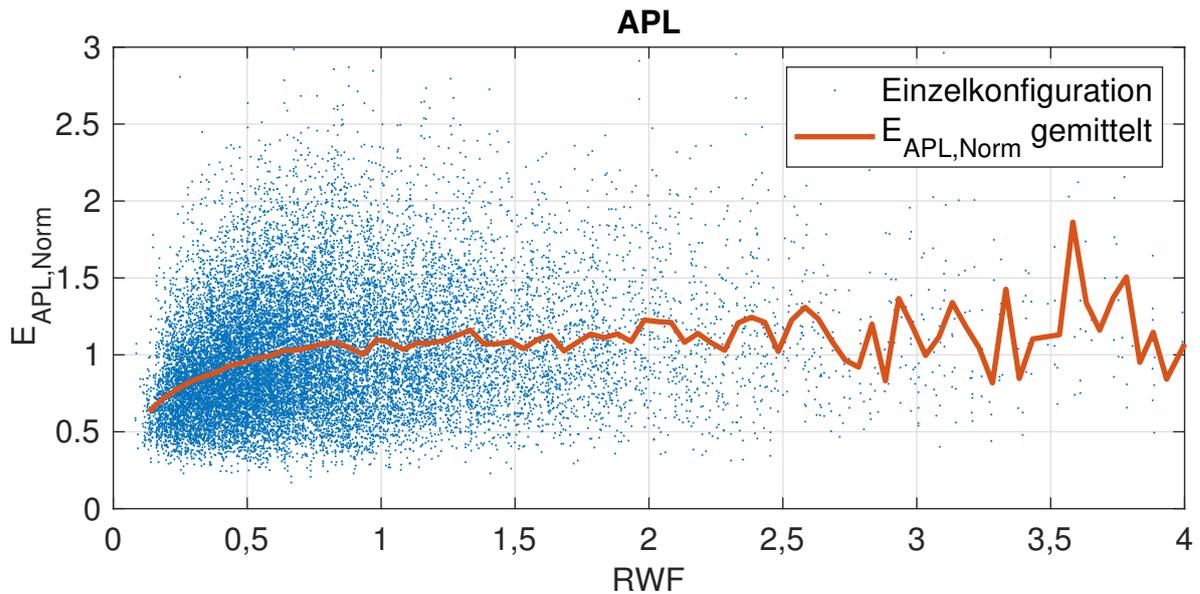


Abbildung 6-16: Ergebnisraum der APL Konfigurationen mit normiertem Energiebedarf und gemittelten Energiebedarfswerten aufgetragen über dem Regalwandfaktor

und anschließend die Haupteffekte der neu hinzugekommenen Parameter eingeordnet und beschrieben. Damit wird insbesondere begründet, wieso in Studie 1 und für die Bewertung der EE nur die verwendeten Parameter betrachtet werden.

6.2.1 Ergebnisraum

In den nachfolgenden Darstellungen werden die Ergebnisräume von Studie 1 und Studie 2 miteinander verglichen. In Abbildung 6-17 wird der Vergleich für AKLs und in Abbildung 6-18 der für APLs dargestellt. Die Studie 1 wird durch die blaue Punktwolke und die Studie 2 durch die rote Punktwolke repräsentiert. Trotz der zusätzlichen Variation der Grundlast, des Rückspeisewirkungsgrads und der Reibung in x- und y-Richtung wird kein wesentlich größerer Raum an Geräten betrachtet. An $TP_{AKL/APL}$ ändert sich durch die zusätzliche Variation der Parameter nichts. Die unterschiedlichen Extremwerte von $TP_{AKL/APL}$ ergeben sich nur durch die Parameterauswahl im LHSA. Hauptänderung sind die zusätzlichen Konfigurationen mit geringem $E_{AKL/APL}$. Damit ergeben sich also hauptsächlich zusätzliche Ausreißer nach unten. Verglichen mit der Gesamtzahl an Konfigurationen landen aber nur wenige Konfigurationen in diesem Extrembereich mit sehr niedrigem $E_{AKL/APL}$. Darin sind auch Konfigurationen enthalten deren Grundlast gegen 0,0 W und deren Reibungsterme gegen 0,0 gehen. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass trotz des vergrößerten Variationsbereichs der Parameter der Einfluss auf den Ergebnisraum gering ist.

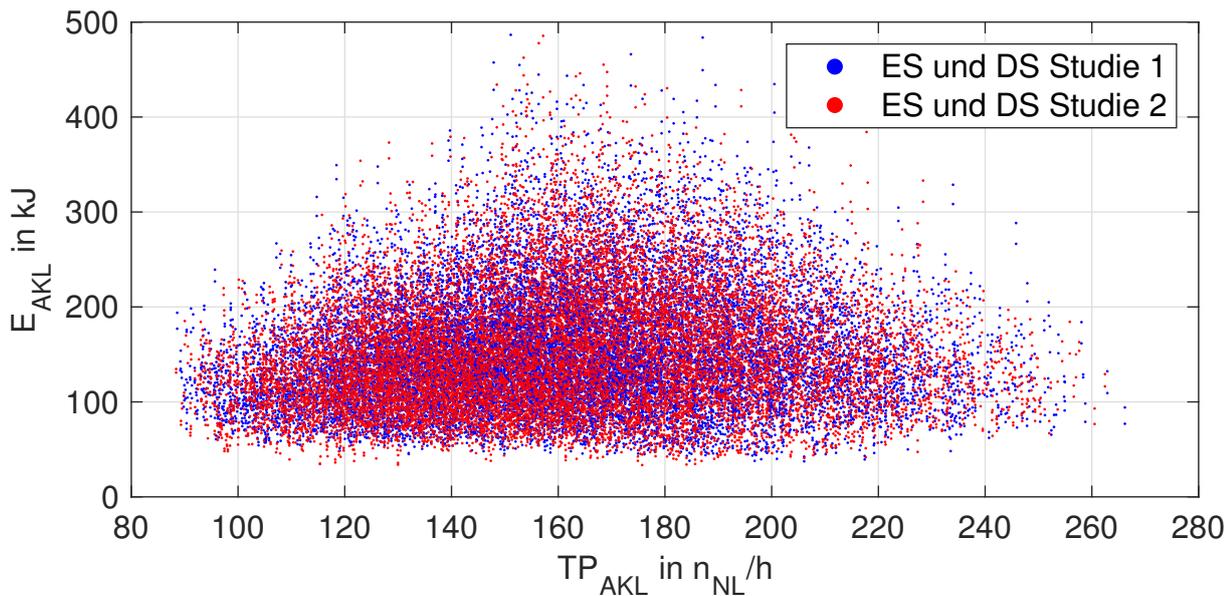


Abbildung 6-17: Ergebnisraum der untersuchten AKL Konfigurationen in Simulationsstudie 1 und 2

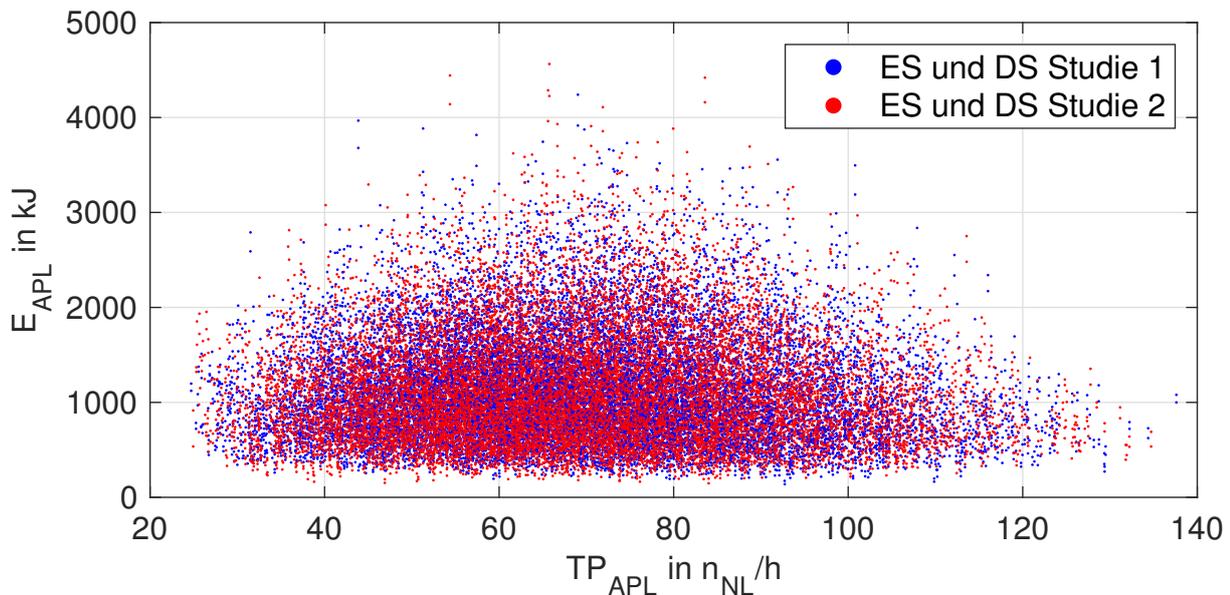


Abbildung 6-18: Ergebnisraum der untersuchten APL Konfigurationen in Simulationsstudie 1 und 2

6.2.2 Haupteffekte

Nachdem die erweiterten Parameter keinen wesentlichen Einfluss auf den Durchsatz haben, werden hier nur die Haupteffekte auf den Energiebedarf vorgestellt. In Abbildung 6-19 sind die R^2 Werte für die zwölf Einzelmodelle in Studie 2 dargestellt. Auch hier zeigen sich durchgängig Werte über 0,95, welche auf eine hohe Güte des Modells hinweisen.

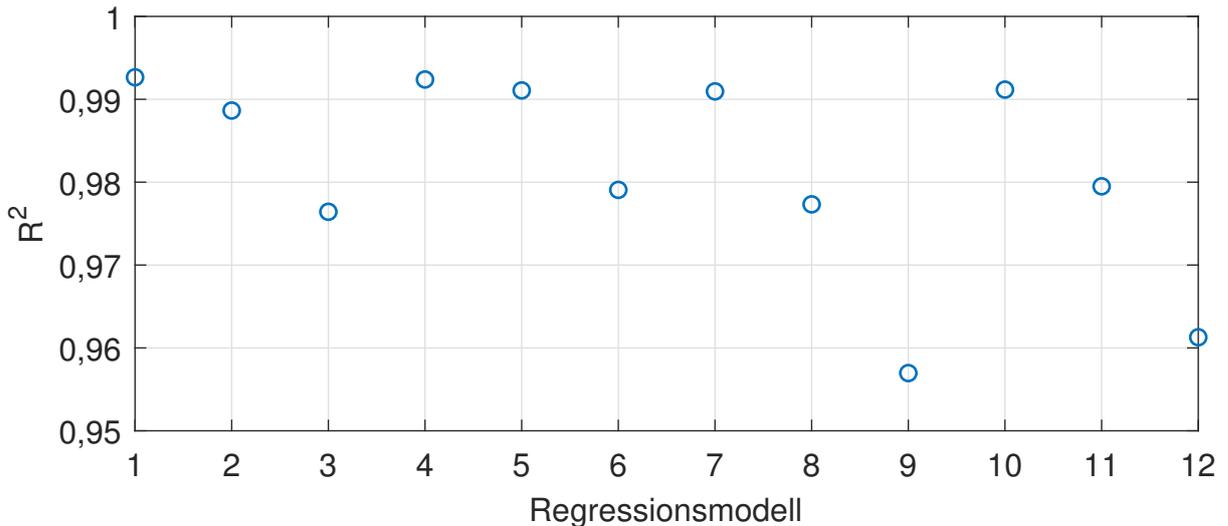


Abbildung 6-19: R^2 Werte der einzelnen Regressionsmodelle der Studie 2

Die Haupteffekte der zusätzlichen Parameter sind in Abbildung 6-20 dargestellt. Um den Vergleich besser herstellen zu können, wird die gleiche Skalierung wie in Abbildung 6-10 verwendet. P_{GL} hat besonders im AKL Bereich einen relativ großen Einfluss. Die Leistung, die zum Betrieb der Steuerung eines RBGs nötig ist, hängt nur wenig von der Größe des Geräts ab. Natürlich sind bei größeren Geräten eventuell mehr periphere Verbraucher mit angeschlossen. In den Messungen hatten aber die Geräte meistens eine ähnliche Grundlast und deswegen wird diese für AKLs und APLs mit 600 W angenommen. Der in den Messungen festgestellte große Einfluss der Grundlast kommt hauptsächlich durch die Stillstandszeiten zustande. Diese sind aber nicht Teil der Simulation, da sie hauptsächlich vom Einsatz des Geräts abhängen. Die Grundlast ist damit zwar für den Betrieb in der Praxis sehr relevant, muss aber für den Parameterraum der Bewertung nicht eigens variiert werden.

η_{RU} hat insgesamt einen geringeren Einfluss. Einerseits ist der Variationsbereich nur klein (von 0,5 bis 1,0), andererseits ist der Effekt des generellen Einsatzes schon in einem eigenen Parameter abgedeckt.

Die beiden Reibungsterme $k_{x,R}$, $k_{y,R}$ unterscheiden sich stark. Die Reibung in x-Richtung hat einen deutlichen Einfluss, wohingegen die Reibung in y-Richtung kaum einen Einfluss hat.

6.3 Fazit der Simulationsergebnisse

Im Rahmen der Simulationsstudien wird eine umfassende Anzahl an Geräten innerhalb des betrachteten Parameterraums untersucht. Mithilfe der Pearson Korrelationen werden erste Zusammenhänge sichtbar gemacht, die dann mit dem Regressionsmo-

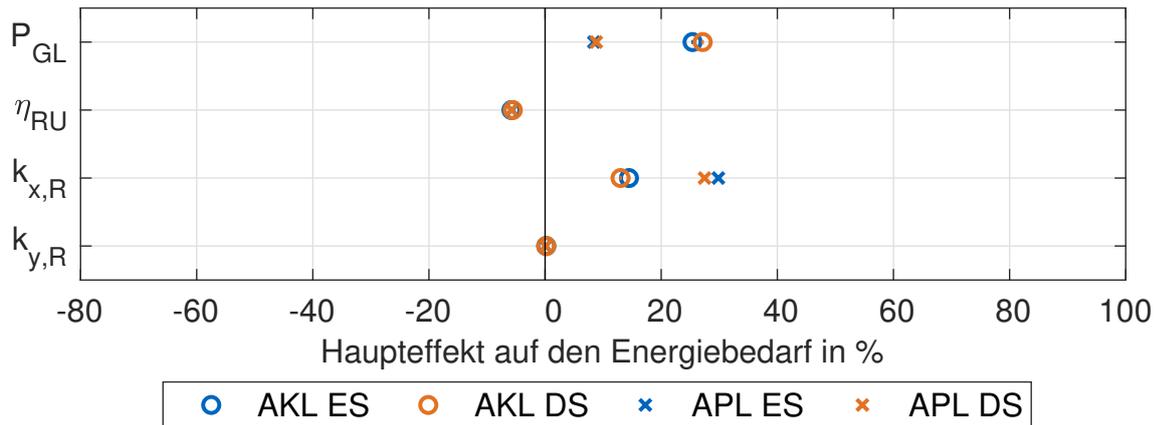


Abbildung 6-20: Haupteffekte der zusätzliche Parameter auf den Energiebedarf

dell näher untersucht werden. Im Rahmen der Untersuchungen werden unter anderem folgende wichtige Zusammenhänge aufgezeigt:

- Masseneinsparungen lohnen sich beim Hubwerk deutlich mehr, da damit der Energiebedarf von Bewegungen in x- und y-Richtung reduziert wird.
- Die Wirkungsgrade in x-Richtung spielen im AKL Bereich eine größere Rolle. Die Wirkungsgrade in y-Richtung sind im APL Bereich relevanter.
- Der Einsatz einer Rückspeiseeinheit führt zu einer Reduktion des mittleren Energiebedarfs.
- Die Geschwindigkeit und Beschleunigung in y-Richtung können erhöht werden, ohne den mittleren Energiebedarf wesentlich zu erhöhen. Durch eine Erhöhung dieser Parameter steigt hauptsächlich der Durchsatz.

Für den RWF können auf Basis der Daten keine klaren Empfehlungen gegeben werden. Tendenziell werden hohe Durchsätze ab ca. $RWF > 0,75$ erreicht. Der mittlere Energiebedarf steigt bis zu einem $RWF = 1,0$ deutlich, danach verlaufen Durchsatz und Energiebedarf auf relativ konstantem Niveau. In Abschnitt 7.1.4 wird der Einfluss des Regalwandfaktors auf die Effizienzkennzahl diskutiert.

Nach der Analyse der Simulationsergebnisse in Bezug auf den Ergebnisraum und die Einflüsse der variierten Parameter wird im folgenden Kapitel 7 die Entwicklung der Bewertung und Klassifizierung vorgestellt. Dabei werden in Abschnitt 7.1 die Simulationsergebnisse der Effizienzkennzahl, analog zu den Beschreibungen in diesem Kapitel, gezeigt.

7 Bewertung und Klassifizierung der Energieeffizienz

In diesem Kapitel werden die ermittelten Daten und Ergebnisse aus den Messungen und den Simulationsstudien zur Entwicklung der Bewertung und Klassifizierung der Geräte verwendet. Die grundlegende Definition und die Entwicklung der Kennzahl sind in [Rüc-2020b] bereits veröffentlicht worden. Im Vergleich zu den veröffentlichten Ergebnissen wird ein größerer Parameterraum verwendet und zusätzlich wird der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Energieeffizienz untersucht. Im Rahmen von Abschnitt 7.1 wird zunächst die entwickelte Effizienzkennzahl samt den zugehörigen Simulationsergebnissen vorgestellt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 7.2 eine Beschreibung der Einteilung der Geräte in Klassen. In Abschnitt 7.3 werden die Ergebnisse zu den Referenzspielen präsentiert, bevor abschließend in Abschnitt 7.4 die praktische Umsetzung einer Bewertung beschrieben wird.

7.1 Effizienzkennzahl

Das Ziel der Verwendung einer Effizienzkennzahl ist die Abbildung des Verhältnisses von Nutzen Θ und Aufwand eines RBGs. Bei RBGs in HRLs kann der Nutzen auf Basis der logistischen Aufgaben definiert werden. Die logistischen Aufgaben eines HRLs mit RBGs sind das Speichern und das Ein- und Auslagern von Gütern (vgl. [Gud-2012b, S. 613] und [Hom-2018, S. 55]). Das Speichern kann grundsätzlich über die Menge an gespeicherten Ladeeinheiten abgebildet werden. Da die Ladeeinheiten unterschiedlich groß sein können, wird nicht die Anzahl an Ladeeinheiten, sondern das effektiv nutzbare Lagervolumen verwendet. Darunter wird das lichte Volumen innerhalb eines Lagers verstanden, in dem Güter eingelagert werden können. Damit ergibt sich ein Unterschied zu Ertl, der die Lagerwandfläche in seiner Definition für den Nutzen verwendet (siehe [Ert-2016a, S. 168]³⁰). Dabei wird nicht berücksichtigt, dass Hersteller, aufgrund geringerer Anfahrmaße oder kleinerer Abstände zwischen den Ladeeinheiten, mehr nutzbares Lagervolumen innerhalb der gleichen Regalwandfläche realisieren können. Das Lagervolumen, das innerhalb eines konkreten Bauraums eines HRLs realisiert werden kann, stellt auch eine Güte für die Umsetzung dar. So haben zum Beispiel geringere Anfahrmaße eines RBGs einen positiven Effekt auf das nutzbare Lagervolumen. Die Aufgabe des Ein- und Auslagerns wird mit dem Durchsatz TP und

³⁰In dieser Arbeit wird für die Effizienzkennzahl eine ähnliche Definition verwendet. Diese ist auch Ausgangsbasis für die hier beschriebene Definition. Allerdings verwendet Ertl für seine Kennzahl K_{EE} das umgekehrte Verhältnis, also Aufwand durch Nutzen.

der mittleren transportierten Masse einer Ladeeinheiten m_{NL} berücksichtigt. Damit wird der von einem RBG realisierte Massenstrom für die Bewertung verwendet.

Demgegenüber steht der Aufwand E_{el} , der für RBGs mit dem elektrischen Energiebedarf berücksichtigt werden kann. Damit lässt sich die Energieeffizienzkennzahl k_{EE} nach Gleichung 7-1 definieren. Die generelle Eignung einer solchen Kennzahl zur Bewertung der EE von RBGs ist von Ertl bereits beschrieben worden [Ert-2016a, S. 171–177].

$$k_{EE} = \frac{\Theta}{E_{el}} \quad (7-1)$$

Der Nutzen Θ wird nach Gleichung 7-2 mit der Anzahl an Ladeeinheiten in einer Gasse n_{NL} und dem Volumen einer Ladeeinheit V_{NL} angegeben. Das Lagervolumen wird mit einem einfachtiefen HRL berechnet. Die Kennzahl soll sich später hauptsächlich zur Klassifizierung von Geräten eignen. Daher würden verschiedene Lagertiefen die Verteilung der Kennzahl verzerren. Es würden für ein RBG mit einem festen Satz an Parametern dann je nach Lagertiefe mehrere unterschiedliche Effizienzkennzahlen existieren. Für die Bewertung von RBGs in doppeltiefen HRLs wird der Durchsatz bei Ein- und Auslagerungen bei Lagertiefe gleich Eins verwendet.

$$\Theta = TP \cdot m_{NL} \cdot n_{NL} \cdot V_{NL} \quad (7-2)$$

Damit lässt sich die Kennzahl mit den bekannten Kennwerten aus Kapitel 6 nach Gleichung 7-3 berechnen. Der Durchsatz ist mit der Anzahl Nutzlasten pro Stunde anzugeben. Der Energiebedarf wird als mittlerer Energiebedarf pro Spiel $E_{AKL/APL}$ berücksichtigt. Um Einzelspiel und Doppelspiel korrekt zu berücksichtigen, wird die Anzahl der bewegten Nutzlasten pro Spiel $n_{NL/Spiel}$ berücksichtigt. Dieser Faktor ist gleich 1 für den Einzelspielbetrieb und gleich 2 für den Doppelspielbetrieb.

$$k_{EE} = \frac{TP_{AKL/APL} \cdot m_{NL} \cdot n_{NL} \cdot V_{NL} \cdot n_{NL/Spiel}}{E_{AKL/APL}} \quad (7-3)$$

Wie in Gleichung 7-4 gezeigt, entspricht die Einheit der Effizienzkennzahl physikalisch gesehen $m \cdot s$. Nachdem diese Einheit aber wenig Aussagekraft besitzt und auch in der Darstellung einen ungünstigen Wertebereich der erreichbaren Effizienzkennzahl erzeugt, wird als Einheit $(kg \cdot m^3)/(J \cdot h)$ verwendet. Diese Einheit hat einen Bezug zu

den einzelnen Parametern der Kennzahl und führt zu einem gut darstellbaren Wertebereich.

$$k_{EE} \Rightarrow \frac{kg \cdot m^3}{J \cdot s} = \frac{kg \cdot m^3}{\frac{kg \cdot m^2}{s^2} \cdot s} = \frac{kg \cdot m^3}{\frac{kg \cdot m^2}{s}} = m \cdot s \Rightarrow \frac{kg \cdot m^3}{J \cdot h} \quad (7-4)$$

Aufbauend auf dieser Definition werden, analog zu den Simulationsergebnissen aus Studie 1 für Durchsatz und Energiebedarf, in den folgenden Abschnitten der Ergebnisraum, die Korrelationen, die Haupteffekte und abschließend die Verteilung der Effizienzkennzahl präsentiert. Die präsentierten Ergebnisse werden aus den Simulationsergebnissen von Studie 1 berechnet.

7.1.1 Ergebnisraum

Analog zum Ergebnisraum aus Abschnitt 6.1.1 wird in den nachfolgenden Abbildungen die Effizienzkennzahl k_{EE} auf der y-Achse mit Durchsatz oder Energiebedarf auf der x-Achse dargestellt. Dabei werden Einzel- und Doppelspielbetrieb in der Darstellung unterschieden. Grundsätzlich kann mit diesen Darstellungen auch ein tendenzieller Zusammenhang zwischen k_{EE} und $TP_{AKL/APL}$ bzw. $E_{AKL/APL}$ visualisiert werden. Nachdem die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Ergebnisvariablen bestehen, werden sie nicht mittels Korrelationen oder einem Regressionsmodell analysiert. Die Kennzahl ist durch ihre Berechnung auf Werte größer Null begrenzt. In den Abbildungen 7-1 und 7-2 sind zunächst die Zusammenhänge von $TP_{AKL/APL}$ und k_{EE} dargestellt. Im AKL Bereich erreicht k_{EE} im Einzelspielbetrieb Werte bis ca. $52 \text{ kgm}^3/(\text{Jh})$ und bis ca. $88 \text{ kgm}^3/(\text{Jh})$ im Doppelspielbetrieb. Die Felder für Einzel- und Doppelspielbetrieb haben eine ähnliche Form, im Doppelspielbetrieb werden höhere Kennzahlen erreicht. Ein höherer Durchsatz und ein geringerer mittlerer Energiebedarf pro Ladeinheit führen zu den deutlich höheren k_{EE} Werten. Die höchsten Durchsätze werden im Doppelspielbetrieb bei gleichzeitig geringerer k_{EE} erreicht. Diese Durchsätze werden in tendenziell kleineren Lagern erreicht und daher sinkt die Effizienzkennzahl zu höheren Durchsatzwerten hin ab.

Im APL Bereich im Einzelspielbetrieb erreicht k_{EE} Werte bis ca. $380 \text{ kgm}^3/(\text{Jh})$ und bis ca. $620 \text{ kgm}^3/(\text{Jh})$ im Doppelspielbetrieb. Die Verteilung der Kennzahl unterscheidet sich nicht wesentlich vom AKL Bereich, ist aber symmetrischer um einen Mittelwert im Durchsatz verteilt.

In den nachfolgenden Abbildungen 7-3 und 7-4 sind die Zusammenhänge von k_{EE} und $E_{AKL/APL}$ dargestellt. Für den AKL und APL Bereich bilden sich für Einzel- und Doppelspielbetrieb jeweils ähnliche Felder. Die k_{EE} Werte sind ab dem höchsten k_{EE}

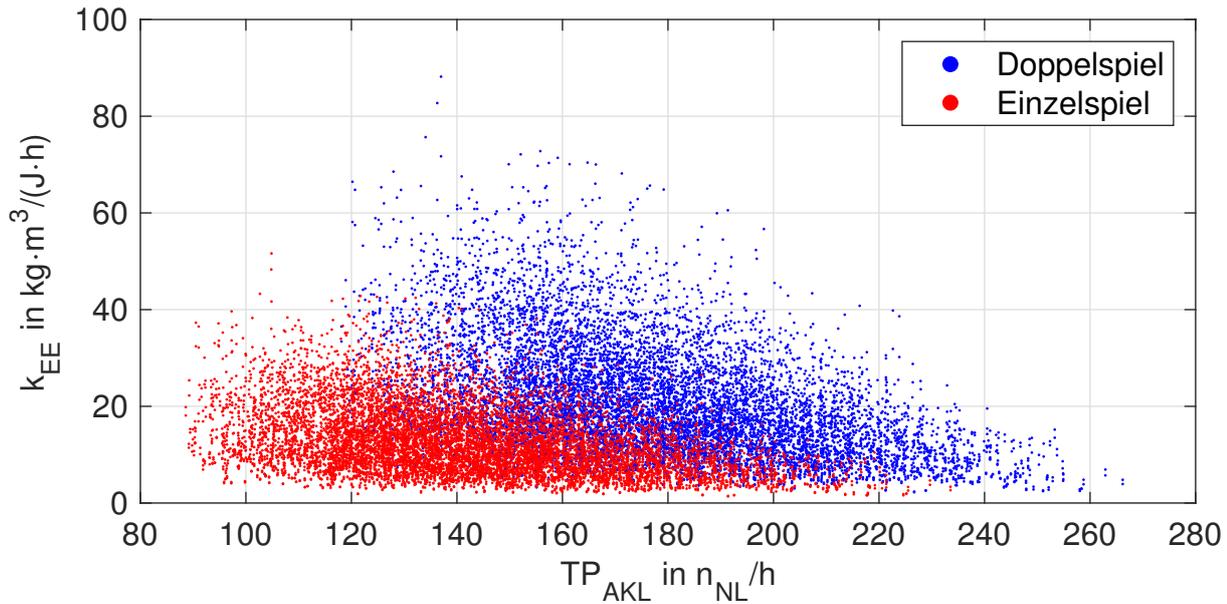


Abbildung 7-1: Zusammenhang Durchsatz und Effizienzkennzahl für AKLs

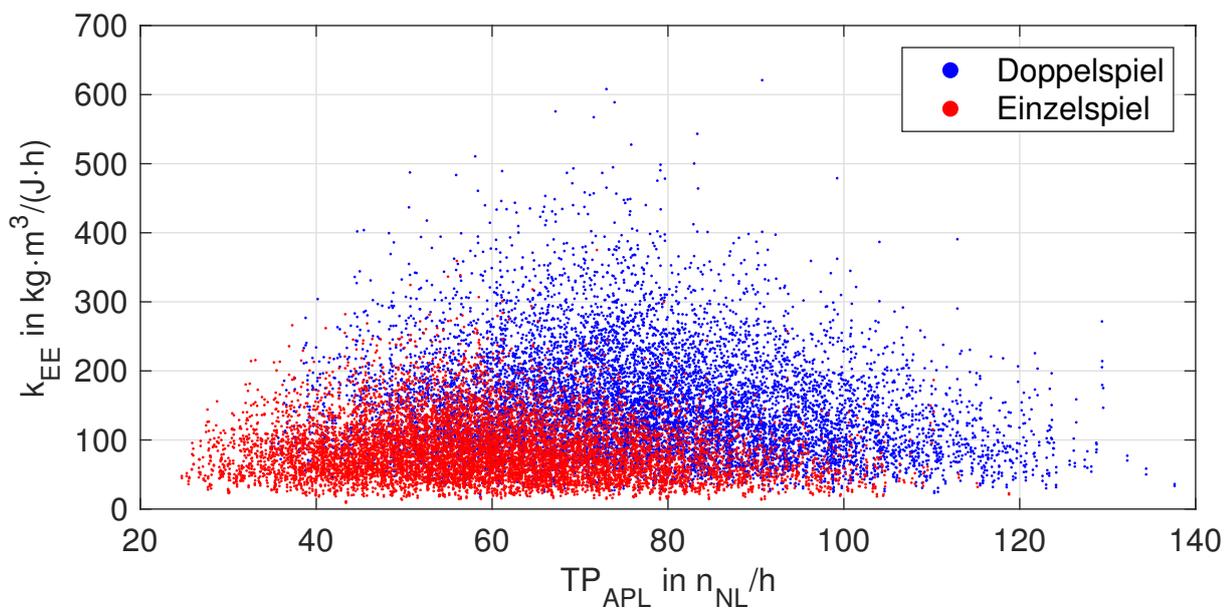


Abbildung 7-2: Zusammenhang Durchsatz und Effizienzkennzahl für APLs

Wert durch eine Hyperbelfunktion nach oben hin begrenzt. Im AKL Bereich ergeben sich die maximalen k_{EE} Werte bei $E_{AKL} \approx 140$ kJ.

Im APL Bereich ergeben sich die maximalen k_{EE} Werte bei $E_{APL} \approx 750$ kJ.

7.1.2 Korrelationen

In den folgenden Abbildungen werden die Pearson Korrelationen zwischen den variierten Parametern und k_{EE} vorgestellt. Die Parameter gehen zum Teil direkt in die Berech-

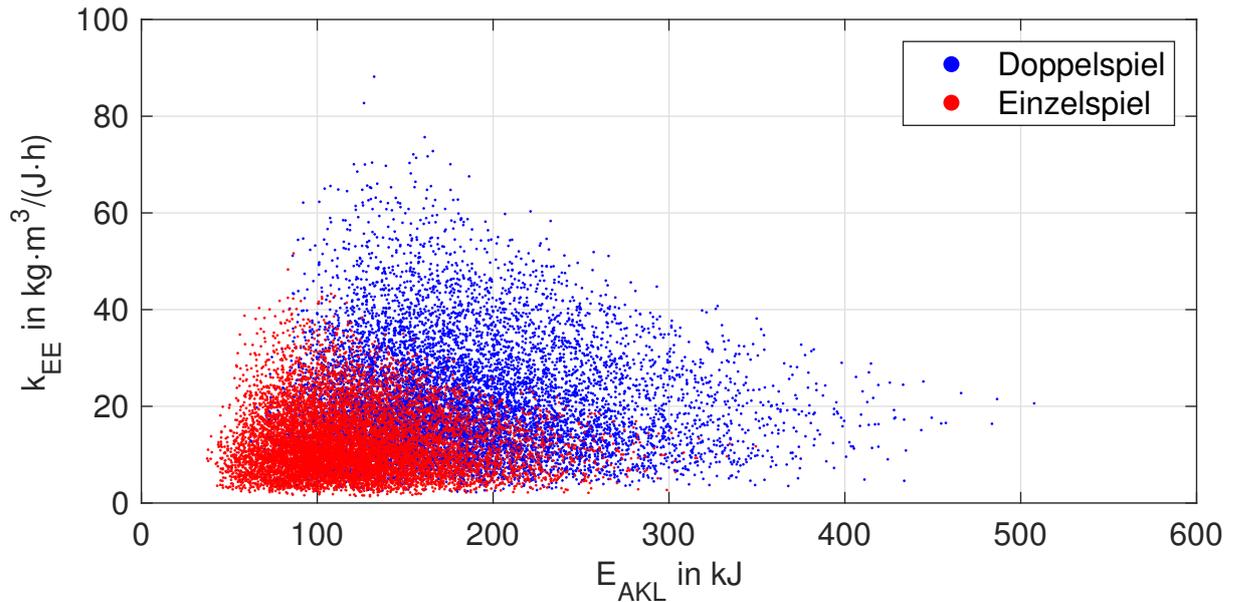


Abbildung 7-3: Zusammenhang Energiebedarf und Effizienzkennzahl für AKLs

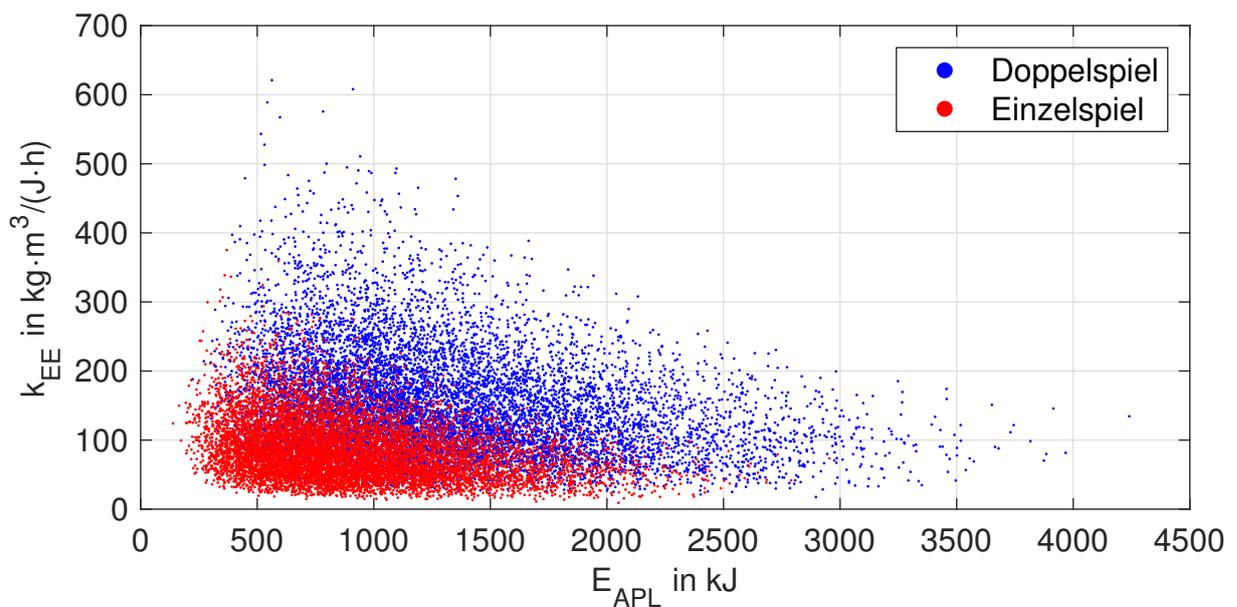


Abbildung 7-4: Zusammenhang Energiebedarf und Effizienzkennzahl für APLs

nung von k_{EE} ein und beeinflussen gleichzeitig $TP_{AKL/APL}$ und $E_{AKL/APL}$. Von Interesse ist hauptsächlich, welche finale Auswirkung die Parameter für den jeweiligen Gerätetyp haben. Die Regalabmessungen beeinflussen $TP_{AKL/APL}$ und $E_{AKL/APL}$ und sie gehen direkt in die Berechnung von k_{EE} ein. Ihre finale Auswirkung kann deswegen nicht intuitiv aus den Ergebnissen aus Abschnitt 6.1.2 prognostiziert werden. Die kinematischen Parameter beeinflussen $TP_{AKL/APL}$ und $E_{AKL/APL}$. Auch ihre finale Auswirkung lässt sich nicht vorhersagen. Die Wirkungsgrade und die Gerätemassen beeinflussen nur den Energiebedarf. Ihre Korrelationen mit k_{EE} sind ähnlich zu denen mit $E_{AKL/APL}$, jedoch mit vertauschtem Vorzeichen. Die Nutzlastmasse beeinflusst $E_{AKL/APL}$ und geht

direkt in die Berechnung von k_{EE} ein. Die Lagerbelegung hat auch hier keinen Einfluss und wird um der Vollständigkeit halber dargestellt.

Aussagen zu AKL In Abbildung 7-5 sind die Pearson Korrelationen zwischen den variierten Parametern und der Effizienzkennzahl im AKL Bereich dargestellt.

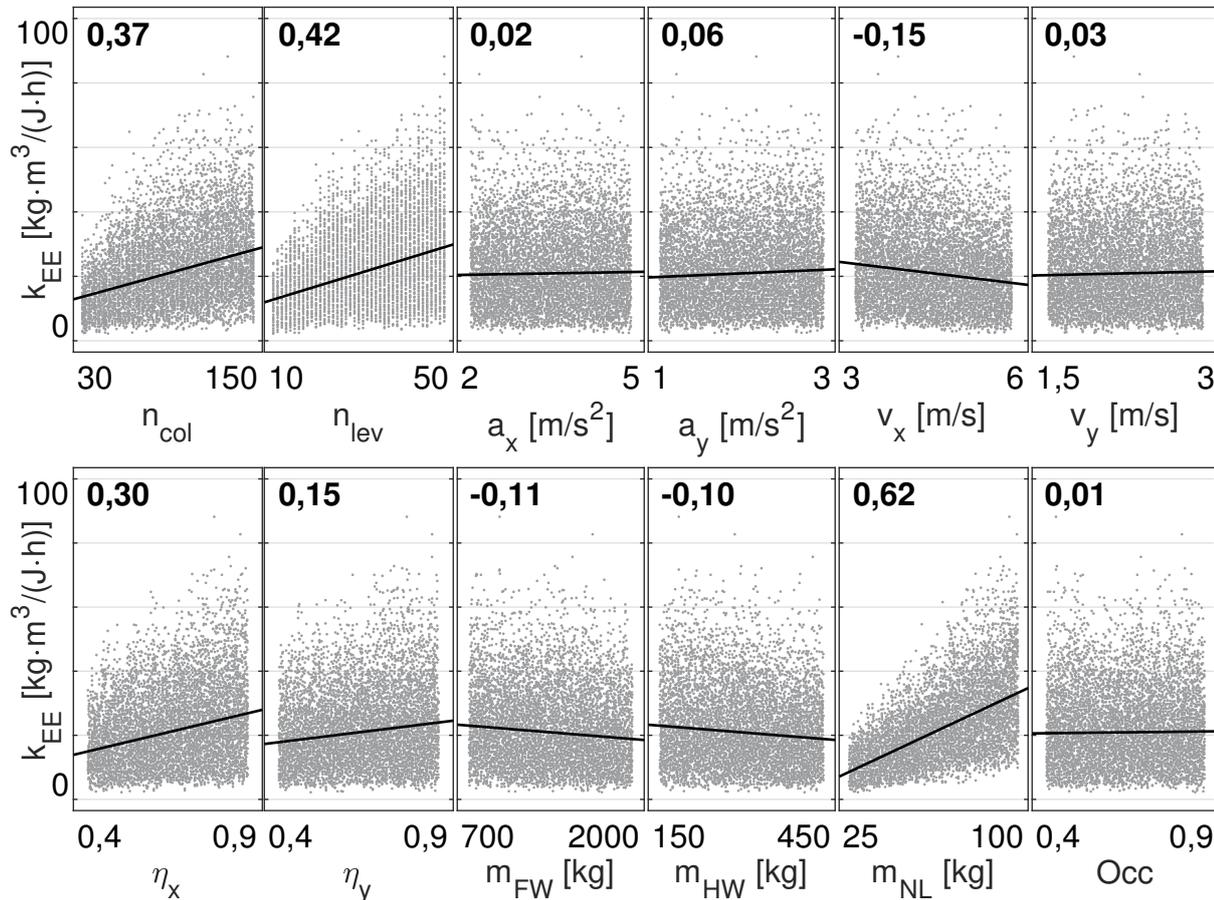


Abbildung 7-5: Pearson Korrelationen zwischen den variierten Parametern und k_{EE} der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb

Sowohl n_{col} als auch n_{lev} korrelieren beide positiv mit k_{EE} . Die Lagerabmessungen gehen direkt in die Berechnung der Kennzahl ein und haben damit einen starken positiven Einfluss. Trotz sinkendem Durchsatz und steigendem Energiebedarf überwiegt dieser Einfluss. Die kinematischen Parameter beeinflussen k_{EE} nur schwach. Für a_y und v_y liegen signifikante und leicht positive Korrelationen vor. Einen deutlich negativen Einfluss hat lediglich v_x . Hier überwiegt die Zunahme von E_{AKL} im Vergleich zur Zunahme von TP_{AKL} . Die Korrelation mit a_x ist nicht signifikant. Analog zur Korrelation mit E_{AKL} korreliert auch η_x stärker mit k_{EE} als η_y . Beide Wirkungsgrade korrelieren positiv mit k_{EE} . Die Massen m_{FW} und m_{HW} korrelieren beide negativ und mit ähnlichen Korrelationswerten mit k_{EE} . Die Nutzlastmasse m_{NL} geht direkt in die Berechnung von k_{EE} ein und korreliert trotz ihres Einflusses auf E_{AKL} am stärksten von allen Parametern mit

k_{EE} .

Die zugehörige Tabelle 7-1 liefert die Werte des Korrelationskoeffizienten r , der Signifikanz S , des p -Werts und der Signifikanzgrenze α von Abbildung 7-5.

Tabelle 7-1: Korrelationswerte der variierten Parameter mit k_{EE} der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb mit Signifikanzgrenze α , p -Wert und Signifikanz S (Tabellenwerte der Abbildung 7-5)

Parameter	K_{EE}			
	α_{corr} in %	p in %	S	r
n_{col}	0,50	0,00	+	0,37
n_{lev}	0,42	0,00	+	0,42
a_x	2,50	3,43	-	0,02
a_y	1,25	0,00	+	0,06
v_x	0,71	0,00	+	-0,15
v_y	1,67	0,64	+	0,03
η_x	0,56	0,00	+	0,30
η_y	0,63	0,00	+	0,15
m_{FW}	0,83	0,00	+	-0,11
m_{HW}	1,00	0,00	+	-0,10
m_{NL}	0,45	0,00	+	0,62
Occ	5,00	16,41	-	0,01

Aussagen zu APL In Abbildung 7-6 sind die Pearson Korrelationen zwischen den variierten Parametern und k_{EE} im APL Bereich dargestellt.

n_{col} korreliert positiv mit k_{EE} . n_{lev} korreliert, im Gegensatz zum AKL Bereich, nur schwach positiv mit k_{EE} . Hier gleichen sich die verschiedenen Einflüsse, die n_{lev} auf k_{EE} ausübt, weitgehend aus. Am Ende überwiegt der direkte Einfluss auf das Lagervolumen der zu einer schwach positiven Korrelation mit k_{EE} führt. a_x korreliert schwach negativ mit k_{EE} . Hier überwiegt der erhöhende Effekt auf E_{APL} den auf TP_{APL} . Für a_y liegt keine signifikante Korrelation vor. v_y liefert eine positive Korrelation, die sich mit der Erhöhung von TP_{APL} bei gleichzeitig ähnlichem E_{APL} begründen lässt. Analog zur Korrelation mit $E_{\text{AKL/APL}}$ korreliert auch η_y stärker mit k_{EE} als η_x . Beide Wirkungsgrade korrelieren positiv mit k_{EE} . Die Massen m_{FW} und m_{HW} korrelieren beide negativ mit k_{EE} und m_{HW} korreliert dabei stärker. Die Nutzlastmasse m_{NL} geht direkt in die Berechnung von k_{EE} ein und korreliert aufgrund ihres gleichzeitig kleinen Einflusses auf E_{APL} auch am stärksten von allen Parametern mit k_{EE} .

Die zugehörige Tabelle 7-2 liefert die Werte des Korrelationskoeffizienten r , der Signifikanz S , des p -Werts und der Signifikanzgrenze α von Abbildung 7-6.

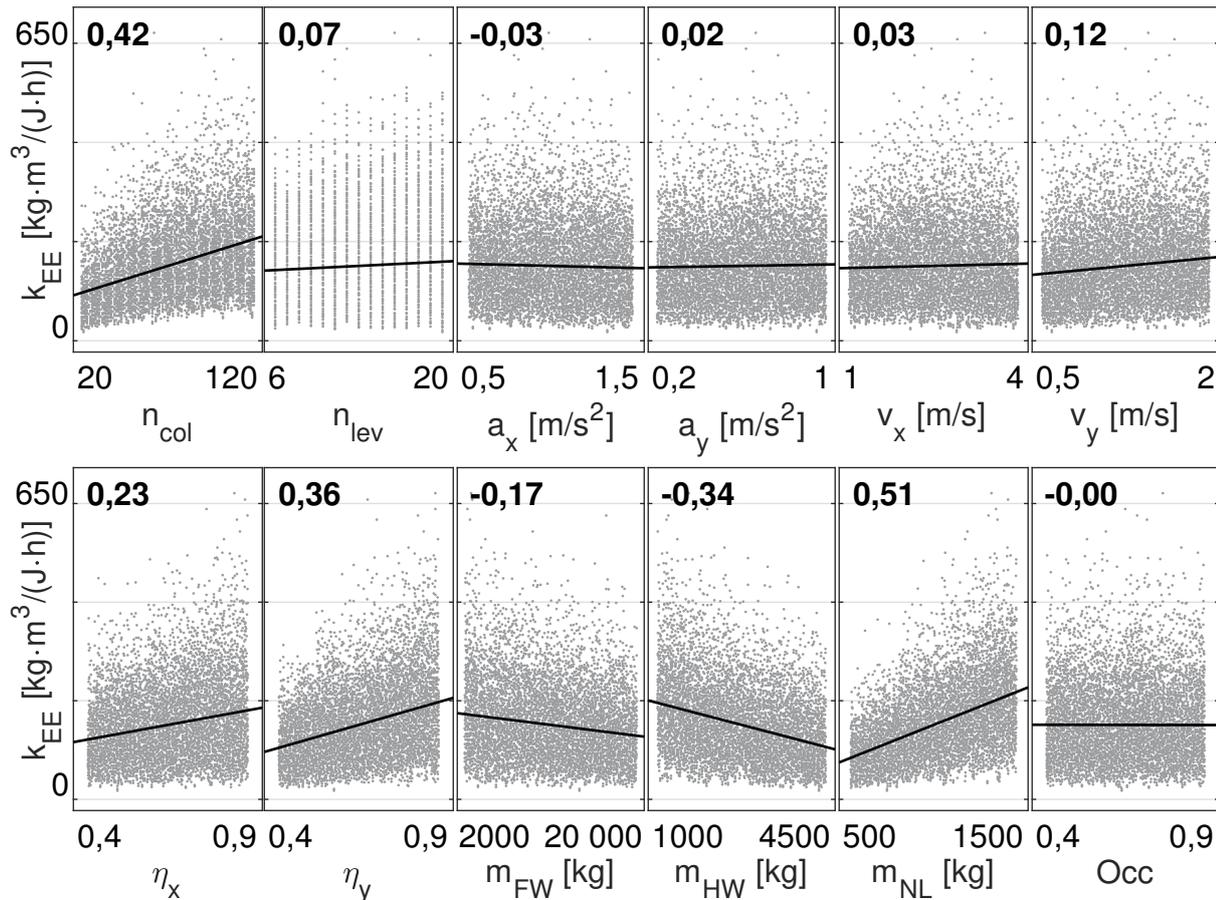


Abbildung 7-6: Pearson Korrelationen für die variierten Parameter und k_{EE} der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb

Die zugehörigen Korrelationstabellen für den Einzelspielbetrieb sind in Anhang E.1 in den Tabellen E-3 und E-4 dargestellt.

7.1.3 Haupteffekte

In Abschnitt 6.1.3 wird die Begründung für die Verwendung und die Bildung des Regressionsmodells bereits beschrieben. Nachfolgend sind daher nur noch die Haupteffekte und die Adjusted response der Parameter auf k_{EE} dargestellt. Zunächst werden in Abbildung 7-7 die Relativwerte der Haupteffekte auf k_{EE} gezeigt. Die Absolutwerte der Haupteffekte sind in Anhang E.2 in Abbildung E-3 dargestellt.

Für n_{col} liegen für AKLs und APLs ähnlich hohe Haupteffekte vor. Der Haupteffekt von n_{lev} ist im AKL Bereich deutlich größer als im APL Bereich. Die Beschleunigung a_x hat kaum einen Effekt auf k_{EE} . a_y hat einen positiven Haupteffekt, der sich durch den negativen Haupteffekt auf $E_{AKL/APL}$ ergibt. Wie bereits bei $E_{AKL/APL}$ erklärt, ist dieser Zusammenhang relativ schwach sowie hauptsächlich quadratisch und wird daher von der Pearson Korrelation nicht abgebildet. Die Geschwindigkeit v_x ist der einzige

Tabelle 7-2: Korrelationswerte für die variierten Parameter und k_{EE} der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb mit Signifikanzgrenze α , p -Wert und Signifikanz S (Tabellenwerte der Abbildung 7-6)

Parameter	K_{EE}			
	α_{corr} in %	p in %	S	r
n_{col}	0,42	0,00	+	0,42
n_{lev}	1,00	0,00	+	0,07
a_x	1,67	0,17	+	-0,03
a_y	2,50	3,43	-	0,02
v_x	1,25	0,13	+	0,03
v_y	0,83	0,00	+	0,12
η_x	0,63	0,00	+	0,23
η_y	0,50	0,00	+	0,36
m_{FW}	0,71	0,00	+	-0,17
m_{HW}	0,56	0,00	+	-0,34
m_{NL}	0,45	0,00	+	0,51
Occ	5,00	84,82	-	0,00

Parameter, dessen Haupteffekt im AKL Bereich negativ und im APL Bereich positiv ist. v_x hat einen kleineren positiven Effekt auf TP_{AKL} als auf TP_{APL} . Gleichzeitig ist der positive Effekt auf E_{AKL} größer als der auf E_{APL} . Für die gewählten Wertebereiche der Parameter ergeben sich diese Zusammenhänge. v_y hat sowohl bei AKLs als auch bei APLs einen positiven Haupteffekt. Analog zu den Haupteffekten auf E_{AKL} ist auch der Effekt von η_x im AKL Bereich stärker als der von η_y . Gleichzeitig ist der Haupteffekt von η_y im APL Bereich stärker. Beide Wirkungsgrade korrelieren positiv mit k_{EE} . Die Fahrwerksmasse m_{FW} hat im AKL und im APL Bereich einen ähnlichen negativen Haupteffekt. Für m_{HW} ist der Effekt im APL Bereich größer als im AKL Bereich. Diese Zusammenhänge sind analog zu den Haupteffekten der Gerätemassen auf $E_{AKL/APL}$. Die Nutzlastmasse m_{NL} hat im AKL Bereich einen größeren Haupteffekt als im APL Bereich. Der direkte Einfluss auf k_{EE} und der geringere Haupteffekt von m_{NL} auf E_{AKL} führen zu diesem Zusammenhang. Die Nutzlastmasse hat die größten Haupteffekte auf k_{EE} . Die Haupteffekte der Rückspeiseeinheit sind analog zu den Haupteffekten auf $E_{AKL/APL}$.

Verläufe der Effekte auf die Effizienzkennzahl In den nachfolgenden Abbildungen 7-8 und 7-9 sind die Adjusted response Plots der obigen Haupteffekte des Doppelspielbetriebs dargestellt. Ähnlich wie bei den Haupteffekten ergeben sich für die Verläufe einiger Parameter Kombinationen aus den Verläufen von $TP_{AKL/APL}$ und

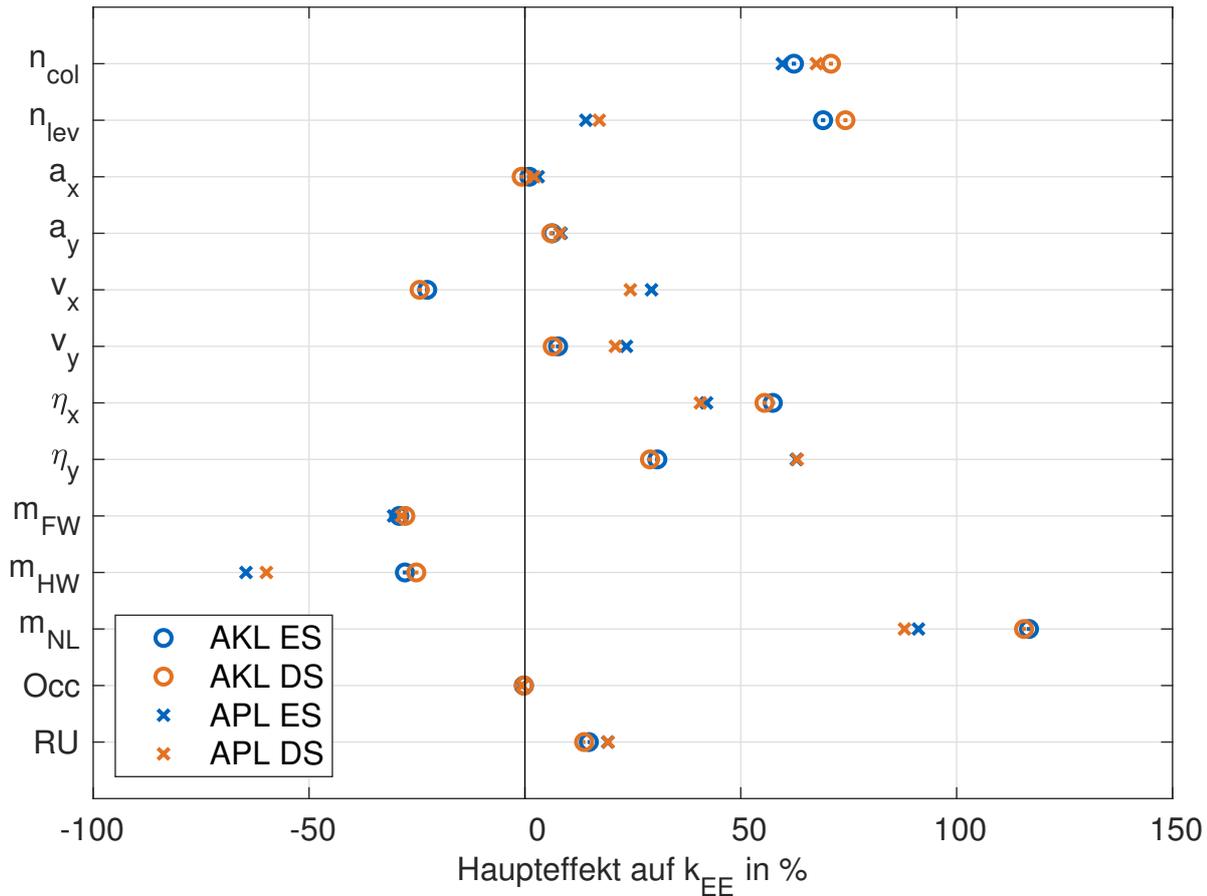


Abbildung 7-7: Haupteffekte der Basisparameter und des Einsatzes der Rückspeiseeinheit auf die Effizienz Kennzahl k_{EE}

$E_{AKL/APL}$. Ausnahmen sind jene Parameter, die k_{EE} zusätzlich direkt beeinflussen. Die zugehörigen Verläufe des Einzelspielbetriebs werden in Abschnitt E.4 gezeigt.

Im AKL Bereich ergeben sich für n_{col} und n_{lev} ähnliche Verläufe. Nach einem anfänglich starken Anstieg flachen die Verläufe zu höheren Werten hin ab. Dies liegt an der Abnahme von TP_{AKL} bei gleichzeitiger Zunahme von E_{AKL} . Im APL Bereich gibt es einen Unterschied zwischen den Verläufen von n_{col} und n_{lev} . Der Verlauf für n_{col} steigt anfänglich stark an und flacht zu höheren Werten hin ab. Der Verlauf für n_{lev} steigt zunächst leicht an und flacht auch zu höheren Werten hin ab. Beide Verläufe drehen zum Schluss leicht ins Negative. In diesem Bereich überwiegen die Einflüsse von TP_{APL} und E_{APL} den Einfluss der direkten Berücksichtigung der Parameter in der Kennzahl.

Die Verläufe der Beschleunigungen sind im AKL und APL Bereich ähnlich. Der Effekt der Beschleunigung a_x verläuft fast horizontal. Hier gleichen sich die gegenläufigen Einflüsse von $TP_{AKL/APL}$ und $E_{AKL/APL}$ aus. Der Verlauf für die Beschleunigung a_y ist schwach ansteigend und leicht quadratisch abfallend. Der Durchsatz nimmt bei gleichbleibendem Energiebedarf zu und führt zu einer steigenden Effizienz Kennzahl. Der

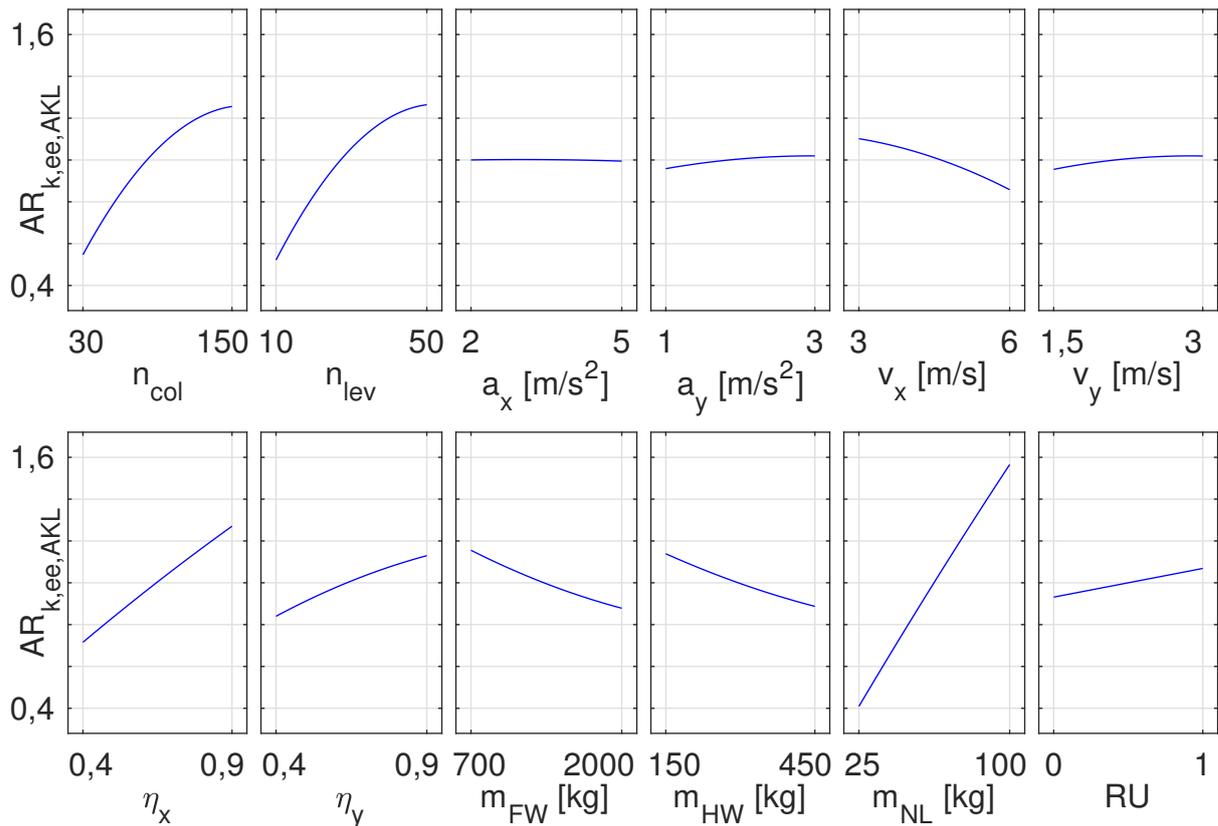


Abbildung 7-8: Adjusted response der Effizienzkennzahl der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb

Verlauf für die Geschwindigkeit v_x verläuft im AKL Bereich quadratisch abflachend. Der Einfluss von E_{AKL} überwiegt den Einfluss von TP_{AKL} gänzlich. Der Verlauf der Geschwindigkeit v_y ist ähnlich wie der von a_y . Die leichte Zunahme des Durchsatzes ohne gleichzeitige Zunahme des Energiebedarfs führt zum leicht ansteigenden Verlauf. Im APL Bereich steigt der Verlauf für v_x bis zu einem Wert von ca. 2,7 m/s an und fällt danach ab. Ab dem Wendepunkt übersteigen die Einflüsse von E_{APL} die von TP_{APL} . Für v_y steigt der Verlauf bis zu einem Wert von ca. 1,8 m/s an und fällt danach wieder leicht ab. Dafür ist hauptsächlich die bereits in Abschnitt 6.1.3 bei Abbildung 6-9 beschriebene Ausnahme im Verlauf für den Durchsatz verantwortlich.

Die Verläufe der Wirkungsgrade η_x und η_y sind im AKL und APL Bereich umgekehrt proportional zu denen bei $E_{AKL/APL}$.

Die Gerätemassen m_{FW} und m_{HW} führen im AKL und APL Bereich zu einer Abnahme mit quadratischem Anteil. Der Haupteffekt der Nutzlastmasse m_{NL} hat einen hauptsächlich linearen und stark ansteigenden Verlauf. Hier überwiegt für AKLs und APLs der starke direkte Einfluss auf die Kennzahl.

Für den Einsatz der Rückspeiseeinheit ergibt sich ein linearer Verlauf, der umgekehrt proportional zu dem bei $E_{AKL/APL}$ ist.

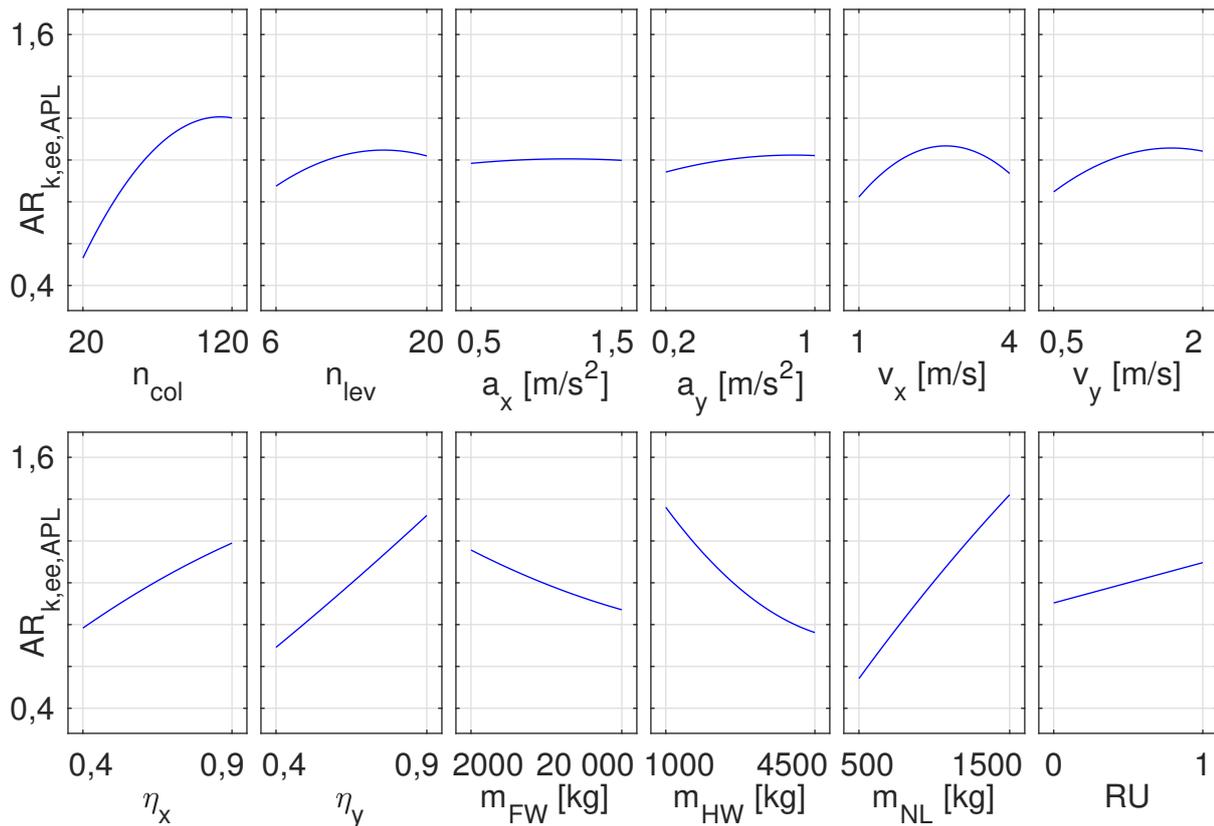


Abbildung 7-9: Adjusted response der Effizienzkennzahl der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb

7.1.4 Regalwandfaktor

Analog zu den Untersuchungen in Abschnitt 6.1.4 sind in den nachfolgenden Abbildungen die Mittelwerte der Effizienzkennzahl über dem Regalwandfaktor im Doppelspielbetrieb dargestellt. Auch hier wird die in Gleichung 6-6 beschriebene erweiterte Definition von RWF verwendet. Zunächst ist in Abbildung 7-10 der Verlauf für AKLs dargestellt. Hier zeigt sich, dass die höchsten mittleren k_{EE} Werte in einem Bereich von ca. $RWF = 0,5$ bis $0,8$ auftreten. Es werden also zeitlich längere Lager bevorzugt. Das liegt einerseits am hohen Energiebedarf, der auch bei AKLs durch Hubvorgänge entsteht, andererseits an den niedrigeren Hubgeschwindigkeiten, die den Durchsatz begrenzen.

Abbildung 7-11 zeigt den Verlauf des mittleren k_{EE} Werts im APL Bereich. Bei RWF Werten von ca. $0,3$ bis $0,7$ ergeben sich tendenziell die höchsten mittleren k_{EE} Werte. Durch den höheren Einfluss des Hubvorgangs werden im APL Bereich auch zeitlich längere Lager bevorzugt.

Generell werden in beiden Bereichen eher höhere k_{EE} Werte in zeitlich langen Lagern erreicht. Der Anstieg des Durchsatzes überwiegt in diesem Bereich den gleichzeitigen Anstieg des Energiebedarfs.

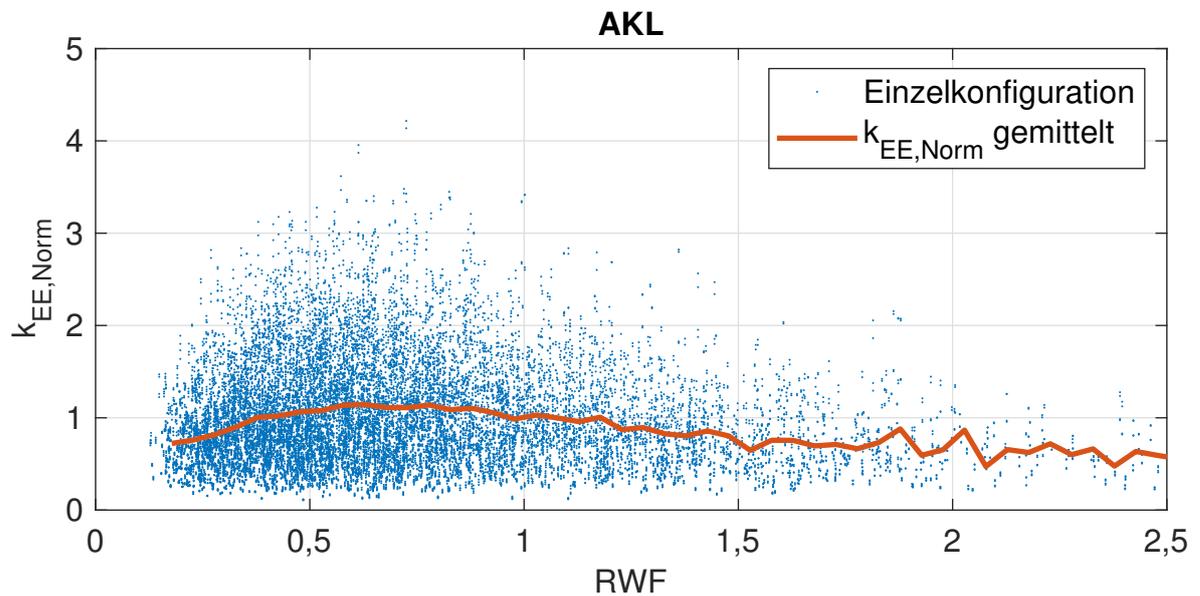


Abbildung 7-10: Ergebnisraum der AKL Konfigurationen mit normierter Effizienzkennzahl und gemittelten Effizienzkennzahlwerten aufgetragen über dem Regalwandfaktor

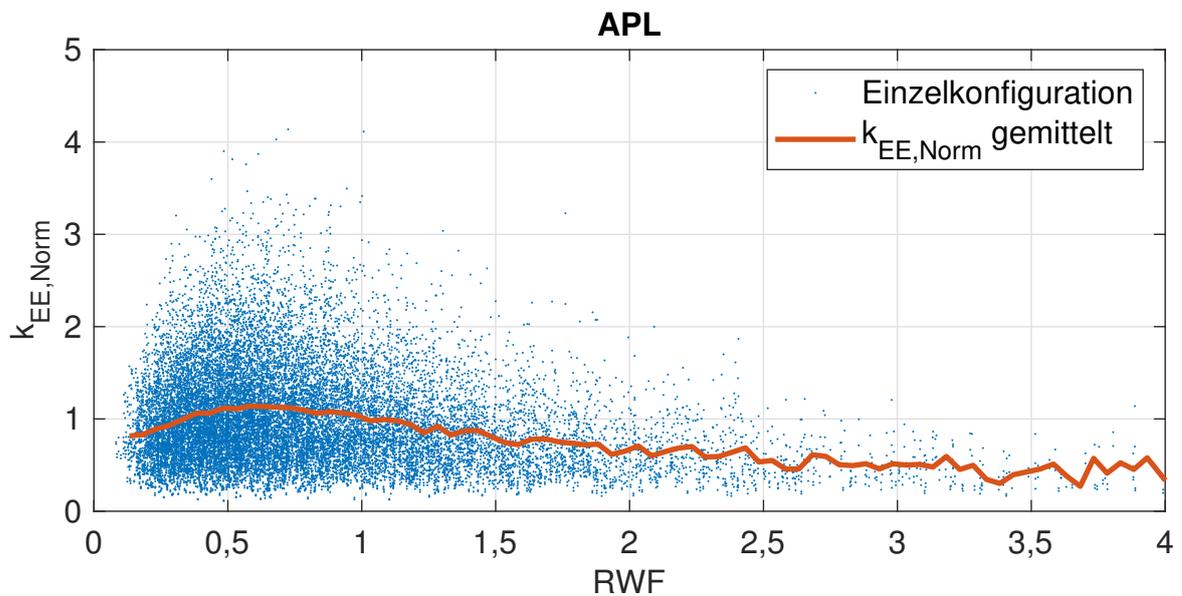


Abbildung 7-11: Ergebnisraum der APL Konfigurationen mit normierter Effizienzkennzahl und gemittelten Effizienzkennzahlwerten aufgetragen über dem Regalwandfaktor

7.2 Verteilung der Effizienzkennzahl und Klassifizierung

In den nachfolgenden Histogrammen wird k_{EE} auf der x-Achse über dem Anteil an Geräten auf der y-Achse dargestellt. Betrachtet man die Verteilungen der Effizienzkennzahl für AKLs in Abbildung 7-12 und für APLs in Abbildung 7-13, so zeigen sich jeweils rechtsschiefe Verteilungen. Mit diesen Verteilungen liegt gleichzeitig die geforderte Verteilung der Effizienzkennzahl auf Basis der physikalischen Gesamtheit aller Geräte vor. Die Anteilsgrenze, die Anteile der Verteilung und die jeweils unteren Klassengrenzen $k_{EE,min}$ für AKLs und APLs sind in Tabelle 7-3 aufgelistet. Dabei werden die Anteile mit $-2,5$, $-1,5$, $-0,5$, $0,5$, $1,5$ und $2,5$ mal der Standardabweichung σ begrenzt. Dies führt dazu, dass die Geräte mit den höchsten Effizienzkennzahlen in Klasse A nur einen geringen Anteil ausmachen und dieser Anteil bis zur Klasse D zunimmt. Danach nimmt der Anteil pro Klasse bis zur Klasse G mit den geringsten Effizienzkennzahlen wieder ab.

Tabelle 7-3: Tabelle der Grenzwerte für eine Klassifizierung auf Basis einer Normalverteilung

Klasse	Anteilsgrenze	Anteil	AKL $k_{EE,min}$ in $\text{kgm}^3/(\text{Jh})$	APL $k_{EE,min}$ in $\text{kgm}^3/(\text{Jh})$
A	0,62 %	0,62 %	54,40	375,36
B	6,68 %	6,06 %	34,74	236,42
C	30,85 %	24,17 %	19,43	137,50
D	69,15 %	38,30 %	10,29	75,77
E	93,32 %	24,17 %	5,31	41,02
F	99,38 %	6,06 %	2,86	22,32
G	100 %	0,62 %	0,00	0,00

Die Verteilung beinhaltet alle Konfigurationen im Einzel- und Doppelspielbetrieb. Damit sind auch Geräte, die nur im Einzelspielbetrieb arbeiten, vertreten. Gleichzeitig können auch realistische Mischbetriebe mit Doppelspielquoten von 0 % bis 100 % bewertet werden. Die Kennzahlen werden dazu jeweils linear gewichtet. Für eine Bewertung des Geräts mit seiner höchsten Kennzahl kann auf eine Doppelspielquote von 100 % zurückgegriffen werden. Diese Methode eignet sich auch, um Geräte im Vorfeld miteinander zu vergleichen. Gleichzeitig ist damit die einfache Überprüfung der EE bei Inbetriebnahme des RBGs mittels Messung des Energiebedarfs möglich. Grundsätzlich lässt sich der Vergleich aber auch mit einer beliebigen Doppelspielquote durchführen. Diese muss nur, für alle zu vergleichenden RBGs, gleich sein. In Abschnitt 7.4 wird gezeigt, wie sich k_{EE} mithilfe eines Faktors und der Doppelspielquote Q_{DS} für einen Mischbetrieb ausrechnen lässt.

Auf Basis dieser Verteilungen wurden in der Veröffentlichung [Rüc-2020b] verschiedene Möglichkeiten zur Klassifizierung vorgestellt. Darin wurde die Einteilung auf Basis

einer Normalverteilung als geeignetste Methode ausgewählt. Die Klassengrenzen, die sich auf Basis der Verteilung ergeben, sind in den Abbildungen 7-12 und 7-13 dargestellt. Zusätzlich sind die Klassen farblich gekennzeichnet. Die Balken in Abbildung 7-12 decken jeweils ein Intervall von ca. $2,57 \text{ kgm}^3/(\text{Jh})$ ab. Der Großteil der AKLs findet sich in einem Bereich von $5,31 \text{ kgm}^3/(\text{Jh})$ bis $34,73 \text{ kgm}^3/(\text{Jh})$, also in den mittleren Klassen C, D und E.

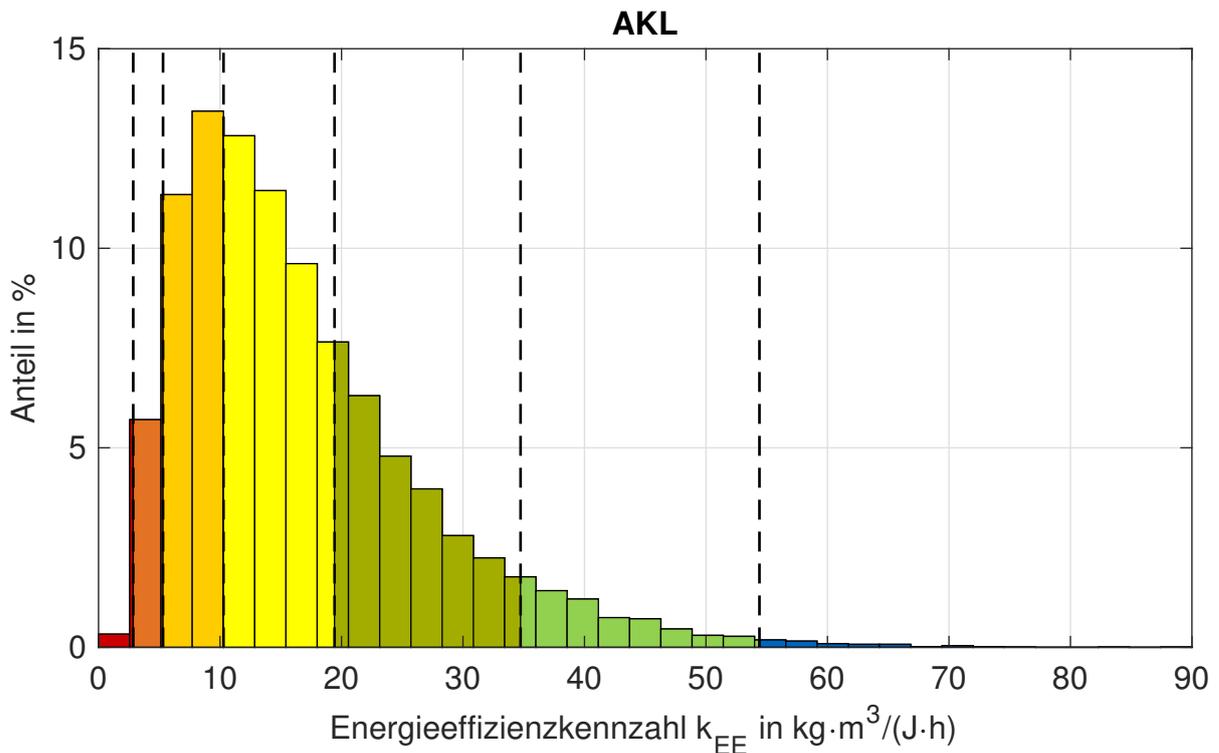


Abbildung 7-12: Verteilung der Effizienz kennzahl für AKLs mit Klassengrenzen

Die Balken in Abbildung 7-13 decken jeweils ein Intervall von $17,1 \text{ kgm}^3/(\text{Jh})$ ab. Der Großteil der Geräte findet sich in einem Bereich von $41,02 \text{ kgm}^3/(\text{Jh})$ bis $236,41 \text{ kgm}^3/(\text{Jh})$, also in den mittleren Klassen C, D und E.

Die Benennung der Klassen von A bis G und ihre Farbgebung orientiert sich an EE Bewertungen aus dem Bereich der Konsumgüter. Die Farben werden aber letztlich vom Autor ausgewählt und haben keine direkte Relevanz, sondern dienen lediglich der Verdeutlichung.

7.3 Referenzspiele für den mittleren Energiebedarf

Der Durchsatz lässt sich mithilfe der Referenzspiele aus der FEM [FEM-9851] bestimmen. Darin werden sechs häufige Anwendungsfälle unterschieden. In [Stö-2018] wird

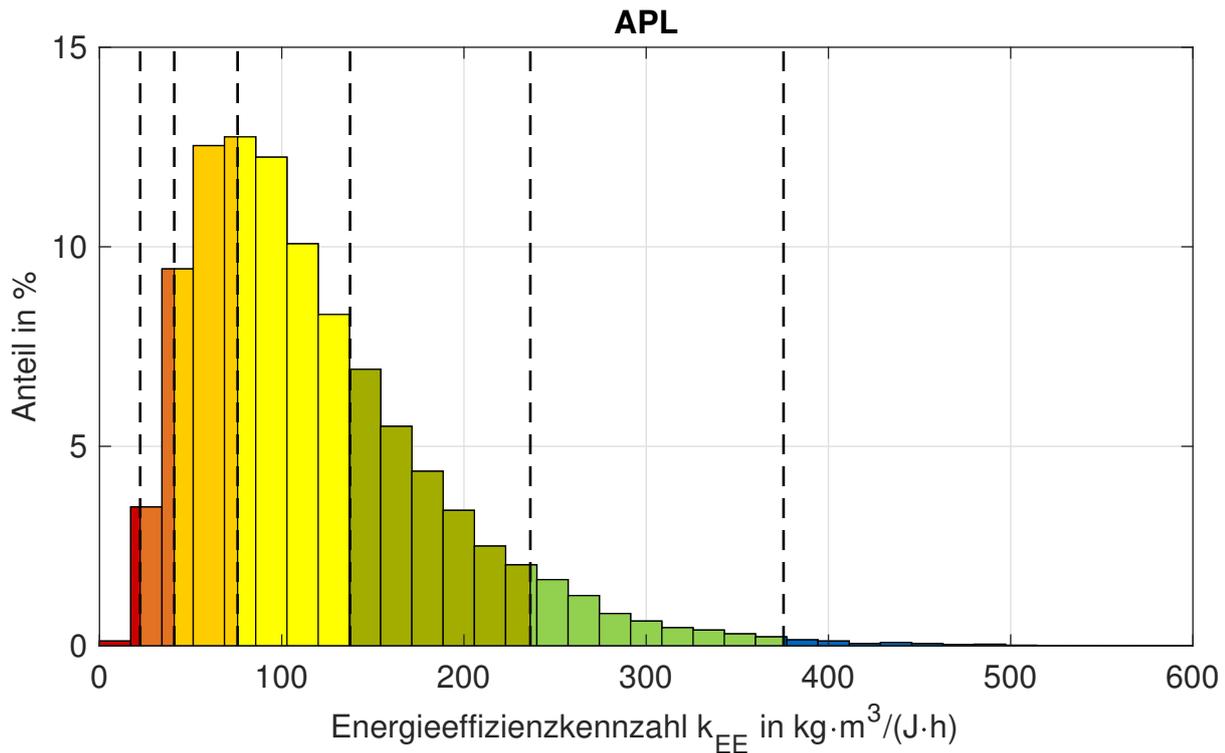


Abbildung 7-13: Verteilung der Effizienz kennzahl für APLs mit Klassengrenzen

das FEM-Doppelspiel als Referenzspiel für den Vergleich zwischen verschiedenen Lagersystemen benutzt.

In dieser Arbeit wird das FEM-Doppelspiel auf seine Eignung als Referenzspiel für den mittleren Energiebedarf untersucht. Das FEM-Doppelspiel mit einem I/O Punkt an der Lagerstirnseite auf der untersten Ebene ist schematisch in Abbildung 7-14 dargestellt. Dies entspricht dem Fall 1 mit Einlagerpunkt an der Position $P_E(1/5 \cdot L | 2/3 \cdot H)$ und Auslagerpunkt an der Position $P_A(2/3 \cdot L | 1/5 \cdot H)$. Vorausgesetzt ist, dass die Wahrscheinlichkeit, mit der einzelne Lagerfächer angefahren werden, für alle Lagerfächer gleich hoch ist [FEM-9851, S. 6]. Es wird angenommen, dass die Mehrzahl der realisierten HRLs diesem Anwendungsfall entspricht.

Mithilfe der Simulationsergebnisse lässt sich der Mittelwert des Energiebedarfs aller Doppelspiele mit dem Energiebedarf des FEM-Doppelspiels vergleichen. Dieser Vergleich ist für alle Konfigurationen in der Abbildung 7-15 für AKLs und in Abbildung 7-16 für APLs dargestellt. Im linken Diagramm der Abbildungen wird ein Vergleich der Energiebedarfe gezeigt. Im rechten Diagramm ist ein Histogramm des relativen Fehlers abgebildet. Ein positiver Fehler bedeutet eine Überschätzung des mittleren Energiebedarfs durch das FEM-Doppelspiel. Diese äußert sich im linken Diagramm durch die Lage der Punkte oberhalb der Geraden mit Steigung 1,0. Nachdem die Fehlerwerte in etwa normalverteilt sind, wird zusätzlich die Kurve einer berechneten Normalverteilung zu den Daten im Histogramm dargestellt. Der Mittelwert des Fehlers $\bar{\epsilon}_{\text{FEM}}$ und die Standardabweichung σ_{ϵ} sind in den Beschriftungen der Abbildungen angegeben.

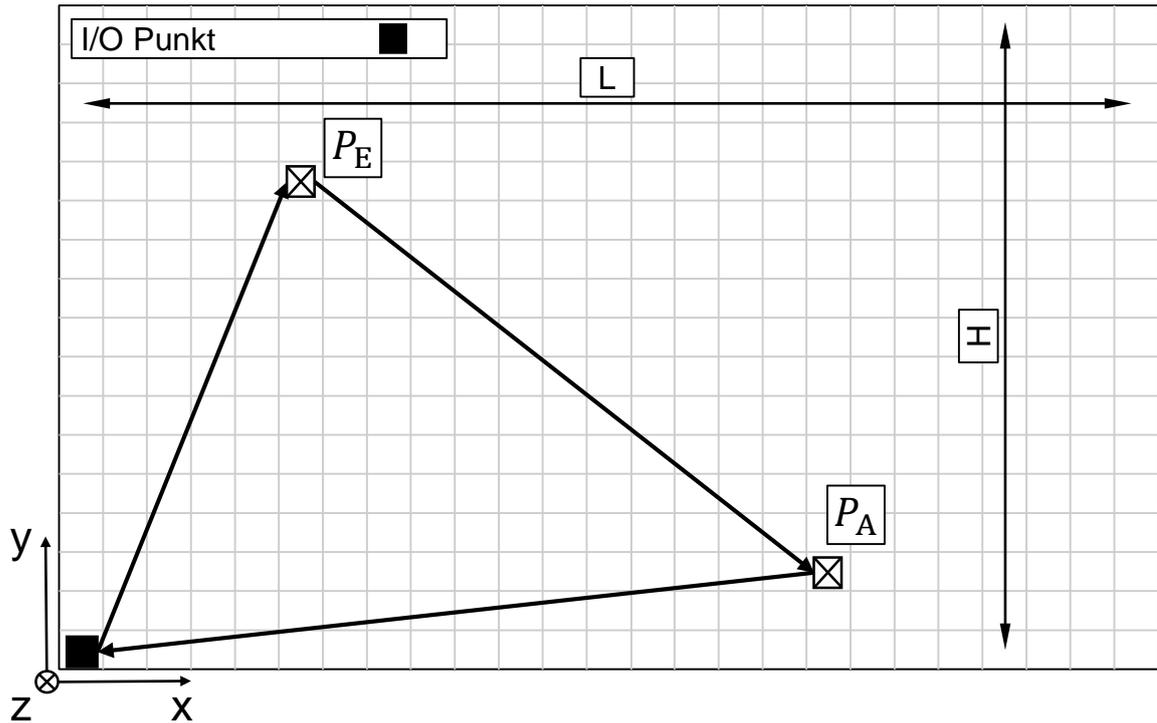


Abbildung 7-14: Schema des FEM-Doppelspiels mit $P_E(1/5 \cdot L | 2/3 \cdot H)$ und $P_A(2/3 \cdot L | 1/5 \cdot H)$ (vgl. [Rüc-2020b])

Der Energiebedarf wird durch das FEM-Doppelspiel im AKL Bereich in den meisten Fällen überschätzt. Der mittlere Fehler ist mit $\bar{\epsilon}_{FEM} = 5,34\%$ allerdings sehr gering. Die Konfigurationen sind in einer schmalen Wolke angeordnet und es gibt keine Ausreißer die deutlich außerhalb der normalen Verteilung liegen.

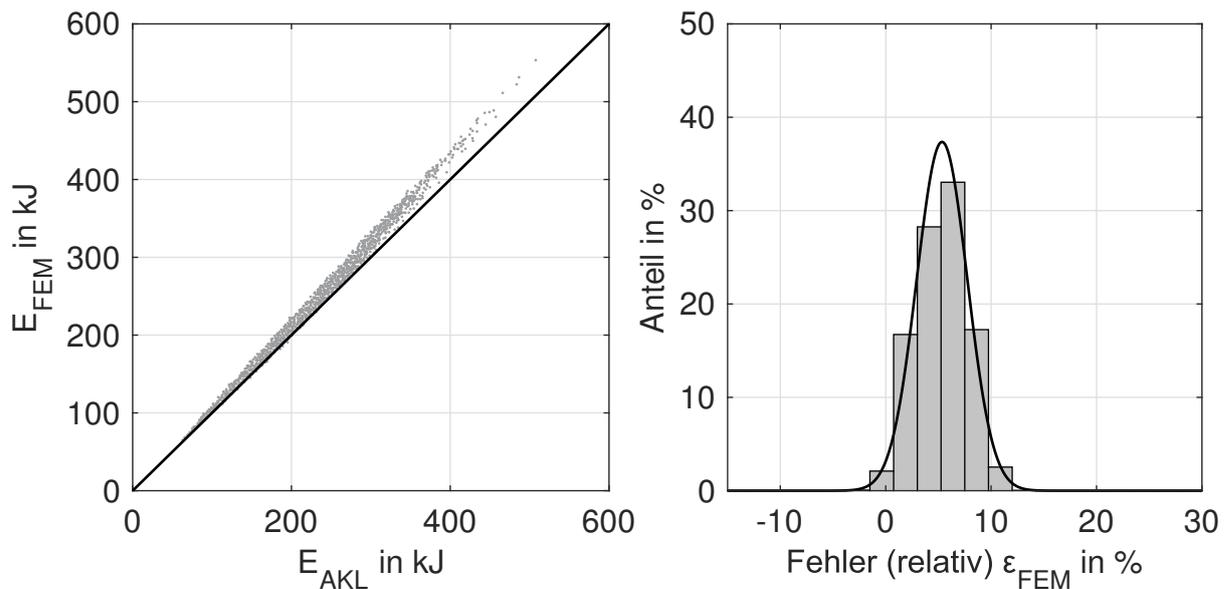


Abbildung 7-15: Vergleich der mittleren Energiebedarfe und der Energiebedarfe des FEM-Doppelspiels und Histogramm des relativen Fehlers mit $\bar{\epsilon}_{FEM} = 5,34\%$ und $\sigma_{\epsilon} = 2,40\%$ für AKL (vgl. [Rüc-2020b])

Auch im APL Bereich kommt es großteils zu einer Überschätzung des mittleren Energiebedarfs mit einem mittleren Fehler von $\bar{\epsilon}_{FEM} = 6,10\%$. Die Abweichungen sind damit etwas größer als im AKL Bereich, sind aber immer noch relativ klein. Die Konfigurationen sind in einer etwas breiteren Wolke angeordnet und weisen keine Ausreißer aus der normalen Fehlerverteilung auf.

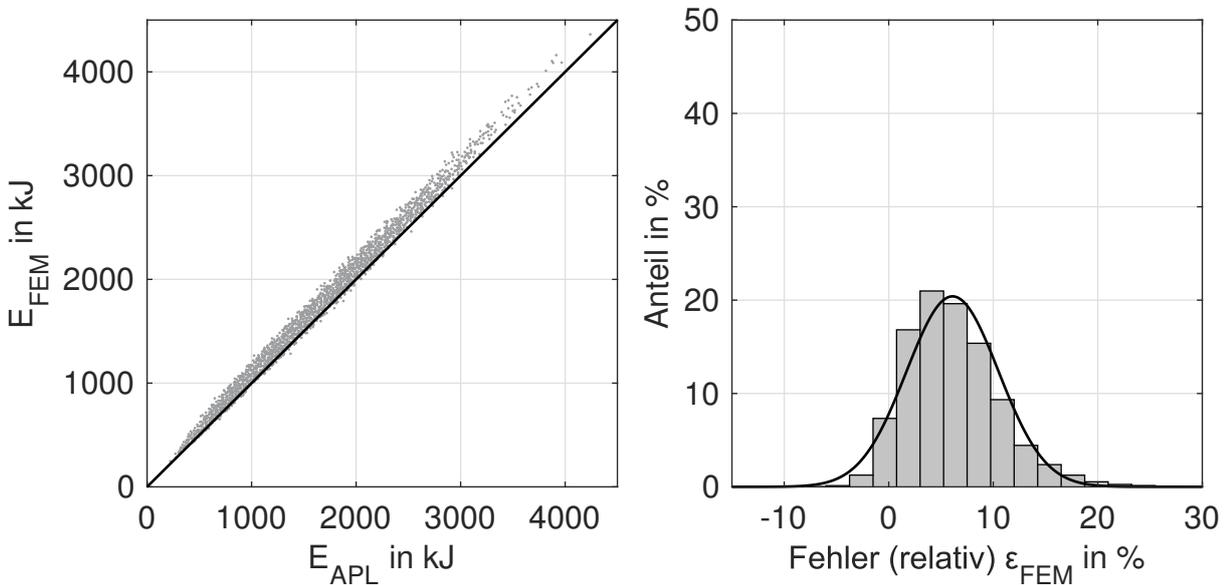


Abbildung 7-16: Vergleich der mittleren Energiebedarfe und der Energiebedarfe des FEM-Doppelspiels und Histogramm des relativen Fehlers mit $\bar{\epsilon}_{FEM} = 6,10\%$ und $\sigma_{\epsilon} = 4,40\%$ für APL (vgl. [Rüc-2020b])

Zusammengefasst lässt sich der mittlere Energiebedarf des Doppelspielbetriebs sehr gut über das FEM-Doppelspiel abschätzen. Die analogen Abbildungen für den Zusammenhang zwischen Mittelwert von $TP_{AKL/APL}$ und dem FEM Referenzspiel sind in Abschnitt E.5 dargestellt. Hier treten deutlich kleinere Fehler als im Bereich des Energiebedarfs auf. Für die Bestimmung des Durchsatzes bzw. der mittleren Spielzeit wurde das FEM-Doppelspiel ursprünglich entwickelt. Damit wird hier der Nachweis erbracht, dass das FEM-Doppelspiel auch für die Bestimmung des mittleren Energiebedarfs geeignet ist. In [Rüc-2020b] wird bereits eine Methode zur Fehlerkorrektur präsentiert. Im Laufe weiterer Überlegungen wird aber noch eine bessere Methode zur Verringerung des mittleren Fehlers gefunden. Diese wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

7.4 Praktische Umsetzung einer Bewertung

Um die gewonnenen Erkenntnisse in der Praxis umsetzen zu können, werden Überlegungen für die praktische Durchführung einer Bewertung angestellt. Zunächst muss natürlich geklärt werden, ob ein physisches RBG durch Messung bewertet werden soll oder ein noch nicht umgesetztes RBG mittels Berechnung. Ziel ist es, im Vorfeld

der Bewertung eine Methode zur Bestimmung der notwendigen Parameter auszuwählen. Zusätzlich muss das Ziel der Bewertung geklärt werden. Sollen Geräte verglichen werden, oder soll ein bereits vorhandenes Gerät überprüft werden, um mögliche Verbesserungspotenziale aufzudecken?

Bewertung in der Planungsphase Die vorgestellte Bewertung lässt sich einfach in den Planungsprozess integrieren. Wenn die grundsätzlichen Anforderungen eines Betreibers für ein HRL, also Lagerdimension, Stellplatzanzahl und geforderter Durchsatz, bekannt sind, lassen sich verschiedene Geräte auf der gleichen Basis an Anforderungen miteinander vergleichen. Bei so einem Vergleich erhält man eine Aussage, welches RBG für einen konkreten Anwendungsfall, strategische Aspekte ausgenommen, das energieeffizienteste Gerät sein wird. Dann tritt auch der Effekt, dass k_{EE} stark vom Lagervolumen abhängt, in den Hintergrund. Dabei müssen die Hersteller der Geräte im Vorfeld den Durchsatz und den mittleren Energiebedarf ihres RBGs berechnen. Hersteller besitzen sehr umfassende Kenntnisse über ihre jeweiligen Geräte und können diese Zahlen im Normalfall abschätzen. Ein Problem kann die mangelnde Bereitschaft zur Auskunft über den Energiebedarf sein. Aber wenn bei einer konkreten Anfrage ein verbindlicher Wert für den Energiebedarf eingefordert wird, der dann auch nach der Realisierung kontrolliert wird, werden die meisten Hersteller bereit sein, Auskunft zu geben. Nach der Realisierung eines HRLs mit RBGs ist es mit geringem Aufwand möglich, die EE zu überprüfen. Zusammengefasst müssten für einen Einsatz in der Planungsphase, die Hersteller die Energieeffizienz Kennzahl nach Abschnitt 7.1 auswerten und in ihrem Angebot mitangeben.

Bewertung eines realisierten RBGs Das Ziel der Bewertung eines realisierten RBG kann entweder die Überprüfung seiner EE im Zuge der Inbetriebnahme oder die Überprüfung der EE zur Aufdeckung von Verbesserungspotenzialen sein. Wie bereits gezeigt, sind der mittlere Energiebedarf pro Spiel und der Durchsatz sinnvolle Bewertungsgrößen. Diese Größen sollten in der Praxis, im Idealfall bei der Abnahme des RBGs, überprüft werden. Für den Durchsatz kommt dazu das schon erwähnte FEM-Doppelspiel zum Einsatz. Es wurde bereits nachgewiesen, dass sich dieses Spiel auch zur Bestimmung des mittleren Energiebedarfs eignet.

In der FEM 9.851 ist festgelegt, dass ein Testspiel unter festgelegten Betriebsbedingungen je fünfmal durchgeführt und gemessen werden muss. Des Weiteren ist festgelegt, dass die erreichte Spielzeit um 6 % von der berechneten Spielzeit abweichen darf. [FEM-9851]

Im Zuge von Kapitel 4 werden verschiedene Rahmenbedingungen für Messungen festgelegt. Darunter auch die Forderung, dass eine Bewegung oder ein Spiel ca. 20-mal

gefahren werden sollte, damit statistische Einflüsse durch Bildung des Mittelwerts minimiert werden. Dies stellt in der Praxis aber ein Problem dar, denn wenn man konkret in einem HRL ein Doppelspiel mit Ladungswechsel fährt, dann ist danach das Lagerfach der Einlagerung belegt und das Lagerfach der Auslagerung leer. Ergo lässt sich das gleiche Spiel nicht noch einmal fahren. Im Zuge einer Diskussion mit Siciliano³¹ über APLs hat sie dazu eine Idee geäußert. Das FEM-Doppelspiel wird bei Abnahme einfach alternierend vorwärts und rückwärts gefahren. In Abbildung 7-17 ist diese Vorgehensweise illustriert. Das schwarz markierte Spiel stellt das FEM-Spiel vorwärts und das blau markierte Spiel das FEM-Spiel rückwärts dar. Mit dieser Vorgehensweise lässt sich ein Doppelspiel beliebig oft wiederholen, da die Lagerfächer immer abwechselnd gefüllt und anschließend wieder geleert werden.

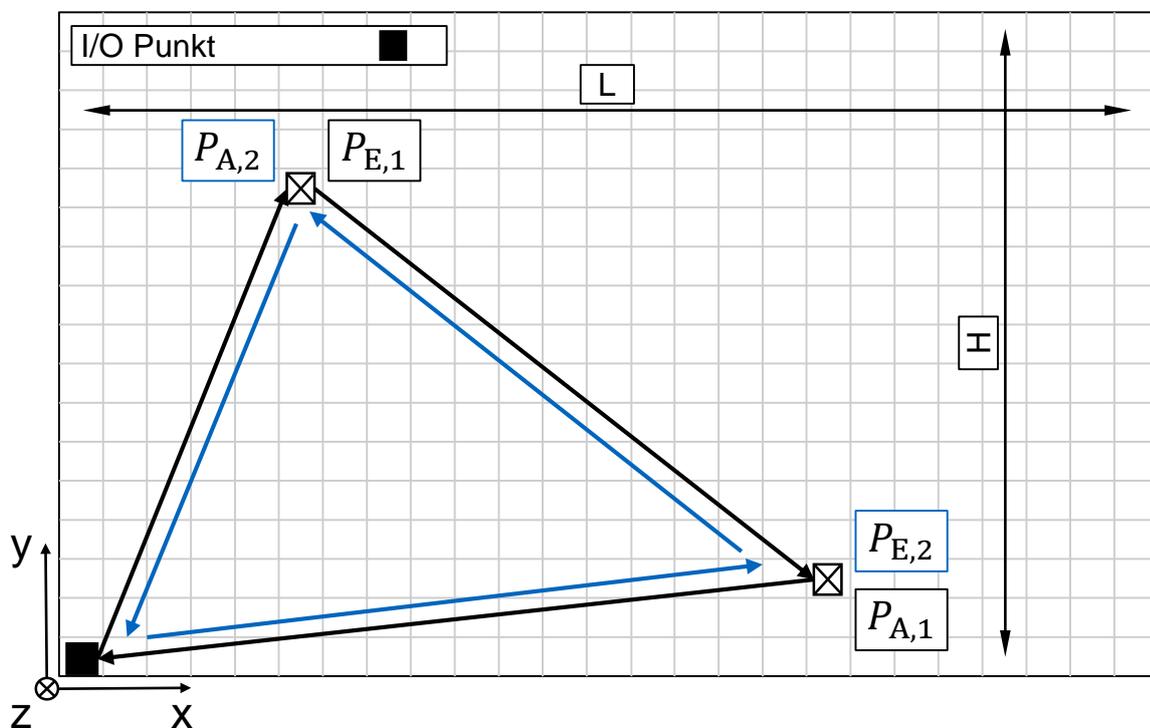


Abbildung 7-17: Schema des FEM-Doppelspiels vorwärts/rückwärts mit $P_{E,1}, P_{A,2}(1/5 \cdot L | 2/3 \cdot H)$ und $P_{A,1}, P_{E,2}(2/3 \cdot L | 1/5 \cdot H)$

Die Auswirkungen auf die Genauigkeit des neuen Spiels werden mithilfe des Simulationsmodells überprüft. Dazu werden analoge Abbildungen wie die in Abschnitt 7.3 verwendet. In Abbildung 7-18 sind die Ergebnisse für den AKL Bereich dargestellt. Der mittlere Fehler sinkt auf $\bar{\epsilon}_{\text{FEM}} = 2,89\%$ und halbiert sich damit fast.

In Abbildung 7-19 sind die Ergebnisse für APLs dargestellt. Hier führt die Modifikation des FEM-Doppelspiels auch zu einer starken Reduktion des mittleren Fehlers auf $\bar{\epsilon}_{\text{FEM}} = -1,56\%$. Dieser liegt sogar leicht im negativen Bereich. Die Werte von $|\bar{\epsilon}_{\text{FEM}}|$

³¹Giulia Siciliano, wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl fml

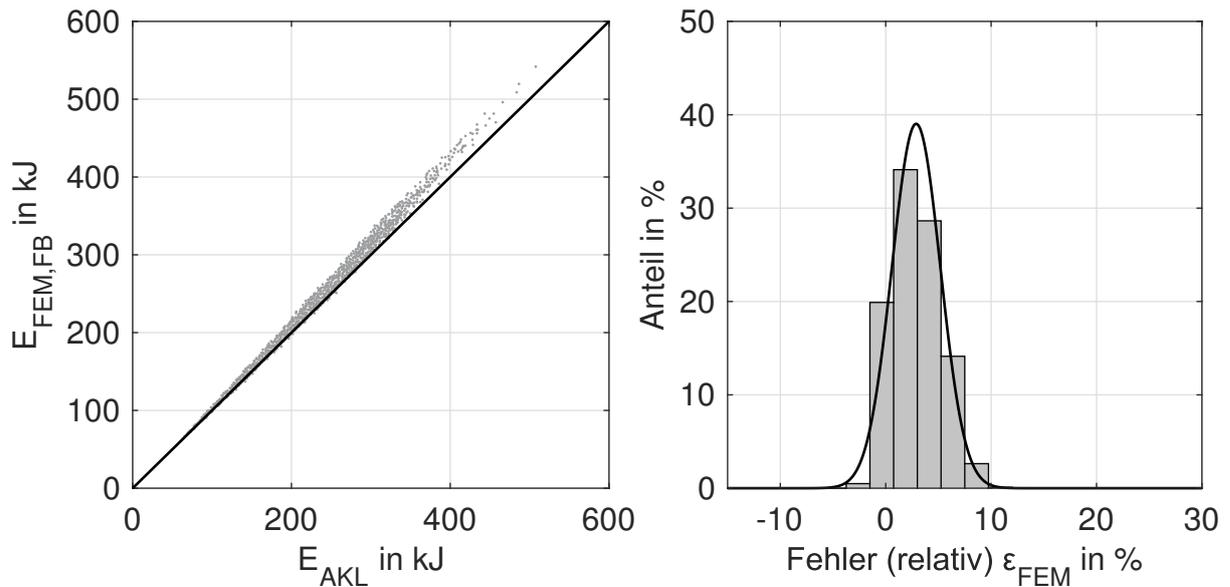


Abbildung 7-18: Vergleich der mittleren Energiebedarfe und der Energiebedarfe des FEM-Doppelspiels vorwärts und rückwärts gefahren und Histogramm des relativen Fehlers mit $\bar{\epsilon}_{FEM} = 2,89\%$ und $\sigma_{\epsilon} = 2,30\%$ für AKL

liegen für AKLs und APLs deutlich unter 5%. Dieser Umstand zusammen mit den niedrigen Werten der Standardabweichung $|\sigma_{\epsilon}| < 2,5\%$ führt zu einer sehr guten Abschätzung des mittleren Energiebedarfs.

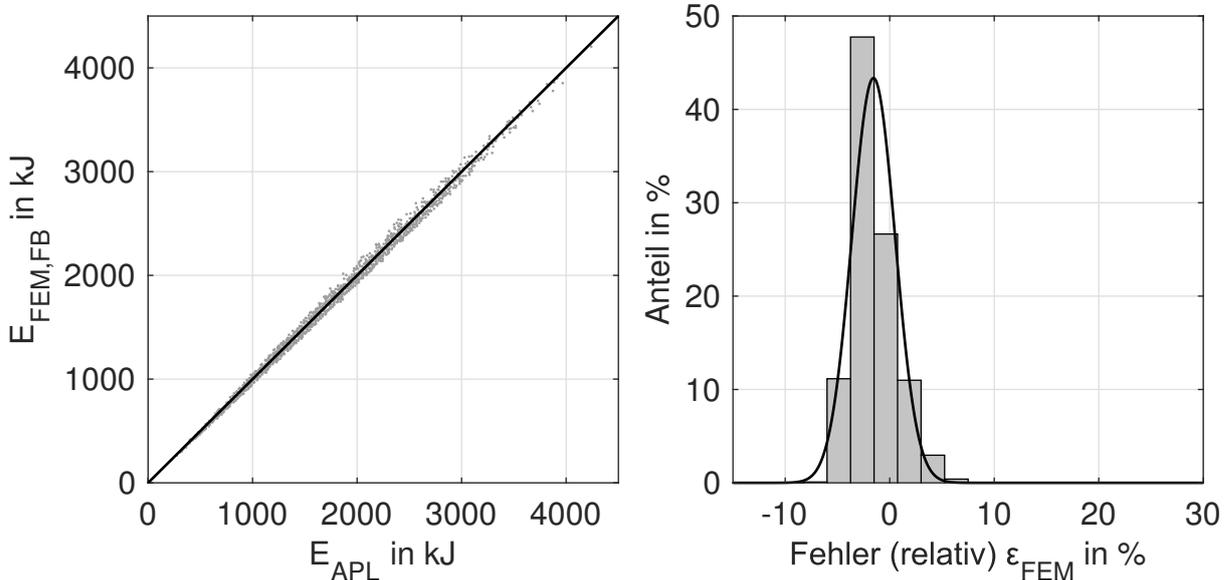


Abbildung 7-19: Vergleich der mittleren Energiebedarfe und der Energiebedarfe des FEM-Doppelspiels vorwärts und rückwärts gefahren und Histogramm des relativen Fehlers mit $\bar{\epsilon}_{FEM} = -1,56\%$ und $\sigma_{\epsilon} = 2,07\%$ für APL

Damit ist diese Methode geeignet, um den mittleren Energiebedarf eines RBGs im Doppelspielbetrieb zu bestimmen. Der Grund für die Abnahme der mittleren Fehler liegt an den unterschiedlichen Anteilen von Fahr- und Hubbewegungen, die mit Nutzlast durchgeführt werden. Die Beladung hat auf die Berechnung der Spielzeit keinen

Einfluss und erzeugt deswegen dort auch keinen Unterschied. Im Falle des normalen FEM Doppelspiels wird nur die Position $P_{E,1}$ beladen angefahren. Dies bedingt einen höheren Energiebedarf als im Mittel erforderlich ist. Wird das Spiel vorwärts und rückwärts gefahren wird auch die Position $P_{E,2}$ beladen angefahren. Der Mittelwert aus dem FEM-Doppelspiel vorwärts und rückwärts gefahren entspricht daher eher dem Mittelwert aller Doppelspiele.

Zusammenhang zwischen Einzel- und Doppelspielbetrieb Die Frage ist, ob ein fester Zusammenhang zwischen Einzel- und Doppelspielbetrieb für Durchsatz und Energiebedarf vorhanden ist? Ausgehend vom Doppelspielbetrieb ließen sich damit die Werte für den Einzelspielbetrieb sehr schnell bestimmen. Berechnet man die Verhältnisse zwischen Doppelspiel und Einzelspiel für Durchsatz und Energiebedarf über alle Konfigurationen hinweg, so erhält man die Werte in Tabelle 7-4.

Tabelle 7-4: Verhältnisse von $TP_{AKL/APL}$ und $E_{AKL/APL}$ im Einzel- und Doppelspielbetrieb

Faktoren	$\frac{TP_{AKL,DS}}{TP_{AKL,ES}}$	$\frac{TP_{APL,DS}}{TP_{APL,ES}}$	$\frac{E_{AKL,DS}}{E_{AKL,ES}}$	$\frac{E_{APL,DS}}{E_{APL,ES}}$
Mittelwert	1,251	1,298	1,500	1,466
Standardabweichung	0,0365	0,0453	0,0300	0,0310

Die Verhältnisse ändern sich tatsächlich für die einzelnen Konfigurationen nur in einem Bereich unter 4%. Für AKLs und APLs zusammengefasst steigt der Durchsatz im reinen Doppelspielbetrieb um 27,5% und der mittlere Energiebedarf pro Spiel um 48,3%. Dadurch ergibt sich eine Reduzierung des Energiebedarfs pro Behälter um 25,85%. Die Unterschiede im Durchsatz bei AKLs und APLs resultieren aus den unterschiedlichen Geschwindigkeitsverhältnissen und den unterschiedlichen Zeiten für einen Ein- bzw. Auslagervorgang.

Im AKL Bereich ergibt sich eine Durchsatzsteigerung um 25,1% und eine Reduktion des Energiebedarfs pro Behälter um 25%. Meneghetti und Monti berechnen eine Steigerung des Durchsatzes von 29,7% und eine Senkung des Energiebedarfs um 26,6% [Men-2011]. Sie spezifizieren den Gerätetyp nicht genauer, aber aufgrund der verwendeten Regalabmessungen, die in der Berechnung verwendet wurden, handelt es sich vermutlich um AKLs.

Im Vergleich kommt Ertl im AKL Bereich auf eine Durchsatzsteigerung von 21,3% und auf eine Reduktion des Energiebedarfs um 24,5% [Ert-2016a, S. 181]. Die errechneten Werte liegen damit nahe an den Daten aus der Literatur.

Die Verhältnisse der Effizienzkennzahlen ergeben sich aus dem Vergleich zu $k_{EE,AKL,DS}/k_{EE,AKL,ES} = 1,67$ und $k_{EE,APL,DS}/k_{EE,APL,ES} = 1,77$. Damit lässt sich für einen Mischbetrieb mit einem festen Anteil an Doppelspielen Q_{DS} die Effizienzkennzahl nach Gleichung 7-5 berechnen.

$$k_{EE} = k_{EE,DS} \cdot Q_{DS} + k_{EE,DS} \cdot (1 - Q_{DS}) \cdot \left(\frac{k_{EE,AKL/APL,DS}}{k_{EE,AKL/APL,ES}} \right)^{-1} \quad (7-5)$$

Diese, für eine festgelegte Doppelspielquote berechnete Kennzahl, kann dann mithilfe der Klassifizierung eingeordnet werden.

8 Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Kapitels werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zunächst noch einmal aufgegriffen und vorhandene Limitationen aufgezeigt. In Abschnitt 8.1 werden die Ergebnisse für verschiedene potenzielle Nutzergruppen eingeordnet. Dazu werden auch Aspekte aus den Zwischenfazit noch einmal wiedergegeben. Zusätzlich werden einzelne Handlungsempfehlungen abgeleitet, danach wird in Abschnitt 8.2 eine Abschätzung der Relevanz vorgenommen. Abschließend erfolgt in Abschnitt 8.3 eine explizite Beantwortung der gestellten Forschungsfragen.

8.1 Diskussion und Ableitung von Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse der Arbeit beziehen sich auf drei unterschiedlichen Gruppen (Personenkreisen), die sich mit RBGs befassen:

- Hersteller von RBGs
- Planer*innen von automatischen HRLs mit RBGs
- Betreiber*innen von automatischen HRLs mit RBGs.

Im Rahmen der Diskussion wird der Nutzen für diese Gruppen jeweils explizit hervorgehoben, um den Wissenstransfer an dieser Stelle zu erleichtern. Im Stand der Technik und der Ableitung der Forschungsfrage werden keine wesentlich neuen Erkenntnisse erörtert. Die entwickelte Definition für RBG wurde im bereits veröffentlichten Forschungsbericht vorgestellt [Fot-2018, S. 6–7].

Die in Kapitel 3 vorgestellte Vorgehensweise ist grundsätzlich geeignet, um das Forschungsziel zu erreichen. Die Forschungsfragen konnten mithilfe des entwickelten Vorgehens beantwortet werden. Die Vorgehensweise bei der Entwicklung der Kennzahl wurde für RBGs beispielhaft angewendet und getestet. Ob sie sich auch für andere Fördermittel eignet, muss gesondert untersucht werden. Es lässt sich aber vermuten, dass die Vorgehensweise grundsätzlich auch für andere Geräte geeignet ist. Wenn sich der Nutzen quantifizieren und ein sinnvoller Parameterraum definieren lässt, in dem Nutzen und Energiebedarf mittels Berechnung oder Simulation bestimmt werden können, ist auch eine Bewertung der EE möglich.

Die Messungen an RBG-1 bis -4, die in Kapitel 4 beschrieben werden, stellen eine erste Grundlage für die weiteren Untersuchungen dar. An RBG-1 konnten die umfangreichsten Messungen durchgeführt werden. Um diese Messungen durchführen zu

können, waren mehrere Wochen an Vorbereitung und viele verschiedene Tests am Gerät notwendig. Die Messreihen selbst dauerten jeweils mehrere Stunden. Für die drei weiteren RBGs waren derart umfangreiche Vorbereitungsarbeiten und Messungen an den Geräten nicht durchführbar. Der Kommunikationsaufwand, um im Vorfeld der Messungen an RBG-2, -3 und -4 Zugang zu den Anlagen zu bekommen, war hoch. Die jeweiligen Betreiber*innen konnten nur einen kurzen Zeitraum für die Durchführung von Messungen im HRL zur Verfügung stellen. Insgesamt konnten vier Geräte mithilfe von Messungen untersucht werden. Das erscheint erst einmal wenig, ist aber in Anbetracht des hohen Aufwands ausreichend. Problematisch war vor allem die Einschränkung, die Antriebe vor den Messungen der Einzelfahrten an RBG-2 und RBG-3 nicht warm fahren zu können. Diese Einschränkung führt, in Kombination mit der geringen Anzahl der Wiederholung an Fahrten, zu einer eingeschränkten Genauigkeit der Ergebnisse. Im Rahmen der Betrachtung bzw. der Verwendung dieser Ergebnisse spielt das aber nur eine geringe Rolle. Die fehlende Warmfahrzeit äußert sich in schlechteren Wirkungsgraden, die für die Validierung verwendet werden. Die Erkenntnisse aus den vier untersuchten RBGs eignen sich grundsätzlich als Grundlage für das Simulationsmodell.

Unabhängig von der Nutzung der Ergebnisse zum Aufbau des Simulationsmodells konnten einige Erkenntnisse direkt aus den Messungen abgeleitet werden. Für Hersteller und Betreiber*innen sind die Erkenntnisse zur Durchführung von Leistungsmessungen an RBGs hilfreich. Zur Bestimmung des Energiebedarfs einer Fachanfahrt sollte der Mittelwert von ca. 20 einzelnen Fachanfahrten verwendet werden. Auch die Ergebnisse zum Warmlaufverhalten lagen bis jetzt nicht in dieser Detaillierung vor. Unter Berücksichtigung des Warmlaufverhaltens können Hersteller genauere Messungen an ihren Anlagen durchführen und damit auch ihre eigenen Modelle besser validieren. Auch für Betreiber*innen, die genaue Messungen an ihren Anlagen durchführen wollen, ist das Warmlaufverhalten wichtig. Die Größenordnung des Warmlaufeffekts kann mit ca. 5 % beziffert werden.

Für Hersteller sind weiters die Ergebnisse zum Einfluss der Beschleunigung und des Rucks hilfreich. Gerade der geringe Einfluss des Ruckverhältnisses auf den Energiebedarf lässt Spielräume in der optimalen Auslegung des Beschleunigungsprofils zu. Dieses kann zu einer geringeren Schwingungsanregung des Masts und damit zu kürzeren Ausschwingzeiten hin optimiert werden. Die Ausschwingzeit ist jene Zeit, die der Mast nach Anregung durch eine Bewegung in x-Richtung braucht, um wieder zur Ruhe zu kommen. Die Schwingungsanregung konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht hinreichend genau untersucht werden und ist deshalb Gegenstand des Ausblicks.

Die Erkenntnisse zu den hohen Leistungsspitzen im Vergleich zur geringen mittleren Leistung sind für Planer*innen hilfreich. Sie zeigen das Potenzial der Nutzung von Zwischenspeichern im RBG auf. Solche Zwischenspeicher sind in der Lage Leistungsspitzen effektiv zu reduzieren [Irr-2016]. Gleichzeitig geben die gemessenen Leistungs-

verläufe der verschiedenen Geräte einen Eindruck, mit welchen Anschlussleistungen beim Einsatz von RBGs in AKLs und APLs gerechnet werden kann. Die Bedeutung des Einflusses der Grundlast für den realen Betrieb wird mit den Messungen unterstrichen. Abhängig vom Verhältnis Betriebs- zu Stillstandszeit kann abgeschätzt werden, wie wichtig die Realisierung von Standby Maßnahmen ist. Je größer die Stillstandszeit ist, desto wichtiger wird die Umsetzung von Maßnahmen, die die Grundlast außerhalb des Betriebs verringern.

Folgende Handlungsempfehlungen werden abgeleitet:

- Die Betriebsbedingungen müssen bei jeder Messung gleich sein, das heißt es müssen die gleichen stationären Verbraucher in Betrieb sein.
- Das Messgerät sollte bei jeder Messung am gleichen Anschlusspunkt angeschlossen werden.
- Eine Bewegung oder ein Spiel sollte wenigstens 20-mal gefahren und gemessen werden, um durch Mittelwertbildung statistische Effekte herauszurechnen.
- Bei Leistungsmessungen an RBGs treten Warmlaufeffekte auf. Diese sollten für die repräsentative Ermittlung von Messwerten berücksichtigt werden.
- Die Umgebungsbedingungen wie Temperatur oder weitere Besonderheiten müssen dokumentiert werden, um die Interpretation der Ergebnisse zu ermöglichen.
- Mithilfe von Standby Maßnahmen zur Reduktion der Grundlast in Stillstandszeiten kann der Energiebedarf eines RBGs reduziert werden.
- Die Installation einer Rückspeiseeinheit sollte vor allem dann realisiert werden, wenn ein RBG wenig Stillstandszeit aufweist.

Die Erkenntnisse aus der Entwicklung des Simulationsmodells sind am ehesten für Hersteller interessant. Das entwickelte Simulationsmodell orientiert sich an vorhandenen Modellierungsansätzen, die auf Basis einfacher Gleichungen funktionieren. Zusätzlich wird diese Art der Modellierung um die theoretischen Leistungsverläufe erweitert. Diese stellen eine einfache Methode dar, um die Genauigkeit des Modells deutlich zu erhöhen und dabei gleichzeitig die Rechenzeit niedrig zu halten. Gerade in MATLAB, der benutzten Simulationsumgebung, können die theoretischen Leistungsverläufe mithilfe eines speziellen Datentyps sehr effizient behandelt werden. Die getroffenen Vereinfachungen schränken die Genauigkeit des Modells für die Simulation eines einzelnen RBGs ein. Für eine Abschätzung des Energiebedarfs ist sie grundsätzlich dann geeignet, wenn man für die Wirkungsgrade auf Erfahrungswerte zurückgreifen kann. Alternativ ist eine Orientierung an den Werten in dieser Arbeit möglich.

Eine berechtigte Frage ist, warum kein detailliertes Modell mit vollständiger zeitlicher Auflösung der Leistung verwendet wurde? Wie bereits in Abschnitt 5.3 beschrieben, ist die notwendige Kalibrierung für ein solches Modell für viele Geräte nicht sinnvoll. Diese ließe sich mithilfe der Variation aller notwendigen Parameter umgehen. Damit wäre der verbundene Anstieg der Rechenzeit in den Simulationsstudien, aber nicht

mehr tragbar. Gleichzeitig konnte mit Studie 2 gezeigt werden, dass der Ergebnisraum der Geräte sich dadurch nicht mehr sehr stark verändert. Für die Studie 1 wurden 10 Rechner mit jeweils 6 Prozessorkernen eingesetzt und die Rechenzeit betrug hier bereits mehrere Tage. Beim Einsatz eines komplexeren Modells wird sich diese Rechenzeit vermutlich auf einige Wochen ausdehnen.

Die Parameter der Simulationsstudien decken einen Großteil der in der Praxis eingesetzten Geräte ab. Es gibt natürlich trotzdem RBGs, die nicht in diesem Parameterraum auftauchen. Die festgelegte Kennzahl lässt sich dann zwar noch anwenden, aber die Klassifizierung ist nicht mehr unbedingt zielführend. Ein anderer Kritikpunkt ist die Einschränkung der Betrachtung auf einfachtiefe Lager. In Voruntersuchungen im Rahmen einer Studienarbeit wurde der Einfluss verschiedener Lagertiefen betrachtet [Kar-2019, S. 38–39]. Der Einfluss der Lagertiefe hängt stark davon ab, ob Umlagerungen berücksichtigt werden. Zusätzlich hängt er von weiteren strategischen Parametern ab. Nachdem diese Einflüsse nicht berücksichtigt werden, wird auch keine mehrfachtiefe Lagerung betrachtet.

Folgende Handlungsempfehlungen werden abgeleitet:

- Zur Simulation einer großen Anzahl von RBGs sollte ein vereinfachtes Modell auf Basis von analytischen Gleichungen mit der Erweiterung von theoretischen Leistungsverläufen verwendet werden.
- Für die Simulation des Verhaltens eines einzelnen RBGs bietet sich ein Simulationsmodell mit vollständiger zeitlicher Auflösung des Leistungsverlaufs an. Dieses muss dann vor der Verwendung kalibriert werden.

Die Simulationsergebnisse stellen einen umfangreichen Überblick der verschiedenen Zusammenhänge dar. Das macht die konkrete Nutzung aber nicht unbedingt einfacher, da zunächst einmal sehr viele Ergebnisse kompakt beschrieben werden. Ein in Studie 1 nicht untersuchter Faktor ist der Einfluss einer veränderten Grundlast. Hierbei wäre es zweckmäßiger, den Einfluss der Grundlast auf den Energiebedarf in Abhängigkeit von einer variablen Stillstandszeit zu untersuchen. Dass der Einfluss grundsätzlich groß ist, kann anhand der Messergebnisse vermutet werden. Die Stillstandszeit hängt stark vom realen Betrieb eines Geräts ab. Sie wird deshalb bei der Bestimmung der EE eines RBGs nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisräume können zur Abschätzung des Energiebedarfs pro Spiel bei vorgegebenem Durchsatz hilfreich sein. Allerdings entsteht hier nur ein sehr grober Überblick. Die Pearson Korrelationen bieten einen Einblick in die Verteilung der verschiedenen simulierten Konfigurationen in Abhängigkeit von den einzelnen Variablen. Für Hersteller sind dann vor allem die Haupteffektdiagramme hilfreich, um eine Priorisierung von Parametern für mögliche Verbesserungen durchführen zu können.

Für Planer*innen können die Ergebnisse auch hilfreich sein. Die Pearson Korrelationsdiagramme können zur Abschätzung des Durchsatzes verwendet werden. Die Haupt-

effektdiagramme liefern Informationen, welche Parameter Durchsatz und Energiebedarf am stärksten beeinflussen. Zur Abschätzung des mittleren Energiebedarfs kann der Energiebedarf des Referenzspiels verwendet werden. Dies stellt eine sehr gute Näherung, die gleichzeitig einfach ausgewertet werden kann, dar. Es werden keine numerischen Gleichungen zur vereinfachten Berechnung des mittleren Energiebedarfs postuliert.

Für den RWF können auf Basis der Daten keine eindeutigen Empfehlungen gegeben werden. Tendenziell werden hohe Durchsätze ab einem Regalwandfaktor von $RWF > 0,75$ erreicht. Der mittlere Energiebedarf steigt bis zu einem $RWF = 1,0$ deutlich, danach verlaufen Durchsatz und Energiebedarf auf relativ konstanten Niveau. Unter Einbeziehung der Ergebnisse für k_{EE} kann für Planer*innen ein RWF im Bereich von 0,75 empfohlen werden.

Folgende Handlungsempfehlungen werden abgeleitet:

- Masseneinsparungen lohnen sich beim Hubwerk deutlich mehr, da damit der Energiebedarf von Bewegungen in x- und y-Richtung reduziert wird.
- Die Geschwindigkeit und Beschleunigung in y-Richtung können erhöht werden, ohne den mittleren Energiebedarf wesentlich zu erhöhen. Durch eine Erhöhung dieser Parameter steigt hauptsächlich der Durchsatz.
- Der Einsatz einer Rückspeiseeinheit lohnt sich besonders bei APLs, allerdings ist der Nutzen im praktischen Einsatz auch von der Auslastung des RBGs abhängig.
- Tendenziell sollten Rückspeiseeinheiten gerade im APL Bereich eingesetzt werden.
- Ein Regalwandfaktor im Bereich von 0,75 liefert tendenziell effizientere HRLs. Dieser Wert kann damit als Grundlage für Auslegungen verwendet werden.

Die entwickelte Kennzahl an sich stellt einen Versuch dar, möglichst viele Aspekte zu berücksichtigen. Sie vernachlässigt aber gleichzeitig auch einige Aspekte. Vernachlässigt werden unter anderem Zonierungen, Ein- und Auslagerstrategien, Umlagerungen, unterschiedliche Lagertiefen, die Kanalbelegung und verschiedene Artikelverteilungen. Bei der Bewertung von Geräten wird eine Bewertung umso komplexer in der Anwendung, je mehr Aspekte sie berücksichtigt. Es muss also stets ein Abwägen erfolgen, wie viel Komplexität für eine Bewertung sinnvoll sind. In diesem Fall wurden die am Beginn von Abschnitt 7.1 beschriebenen Aspekte und Parameter berücksichtigt. Dazu zählen das nutzbare Lagervolumen, der Durchsatz, die durchschnittliche Masse einer Ladeinheit und der mittlere Energiebedarf.

Die Ergebnisse zur Kennzahl sind für Hersteller und Planer*innen besonders interessant. Die Korrelationen und Haupteffekte liefern Erkenntnisse, um RBGs effizienter auszulegen. Die Klassifizierung auf Basis der Gesamtheit der Geräte ist transparent und nachvollziehbar. Sie verzichtet vollständig auf die Verwendung eines Referenzgeräts. Damit geht sie einem oft vorgebrachten Kritikpunkt der Klassifizierung der meisten Haushaltsgeräte aus dem Weg. Zur Bewertung der Energieeffizienz kann, das

nach FEM 9.851 definierte Doppelspiel, vorwärts und rückwärts gefahren, verwendet werden. Mit dessen Hilfe lassen sich sowohl mittlerer Durchsatz, als auch mittlerer Energiebedarf zuverlässig bestimmen. Damit wird auch Betreiber*innen eine einfache Methode zur nachträglichen Überprüfung der EE ihres RBGs beschrieben. Zusätzlich wurden die Verhältnisse zwischen Einzel- und Doppelspielbetrieb für Durchsatz, Energiebedarf und Effizienzkennzahl hergeleitet. Diese Verhältnisse stellen für Planer*innen ein praktisches Hilfsmittel in der Auslegung dar.

Folgende Handlungsempfehlungen werden abgeleitet:

- Das FEM-Doppelspiel, vorwärts und rückwärts gefahren, kann sowohl zur Bestimmung des mittleren Durchsatzes, als auch zur Bestimmung des mittleren Energiebedarfs verwendet werden.
- Da die Geschwindigkeit und Beschleunigung in y-Richtung erhöht werden können, ohne den mittleren Energiebedarf wesentlich zu erhöhen, bewirkt ihre Erhöhung auch eine Zunahme der von k_{EE} .

8.2 Abschätzung der Relevanz dieser Arbeit

In Deutschland sind zum jetzigen Stand eine Vielzahl von automatischen HRLs mit RBGs im Einsatz. Im Jahr 2005 waren laut Günthner et al. über 16 000 RBGs in Betrieb [Gün-2009b]. In den für [Rüc-2018c] ausgewerteten Anwenderstatistiken der Materialfluss Markt konnten von 2006 bis 2016 ca. 1650 hinzugekommene RBGs detektiert werden. Dabei gibt es aber aufgrund fehlender Meldungen einiger Hersteller eine Dunkelziffer. Im Rahmen dieser Arbeit wird die derzeit in Betrieb befindliche Zahl an RBGs auf ca. 20 000 geschätzt. Der Betrachtung werden folgende weitere Annahmen zugrunde gelegt:

- eine mittlere Leistung von 5000 W pro Gerät während des aktiven Betriebs
- eine Standby Leistung von 750 W außerhalb des aktiven Betriebs
- 220 Betriebstage pro Jahr mit 12 h Betriebszeit und 12 h Standby Zeit
- 140 Stillstandstage mit und 24 h Standby Zeit
- 5 Tage ohne Leistungsaufnahme im Rahmen von Wartungsarbeiten und außerplanmäßige Stillstandszeiten
- ein CO₂-Koeffizient für den deutschen Strommix im Jahr 2020 nach einem Bericht des Umweltbundesamts von 366 g/kWh [Ich-2021, S. 10].

Damit ergeben sich folgende Ergebnisse:

- auf ein Jahr ohne die 5 Stillstandstage gemittelte Leistung pro Gerät ca. 2050 W
- Energiebedarf pro Jahr und Gerät 17 700 kWh
- gesamter Energiebedarf pro Jahr 354 000 000 kWh
- gesamter dadurch verursachter CO₂ Ausstoß pro Jahr ca. 130 000 t.

In Abschnitt 2.2 wurde bereits eine Einschätzung zum Einfluss einer Bewertung und Klassifizierung der EE auf den Energiebedarf von Geräten gegeben. Im Sektor der Haushaltsgeräte wurde für das Jahr eine gesamte Einsparung von ca. 10 % errechnet [Wie-2020, S. 8–9]. Diese Einsparung ergibt sich natürlich erst einige Jahre nach der Einführung einer entsprechenden Klassifizierung. Nimmt man eine Reduktion von 10 % im Bereich der RBGs in Deutschland an, so lassen sich potenziell 35 400 000 kWh elektrische Energie und ca. 13 000 t CO₂ einsparen. Rechnet man mit dem Strompreis von 2021, also 0,1825 €/kWh, so ergibt sich eine potenzielle Einsparung von ca. 6,5 Millionen Euro [BDE-2021, S. 26].

Die tatsächliche Zunahme der EE von RBGs durch Einführung einer Bewertung und Klassifizierung kann auf Basis vorhandener Daten nicht abgeschätzt werden. Die getroffene Einschätzung zeigt, dass die aktuelle monetäre Einsparung nicht sehr hoch ist. Diese wird jedoch in den nächsten Jahren aufgrund steigender Strompreise weiter zunehmen. Zusätzlich stellt diese Arbeit eine Grundlage für die mögliche Entwicklung weiterer Bewertungen im Bereich anderer Fördermittel der Intralogistik dar. Abschließend kann festgehalten werden, dass den in Kapitel 1 beschriebenen Herausforderungen nur begegnet werden kann, wenn in allen Bereichen unseres Lebens und Wirtschaftens sowohl große als auch kleine Verbesserungen umgesetzt werden.

8.3 Beantwortung der Forschungsfragen

Nach der abschließenden Diskussion und der Einordnung der Ergebnisse werden die gestellten Forschungsfragen noch einmal kurz und explizit beantwortet.

Forschungsleitende Frage Wie kann die Energieeffizienz von Regalbediengeräten in automatischen Hochregallagern mit Kleinladungsträgern oder Paletten bewertet und klassifiziert werden?

Die Bewertung der EE kann mithilfe einer Effizienzkennzahl, die ein Verhältnis von Nutzen und Energiebedarf darstellt, durchgeführt werden. Zum Nutzen zählt das nutzbare Lagervolumen, der Durchsatz und die durchschnittliche Masse der bewegten Ladeeinheiten. Verwendet wird jener mittlere Energiebedarf, der zum Erreichen des Durchsatzes notwendig ist. Für die Klassifizierung kann ein festgelegter Parameterraum zur Abbildung der marktüblichen Geräte verwendet werden. Die Klassifizierung erfolgt auf Basis der Verteilung der einzelnen Effizienzkennzahlen innerhalb dieses Parameter-raums. Für RBGs kann die Einteilung der Effizienzkennzahl in Klassen auf Basis einer Normalverteilung erfolgen.

Unterfragen

1. Was ist bei der Aufnahme von Messdaten an RBGs zu beachten?
Es müssen Warmlaufeffekte, statistische Effekte, der Anschlusspunkt des Messgeräts und die Umgebungsbedingungen, wie zum Beispiel die Temperatur im HRL, beachtet werden.
2. Wie kann ein Simulationsmodell für die Untersuchung von Durchsatz und Energiebedarf von AKLs und APLs bei einer hohen Anzahl an untersuchten Konfigurationen gestaltet werden?
Das Modell kann auf Basis von analytischen Gleichungen und theoretischen Leistungsverläufen aufgebaut werden. Zusätzlich ist eine Trennung der Berechnungsaufgaben sinnvoll. Es werden die Aufgaben der Auftragslistengenerierung, der Berechnung von Leistungsverläufen und Spielzeiten und die Berechnung des Energiebedarfs voneinander getrennt. Damit können einzelne Teilaufgaben unabhängig ausgeführt werden. Vor allem werden damit unnötige Wiederholungen bei der Ausführung einzelner Rechenabläufe vermieden und die Rechenzeit insgesamt gering gehalten.
3. Wie können die Effekte verschiedener Parameter auf Durchsatz und Energiebedarf von AKLs und APLs untersucht werden?
Diese Effekte können aus den Ergebnisdaten mithilfe der Pearson Korrelation und Regressionsmodellen erfasst werden. Die Ergebnisdaten werden aus einer Simulationsstudie mit einer großen Anzahl an untersuchten Konfigurationen gewonnen.
4. Wie sehen Referenzspiele für den mittleren Energiebedarf eines RBGs aus?
Als Referenzspiel für den mittleren Energiebedarf eines RBGs kann das nach FEM 9.851 definierte Doppelspiel vorwärts und rückwärts gefahren verwendet werden.
5. Welche Einflussgrößen beschreiben den Nutzen beim Betrieb eines RBGs?
Als Nutzen wird das Produkt des nutzbaren Lagervolumens, des mittleren Durchsatzes und der mittleren Masse einer transportierten Ladeinheit verwendet.
6. Wie ist eine geeignete Effizienzkennzahl für RBGs definiert?
Eine geeignete Effizienzkennzahl für RBGs ist als Verhältnis von Nutzen und mittlerem Energiebedarf definiert.
7. Wie kann eine Klassifizierung der EE auf Basis der physikalischen Eigenschaften von RBGs stattfinden? Diese Klassifizierung kann auf Basis der Verteilung aller Effizienzkennzahlen innerhalb des festgelegten Parameterraums erfolgen. Dazu werden die Effizienzkennzahlen auf Basis einer Normalverteilung eingeteilt.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Bewertung und Klassifizierung von RBGs in automatischen HRLs vorgestellt. In Kapitel 1 wird zunächst die Bedeutung der modernen Intralogistik kurz umrissen. Danach werden insbesondere die steigenden Anforderungen an die EE in der Intralogistik beschrieben. Nach dieser Beschreibung der Ausgangslage folgt eine Beschreibung der Problemstellung und Zielsetzung. Den Abschluss des Kapitels bildet die Erläuterung der Vorgehensweise zur Erreichung des Forschungsziels und die Beschreibung des Aufbaus der Arbeit.

Der Stand der Wissenschaft wird in Kapitel 2 dargelegt. Im Rahmen des Kapitels werden neben den notwendigen theoretischen Grundlagen auch die relevanten Forschungsarbeiten beschrieben. Im ersten Abschnitt werden die technischen Details automatischer HRLs mit RBGs dargelegt. Darunter fallen Beschreibungen des Aufbaus, der elektrischen Antriebe und Verbraucher, der Spielarten und der Kinematik. Gleichzeitig wird die Systemgrenze für die Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit definiert. Im zweiten Abschnitt werden weitere relevante Forschungsarbeiten, die zur Ableitung der Forschungslücke herangezogen werden, erläutert. Auf Basis der dargelegten Grundlagen und Forschungsergebnisse werden die forschungsleitende Fragen und die dazugehörigen Unterfragen abgeleitet.

In Kapitel 3 wird eine Vorgehensweise zur Entwicklung der Bewertung und Klassifizierung vorgestellt. Dieses Vorgehen besteht aus sechs einzelnen Schritten, die jeweils detailliert erläutert werden.

In Kapitel 4 werden zunächst die vier mittels Messungen untersuchten RBGs beschrieben. Im Anschluss folgt eine kurze Erläuterung der Grundlagen zu den Leistungsmessungen. Danach werden die Messungen und die Messergebnisse an den vier Geräten dargestellt. Es werden Einzelfahrten vermessen und Kurzzeit- und Langzeitmessungen durchgeführt. Dabei werden unter anderem Erkenntnisse zum Warmlaufverhalten, zum Einfluss kinematischer Parameter, zum Einfluss der Grundlast und zum Einsatz einer Rückspeiseeinheit gewonnen. Zusätzlich werden auch Ergebnisse aus Beschleunigungsmessungen an zwei RBGs vorgelegt. Die Ergebnisse der Einzelfahrten werden zur Validierung des Simulationsmodells verwendet.

Die Untersuchung von Durchsatz und Energiebedarf über Simulationen wird in Kapitel 5 beschrieben. Dazu werden zunächst die Grundlagen des Modells, seine Architektur und die getroffenen Annahmen und Einschränkungen beschrieben. Anschließend folgt eine detaillierte Beschreibung der Simulation der Energie- und Zeitbedarfe für die Bewegungen eines RBGs. Dabei wird insbesondere auf die Verwendung von theore-

tischen Leistungsverläufen eingegangen. Diese stellen eine wichtige Erweiterung des auf analytischen Gleichungen basierenden Modells dar. Danach wird die Validierung des Modells mithilfe von Messdaten erläutert. Die Abweichungen sind mit weniger als 10 % in einem tolerierbaren Rahmen. Abschließend wird in diesem Kapitel die Planung der beiden Simulationsstudien beschrieben. Darunter fällt die Beschreibung der variierten und der festen Parameter und ihren Ausprägungen in Studie 1 und Studie 2. Die Ergebnisse der Simulationsstudien finden sich in Kapitel 6. Im Rahmen dieser wird eine große Anzahl von RBGs untersucht. Dazu wird zunächst der Ergebnisraum der Studie 1 betrachtet. Erste Zusammenhänge werden anschließend mithilfe der Pearson Korrelation analysiert. Mithilfe eines quadratischen Regressionsmodells werden die Effekte der einzelnen Parameter auf Durchsatz und Energiebedarf in absoluter und relativer Form abgebildet. Zusätzlich werden die Verläufe der Effekte mit den Adjusted responses Darstellungen sichtbar gemacht. Damit werden die Einflüsse der Parameter umfassend dargestellt und analysiert. Um konkrete Anhaltspunkte für die praktische Auslegung von HRLs zu erhalten, wird die Definition des Regalwandfaktors erweitert und die Ergebnisdaten in Abhängigkeit des Regalwandfaktors betrachtet. Abschließend werden die Einflüsse der in Studie 2 variierten Parameter eingeordnet und beschrieben.

In Kapitel 7 wird die Entwicklung der Bewertung und Klassifizierung von RBG erläutert. Zunächst wird die Definition der Effizienzkenzahl und ihre Untersuchung in Studie 1 vorgestellt. Dazu werden analog zu den Simulationsergebnissen aus dem vorherigen Kapitel die Pearson Korrelation und Regressionsmodelle eingesetzt. Im dann folgenden Abschnitt wird eine Untersuchung zu Referenzspielen für den mittleren Energiebedarf präsentiert. In dieser konnte das in FEM 9.851 definierte Doppelspiel als geeignetes Referenzspiel für die Bestimmung des mittleren Energiebedarfs und damit der Energieeffizienz bestätigt werden. Zum Abschluss des Kapitels werden Empfehlungen für die praktische Umsetzung einer Bewertung gegeben.

Nach der Vorstellung der Ergebnisse werden diese in Kapitel 8 diskutiert. Dabei werden die wichtigsten Ergebnisse für einzelne Nutzergruppen eingeordnet und durch Handlungsempfehlungen ergänzt. Die im Rahmen dieser Dissertation aufgestellten Forschungsfragen werden abschließend noch einmal beantwortet.

9.2 Ausblick

Im Rahmen der Untersuchungen wurden an verschiedenen Stellen Vereinfachungen getroffen, die im Rahmen weiterer Untersuchungen betrachtet werden sollten. Zusätzlich wurden weitere mögliche Forschungsansätze identifiziert. Die einzelnen Aspekte werden analog zur Reihenfolge der Untersuchungen in der Arbeit beschrieben.

Der Zusammenhang zwischen dem Ruckverhältnis und der Schwingungsanregung des Masts konnte an RBG-1 nicht zufriedenstellend untersucht werden. Der Mast ist nicht hoch genug und dabei gleichzeitig zu steif, um ein ausgeprägtes Schwingungsverhalten zu besitzen. Der Zusammenhang zwischen Ruckverhältnis und Schwingungsanregung kann vor allem für die Auslegung von APLs interessant sein. Im APL Bereich werden größere Bauhöhen realisiert und diese Geräte weisen dadurch längere Ausschwingzeiten auf.

Die vorliegende Arbeit deckt bereits einige Parameter im Rahmen der Simulation von Durchsatz und Energiebedarf von verschiedenen RBGs ab. Es existieren aber darüber hinaus weitere Parameter, die nicht untersucht wurden. Es wird zum Beispiel keine Bremsenergienutzung mit Superkondensatoren betrachtet. Auch die Lage des I/O-Punkts wird nicht als Parameter verwendet. Eine detailliertere Untersuchung ein- und mehrfachtiefer HRLs unter Einbeziehung weiterer strategischer Parameter könnte auf Basis der Erkenntnisse aus dieser Arbeit und der Arbeit von Karzel angestoßen werden [Kar-2020]. Dabei könnten insbesondere Strategien zur Zonierung der Lagerplätze und zur Steuerung von Umlagerungen untersucht werden. Zusätzlich sollten unterschiedliche Verhältnisse aus Betriebs- und Stillstandszeit berücksichtigt werden. Damit ließen sich weitere Aspekte für einen möglichst effizienten Betrieb von HRLs mit RBGs ableiten.

Diese Dissertation kann die Grundlage für die Entwicklung einer Bewertungsrichtlinie für die EE von RBGs analog zur VDI 4707 für Aufzüge darstellen [VDI-4707-1]. Für eine Richtlinie müssen einerseits genauere Rahmenbedingungen für die Ermittlung der Kennzahl und Grenzen für die Anwendung dieser Richtlinie festgelegt werden. Dabei muss vor allem sichergestellt werden, dass die Ermittlung von mittlerem Durchsatz und Energiebedarf auf Basis des Referenzspiels exakt und nachvollziehbar abläuft. Andererseits muss der festgelegte Parameterraum mit Unternehmen abgestimmt und eventuell erweitert werden.

Die vorgestellte Methode zur Bewertung und Klassifizierung von RBGs auf Basis der Simulation ihrer möglichen Konfigurationen lässt sich grundsätzlich auch auf weitere Fördermittel in der Intralogistik übertragen. Naheliegend ist eine Übertragung der vorgestellten Bewertung auf den Bereich der automatischen HRLs mit Satellitenfahrzeug-Systemen.

Literaturverzeichnis

- [Ali-2018] Alias, C. et al.: An Overview of Warehousing Applications based on Cable Robot Technology in Logistics. In: Proceedings: IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SO-LI) (2018), S. 236–243.
- [Alt-2010] Altintas, O.; Avsar, C.; Klumpp, M.: Change to Green in Intralogistics. In: Proceedings: The 2010 European Simulation and Modelling Conference (2010), S. 373–377.
- [Azz-2011] Azzi, A. et al.: Innovative travel time model for dual-shuttle automated storage/retrieval systems. In: Computers & Industrial Engineering 61.3 (2011), S. 600–607.
- [BDE-2021] BDEW: Strompreisanalyse Januar 2021. Hrsg. von Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft. 2021.
- [Ber-2002] Berg, J. van den: Analytic expressions for the optimal dwell point in an automated storage/retrieval system. In: International Journal of Production Economics 76.1 (2002), S. 13–25.
- [Ber-2018] Berger, B.: RBG mit Mehr-Leistung. Software SEOS steigert die Performance von Neu- und Bestandsanlagen. In: Hebezeuge und Fördermittel 4 (2018), S. 34–35.
- [Bor-2013a] Borcharding, H. et al.: Energieeffizienz in der Intralogistik. Elektrische Antriebstechnik – intelligent und nachhaltig. In: Werkstatttechnik-Online 103.5 (2013), S. 416–422.
- [Bor-2013b] Bornschlegl, M.; Paulus, I.; Bregulla, M.: Von der Energie zur Kennzahl - Die Kennzahlentwicklungskette. In: ATZ 115.5 (2013), S. 420–425.
- [Boy-2016] Boysen, N.; Stephan, K.: A survey on single crane scheduling in automated storage/retrieval systems. In: European Journal of Operational Research 254.3 (2016), S. 691–704.
- [Boz-1984] Bozer, Y. A.; White, J. A.: Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems. In: IIE Transactions 37 (1984), S. 329–338.
- [Bra-2016a] Braun, M.: Entwicklung, Analyse und Evaluation von Modellen zur Ermittlung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten. Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, 2016.

- [Bra-2016b] Braun, M.; Furmans, K.: Evaluation von Simulationsmodellen zur Prognose des Energiebedarfs von Regalbediengeräten mit empirisch erhobenen Messdaten. In: logistics journal proceedings (2016), S. 1–7.
- [Bru-2012] Bruns, R. et al.: Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik. Forschungsbericht. 2012.
- [Bun-2010] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Gesetz über Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen. EDL-G. Version 17.02.2016. 2010. Url: <https://www.gesetze-im-internet.de/edl-g/BJNR148310010.html> (besucht am 18. 10. 2016).
- [DAM-2016] DAMBACH Lagersysteme GmbH & Co. KG: Immer das richtige Energie-Level. In: dhf 10 (2016), S. 38–41.
- [Dör-2018] Dörr, K.: Travel Time Models and Throughput Analysis of Dual Load Handling Automated Storage and Retrieval Systems in Double Deep Storage. Bd. 92. Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Förder-technik und Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie. 2018.
- [Dör-2016] Dörr, K.; Furmans, K.: Durchsatzbetrachtungen für doppeltiefe Lager unter dem Einsatz von zwei Lastaufnahmemitteln. In: logistics journal proceedings (2016), S. 1–14.
- [Ede-2018] Eder, M.; Kartnig, G.: Calculation method to determine the throughput and the energy consumption of S/R shuttle systems. In: FME Transaction 46.3 (2018), S. 424–428.
- [Ede-2020] Eder, Michael: An approach for performance evaluation of SBS/RS with shuttle vehicles serving multiple tiers of multiple-deep storage rack. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 110.11-12 (2020), S. 3241–3256.
- [Egg-2018] Egger, M.; Angleitner, K.: Deutliche Masse-Ersparnis – Optimierung der Grundgestalt von Regalbediengeräten. In: HF Hebezeuge und Fördermittel 5 (2018), S. 26–29.
- [Ert-2016a] Ertl, R.: Energiebedarfsermittlung und Energieeffizienzbewertung von Regalbediengeräten in automatischen Kleinteilelagern. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Dissertation. Technische Universität München, 2016.
- [Ert-2013a] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Energieeffizienzklassen für AKL-Regalbediengeräte – Teil I. In: Fördern und Heben 12 (2013), S. 8–10.

- [Ert-2014] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Energieeffizienzklassen für AKL-Regalbediengeräte – Teil II. In: *Fördern und Heben* 1-2 (2014), S. 10–13.
- [Ert-2016b] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Meta-model for calculating the mean energy demand of automated storage and retrieval systems. In: *logistics journal* (2016), S. 1–11.
- [Ert-2013b] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Schnell zu aussagekräftigen Werten gelangen – Teil I. Analytische Berechnung des mittleren Energiebedarfs von Regalbediengeräten mit Energierückspeisung. In: *Fördern und Heben* 6 (2013), S. 12–14.
- [Ert-2013c] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Schnell zu aussagekräftigen Werten gelangen – Teil II. Analytische Berechnung des mittleren Energiebedarfs von Regalbediengeräten mit Energierückspeisung. In: *Fördern und Heben* 7-8 (2013), S. 12–15.
- [Eur-2009] Europäisches Parlament: EG-Verordnung 244/2009. 2009.
- [Eur-2012] Europäisches Parlament: Richtlinie 2012/27/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG. 2012.
- [Eur-2010] Europäisches Parlament: Richtlinie über die Angabe des Verbrauchs an Energie und anderen Ressourcen durch energieverbrauchsrelevante Produkte mittels einheitlicher Etiketten und Produktinformationen. 2010/30/EU. 2010.
- [Eur-2017] Europäisches Parlament: Verordnung zur Festlegung eines Rahmens für die Energieverbrauchskennzeichnung und zur Aufhebung der Richtlinie 2010/30/EU. 2017/1369/EU. 2017.
- [Fah-2016] Fahrmeir, L. et al.: *Statistik – Der Weg zur Datenanalyse*. 8. Auflage. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg: 2016.
- [FEM-9831] Fédération Européenne de la Manutention: Berechnungsgrundlagen für Regalbediengeräte Toleranzen, Verformungen und Freimaße im Hochregallager. FEM 9.831. 1995.
- [FEM-9865] Fédération Européenne de la Manutention: Energy consumption – determination methods (ECoDeMISE). FEM 9.865. 2017.
- [FEM-9851] Fédération Européenne de la Manutention: Leistungsnachweis für Regalbediengeräte - Spielzeiten. FEM 9.851. 2003.
- [FEM-9101] Fédération Européenne de la Manutention: Terminologie - Regalbediengeräte - Definitionen. FEM 9.101. 1997.

- [Fle-2019] Fleischer-Dörr, K. et al.: Quantitatives Entscheidungsmodell zur Wahl zwischen AKL und Shuttle-Lager. In: logistics journal proceedings (2019), S. 1–10.
- [Flu-2006] Fluke Europe: Bedienungshandbuch Fluke Power Logger 1735. 2006. Url: <https://www.fluke.com/de-de/produkt/elektrische-pruefungen/power-und-energie-logger/dreiphasige-power-und-energie-logger/fluke-1735> (besucht am 09. 10. 2018).
- [Fot-2018] Fottner, J.; Rücker, A.: Entwicklung einer Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten. Forschungsbericht. 2018.
- [Fre-2016] Freis, J.; Vohlidka, P.; Günthner, W. A.: Low-Carbon Warehousing: Examining Impacts of Building and Intra-Logistics Design Options on Energy Demand and the CO₂ Emissions of Logistics Centers. In: Sustainability 8.5 (2016), S. 1–36.
- [Geb-2018] Gebhardt, J.: Viel Platz für wenig Energie. Innovativer Speicher ermöglicht hohes Maß an Energieeffizienz. In: Hebezeuge und Fördermittel 6 (2018), S. 44–45.
- [Gef-2017] Geffel, A.: Modellierung des elektrischen Antriebssystems von Regalbediengeräten. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Semesterarbeit. Technische Universität München, 2017.
- [Gri-2015] Griemert, R.; Römisch, P.: Fördertechnik. Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen. 11. Auflage. Springer Vieweg: 2015.
- [Gud-2012a] Gudehus, T.: Logistik 1. Grundlagen, Verfahren und Strategien. 4. Auflage. Springer Vieweg: 2012.
- [Gud-2012b] Gudehus, T.: Logistik 2. Netzwerke, Systeme und Lieferketten. 4. Auflage. Springer Vieweg: 2012.
- [Gün-2009a] Günthner, W. A.; Galka, S.; Tenerowicz-Wirth, P.: Roadmap für eine nachhaltige Intralogistik. In: Sustainable Logistics. 14. Wissenschaftliche Fachtagung. Magdeburg: 2009, S. 205–220.
- [Gün-2009b] Günthner, W. A.; Heptner, K.; Tenerowicz, P.: Von der Blechhütte zum Glaspalast. In: Logistik Heute 31.1-2 (2009), S. 58.
- [Gün-2011a] Günthner, W. A. et al.: Wettbewerbsfaktor Energieeffizienz – Teil I. In: Fördern und Heben 6 (2011), S. 276–279.
- [Gün-2011b] Günthner, W. A. et al.: Wettbewerbsfaktor Energieeffizienz – Teil II. In: Fördern und Heben 7-8 (2011), S. 326–329.
- [Hab-2018] Habenicht, S.: Energiebedarfsermittlung einzelner Elemente von Stückgut-Stetigförderanlagen. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Dissertation. Technische Universität München, 2018.

- [Hab-2013] Habenicht, S.; Ertl, R.; Günthner, W. A.: Analytische Energiebedarfsbestimmung von Intralogistiksystemen in der Planungsphase. In: *logistics journal* (2013), S. 1–14.
- [Hah-2018] Hahn-Woernle, P.: Reduzierung der Betriebskosten mehrgassiger Lagersysteme mittels elektrischem Lastmanagement. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Dissertation. Technische Universität München, 2018.
- [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* 56.3 (2017), S. 1269–1285.
- [Hom-2018] Hompel, M.; Schmidt, T.; Dregger, J.: *Materialflusssysteme. Förder- und Lagertechnik*. 4. Auflage. Springer Vieweg: 2018.
- [Ich-2021] Icha, P.; Lauf, T.; Kuhs, G.: CLIMATE CHANGE 45/2021. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020. Umweltbundesamt, 2021.
- [Irr-2016] Irrgang, R.: Stromspitzen aus dem Speicher. Gleichmäßige Energieversorgung für Regalbediengeräte bei verringerter Netzbelastung. In: *HF Hebezeuge und Fördermittel* 05 (2016), S. 14–17.
- [Jun-2018] Jung, J.: Entwicklung einer Bewertung für die Energieeffizienz von Lastaufnahmemitteln bei Regalbediengeräten. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Semesterarbeit. Technische Universität München, 2018.
- [Kar-2017] Karzel, L.: Entwicklung eines Systems zur Beschleunigungsmessung an Regalbediengeräten auf Arduino Basis. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2017.
- [Kar-2019] Karzel, L.: Entwicklung und Validierung eines Balkenmodells zur Untersuchung der Mastschwingung von Regalbediengeräten. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Semesterarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [Kar-2020] Karzel, L.: Untersuchung des Einflusses von strategischen Parametern auf Energiebedarf und Durchsatz von Regalbediengeräten. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Masterarbeit. Technische Universität München, 2020.
- [Kar-2019] Karzel, L.; Rücker, A.: Entwicklung eines Systems zur Beschleunigungsmessung an Regalbediengeräten auf Arduino Basis. In: *Solution day – update. Logistik Werkstatt 2019*. TU Graz. 2019, S. 109–138.

- [Kas-2020] Kasher, J.-D.: Entwicklung und Bewertung von Steuerstrategien eines Lagerbediengerätes in doppelter Ausführung anhand simulativer Untersuchungen. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Masterarbeit. Technische Universität München, 2020.
- [Kau-2018] Kaulfuhs-Berger, J.: Mit Bestwerten in eine neue Dimension. Regalbediengerät für Automatisches Kleinteilelager vorgestellt. In: Hebezeuge und Fördermittel 7-8 (2018), S. 50–51.
- [Ler-2014] Lerher, T.; Edl, M.; Rosi, B.: Energy efficiency model for the mini-load automated storage and retrieval systems. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 70 (2014), S. 97–114.
- [Lot-2016] Lottersberger, F.: Beitrag zu einer energieeffizienten Materialflusstechnik - Grundlagen zur Ermittlung, zum Vergleich und zur Steigerung der Energieeffizienz. Institut für Technische Logistik. Dissertation. TU Graz, 2016.
- [Lot-2015] Lottersberger, F.; Jodin, D.: Energieeffizienz im Materialfluss untersucht. Stetigfördertechnik stand im Fokus. In: Fördern und Heben 1-2 (2015), S. 20–23.
- [Lud-2021] Ludwig, C.: Multikriterieller Vergleich automatisch bedienter Palettenhochregallager. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Dissertation. Technische Universität München, 2021.
- [Mar-2016] Martin, Heinrich: Transport- und Lagerlogistik. Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit. 10. Auflage. Springer Vieweg: 2016.
- [Men-2011] Meneghetti, A.; Monti, L.: Energy Efficient Dual Command Cycles in Automated Storage and Retrieval Systems. In: Proceedings World Renewable Energy Congress Sweden (2011), S. 1668–1675.
- [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 24.6 (2013), S. 511–520.
- [Par-2017] Parr, C.: Ermittlung von repräsentativen Fachanfahrten für den mittleren Energiebedarf eines Regalbediengerätes mit Hilfe von Simulationsreihen. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2017.
- [Pfe-1977] Pfeifer, H.: Grundlagen der Fördertechnik. 1. Auflage. Vieweg: 1977.
- [Pre-2018] Preis, S.: Analyse der Verlustleistung eines Regalbediengerätes mittels Thermografie. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Semesterarbeit. Technische Universität München, 2018.

- [Rab-2008] Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. 1. Auflage. Springer: 2008.
- [Raj-2019] Rajković, M. et al.: A multi-objective optimization model for minimizing investment expenses, cycle times and CO2 footprint of an automated storage and retrieval systems. In: *Transport* 34.3 (2019), S. 275–286.
- [Rie-2019] Rief, J.: Entwicklung eines Referenzzyklus für die Energieeffizienzbestimmung eines Regalbediengerätes. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Masterarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [Rie-2018] Rief, J.: Simulation des Energiebedarfs von Doppel-Lastaufnahmemitteln an Regalbediengeräten. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Semesterarbeit. Technische Universität München, 2018.
- [Roo-2009] Roodbergen, K.; Vis, I.: A survey of literature on automated storage and retrieval systems. In: *European Journal of Operational Research* 194.2 (2009), S. 343–362.
- [Rüc-2018a] Rücker, A.: Forschungsansatz zur Bestimmung der Energieeffizienz von Fördermitteln der Intralogistik. In: *Energiebedarf und Effizienz in der Intralogistik*. Logistikwerkstatt Graz 2018. TU Graz. 2018, S. 237–266.
- [Rüc-2018b] Rücker, A.; Fottner, J.: Bestimmung spezifischer Wirkungsgrade von Hub- und Fahrtrieb eines Regalbediengerätes. In: *Krane im Fokus von Ressourcenschonung und Energieeffizienz*. 26. Kranfachung. TU Dresden. 2018, S. 43–60.
- [Rüc-2017] Rücker, A.; Fottner, J.: Energiebedarf und Nutzen. Bewertungsmethodik für die Klassifizierung von Regalbediengeräten. In: *Hebezeuge und Fördermittel* 4 (2017), S. 48–50.
- [Rüc-2018c] Rücker, A.; Fottner, J.: Entwicklung einer mehrkomponentigen Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten. In: *logistics journal proceedings* (2018), S. 115–125.
- [Rüc-2018d] Rücker, A.; Gauß, P.; Fottner, J.: Marktstudie Hochregallager. In: *Materialfluss* 6 (2018), S. 9–10.
- [Rüc-2019] Rücker, A.; Rief, J.; Fottner, J.: An investigation of mean energy demand, performance and reference cycles for stacker cranes. In: *XXIII International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics*. TU Wien. 2019, S. 197–202.
- [Rüc-2020a] Rücker, A.; Rief, J.; Fottner, J.: An investigation of mean energy demand, performance and reference cycles for stacker cranes. In: *FME Transactions* 48.2 (2020), S. 307–312.

- [Rüc-2020b] Rücker, A.; Rief, J.; Fottner, J.: Development of a method for the energy efficiency determination of stacker cranes in automated high-bay warehouses. In: FME Transactions 48.4 (2020), S. 753–760.
- [Sch-2014] Schulz, R.: Untersuchung und Ableitung geeigneter Lagerbetriebsstrategien zur Verringerung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten. Institut für Logistik und Materialflusstechnik. Dissertation. Universität Magdeburg, 2014.
- [Sch-2012a] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Der Einfluss kinematischer Parameter auf den Energiebedarf eines Regalbediengerätes. In: logistics journal (2012), S. 1–10.
- [Sch-2012b] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Isoenergetic Shelves of Automatic Small Parts Warehouses. In: logistics journal (2012), S. 1–10.
- [She-2017] Shen, Y.: Wirkungsgradbestimmung von Hub- und Fahrtrieb eines Regalbediengerätes durch Energiebedarfsmessungen. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Semesterarbeit. Technische Universität München, 2017.
- [Sie-2017] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchplanung. Design of Experiments (DoE). 2. Auflage. Springer: 2017.
- [Sie-2013] Siegel, A. et al.: Modellierung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten und verschiedener Lagerbetriebsstrategien zur Reduzierung des Energiebedarfs. In: logistics journal (2013), S. 1–18.
- [Stö-2018] Stöhr, T.; Schadler, M. Hafner, N.: Benchmarking the energy efficiency of diverse Automated Storage and Retrieval Systems. In: FME Transactions 46.3 (2018), S. 330–335.
- [Stu-2014] Sturm, C.; Bruckmann, T.: Seilbasierter Roboter als Regalbediengerät. Prototyp im Test. In: Hebezeuge und Fördermittel 54.9 (2014), S. 508–510.
- [Töp-2012] Töpfer, A.: Erfolgreich Forschen. Ein Leitfaden für Bachelor-, Master-Studierende und Doktoranden. 3. Auflage. Springer: 2012.
- [Tsi-2020] Tsikolenko, I.: Entwicklung eines Technologieradars für die Intralogistik. Masterarbeit. Technische Universität München, 2020.
- [Tsi-2019] Tsikolenko, I.: Entwicklung und Bewertung mehrkomponentiger Energieeffizienzklassen für Fördermittel in der Intralogistik. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Semesterarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [VDA-4500] Verband der Automobilindustrie e. V.: Kleinladungsträger (KLT-) System. VDA 4500. 2018.

- [VDI-4707-1] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Aufzüge – Energieeffizienz. Blatt 1. VDI 4707. 2009.
- [VDI-4707-2] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Aufzüge – Energieeffizienz von Komponenten. Blatt 2. VDI 4707. 2013.
- [VDI-4465] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Modellierung und Simulation – Modellbildungsprozess. Blatt 1. VDI 4465. 2016.
- [VDI-3633] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Blatt 1. VDI 3633. 2016.
- [VDI-3561] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen. VDI 3561. 1973.
- [Ver-2015] Vereinte Nationen: Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. 2015.
- [Ver-2019] Verissimo Caschera, J.: Simulation des Energiebedarfs eines Regalbediengerätes mittels künstlicher neuronaler Netze. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Masterarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [Voß-2014] Voß, M.; Schnierle, M.; Verl, A.: Automatisierte Energiemanagementsysteme für Hochregallager. In: Werkstatttechnik-Online 3 (2014), S. 180–186.
- [Wah-2014] Wahle, A.: Neuartiges Tragwerk für AKL-Bediengeräte. Spann den Bogen. In: Hebezeuge und Fördermittel 54.9 (2014), S. 504–506.
- [Wau-2016] Wauters, T. et al.: A decomposition approach to dual shuttle automated storage and retrieval systems. In: Computers & Industrial Engineering 101 (2016), S. 325–337.
- [Wes-2018] Westfalia Logistics Solutions Europe GmbH & Co. KG: Ein Überflieger in puncto Regalbediengeräte. In: Fördern und Heben 07-08 (2018), S. 26–27.
- [Wie-2020] Wierda, L.; Kemna, R.: Ecodesign Impact Accounting: Statuts Report 2019. Hrsg. von Van Holsteijn en Kemna B.V. Delft, Niederlande, 2020.
- [Zad-2014] Zadek, H.; Schulz, R.; Monecke, J.: Eneff Lager - Energieeffiziente Lagerstrategien und Lastverteilung. Forschungsbericht. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2014.
- [Zha-2016] Zhakov, A. et al.: Einsatz faser- bzw. textilverstärkter Verbundwerkstoffe zur Schwingungsdämpfung bei Hubmasten von Regalbediengeräten. In: logistics journal proceedings (2016), S. 1–7.

- [Zha-2017] Zhakov, A. et al.: Hohe Dämpfung auch in großer Höhe. Einsatz von Faserverbundwerkstoffen für RBG-Hubmasten. In: Hebezeuge und Fördermittel 10 (2017), S. 20–22.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Industriestrompreise der mittelspannungsseitig versorgten Industriebetriebe mit einer Abnahme von 100 kW für 1600 h bis 4000 kW für 5000 h Jahresverbrauch inklusive Stromsteuer in Deutschland von 1998 bis 2021 (*Ab 2010 gilt die Ausgleichsmechanismusverordnung (bezogen auf die EEG-Umlage [BDE-2021, S. 26]))	2
Abbildung 1-2	Kreislauf zur Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen [Rüc-2018c] (basierend auf [Gün-2009a])	5
Abbildung 1-3	Schritte und Inhalte zur Erreichung des Forschungsziels	6
Abbildung 1-4	Untersuchungsdesign zur Erreichung des Forschungsziels	7
Abbildung 2-1	Schema eines automatischen HRLs mit fünf Gassen, doppeltiefer Lagerung und RBG (vgl. [Kar-2020, S. 3])	10
Abbildung 2-2	Schema einer Lagerfront mit RBGs als Seitenansicht einer Gasse Darstellung der Betrachtungsgrenze als rote Strich-Punkt-Linie	12
Abbildung 2-3	Schema eines HRLs mit RBGs in der Draufsicht Darstellung der Betrachtungsgrenze als rote Strich-Punkt-Linie	13
Abbildung 2-4	Detailschema eines RBGs mit seinen Komponenten und dem in dieser Arbeit verwendeten Koordinatensystem für die Bewegungsrichtungen	15
Abbildung 2-5	Schema der elektrischen Verbraucher eines RBGs (vgl. [Fot-2018, S. 52])	17
Abbildung 2-6	Darstellung eines Einzel-, Doppel- und Vierfachspiels vor einer Lagerwand (vgl. [Rüc-2020b])	20
Abbildung 2-7	Verlauf der kinematischen Parameter Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit bei einer 7-Phasen Bewegung eines RBGs (vgl. [Rüc-2018b])	22
Abbildung 2-8	Verlauf der kinematischen Parameter Beschleunigung und Geschwindigkeit bei einer 3-Phasen Bewegung eines RBGs	23
Abbildung 4-1	Vereinfachtes Schema der Leistungselektronik eines RBGs mit Anschlusspunkt des Leistungsmessgeräts (vgl. [Rüc-2018b])	40
Abbildung 4-2	Schema der Fahrten für die Messungen an RBG-1 mit einer Fahrstrecke von 20,98 m und einer von Hubhöhe 6,26 m (vgl. [Rüc-2018b])	41
Abbildung 4-3	Gemittelte Leistungsaufnahme von RBG-1 bei zyklischer Belastung des Fahrantriebs während einer Langzeituntersuchung ohne Nutzlast (vgl. [Rüc-2018b])	42

Abbildung 4-4	Gemittelte Leistungsaufnahme von RBG-1 bei zyklischer Belastung des Hubantriebs während einer Langzeituntersuchung ohne Nutzlast (vgl. [Fot-2018, S. 64])	43
Abbildung 4-5	Leistungsaufnahme von RBG-1 bei reiner Fahrbewegung während einer Messreihe mit Grundlast und ohne Nutzlast bei verschiedenen Geschwindigkeiten (vgl. [Rüc-2018b])	45
Abbildung 4-6	Energiebedarf einzelner Fahrbewegungen von RBG-1 während einer Messreihe mit Grundlast und ohne Nutzlast bei verschiedenen Geschwindigkeiten (vgl. [Rüc-2018b])	45
Abbildung 4-7	Mittlerer Energiebedarf und Standardabweichung von RBG-1 bei Fahrbewegungen mit und ohne Grundlast und ohne Nutzlast bei verschiedenen Geschwindigkeiten (vgl. [Rüc-2018b])	46
Abbildung 4-8	Mittlerer Energiebedarf von RBG-1 bei Fahrbewegungen mit Grundlast und mit verschiedenen Nutzlasten und verschiedenen Geschwindigkeiten (vgl. [Rüc-2018b])	47
Abbildung 4-9	Mittlerer Energiebedarf von RBG-1 bei Hubbewegungen mit verschiedenen Nutzlasten und verschiedenen Geschwindigkeiten (vgl. [Rüc-2018b])	47
Abbildung 4-10	Einfluss der Beschleunigung von RBG-1 inklusive Grundlast bei einer maximalen Fahrgeschwindigkeit von $v_{x,\max} = 5 \text{ m/s}$ (vgl. [Fot-2018, S. 72])	48
Abbildung 4-11	Vergleich unterschiedlicher Beschleunigungsprofile bei gleicher Gesamtfahrzeit	49
Abbildung 4-12	Vergleich unterschiedlicher Geschwindigkeitsprofile bei gleicher Gesamtfahrzeit	50
Abbildung 4-13	Energiebedarf in Abhängigkeit des Ruckverhältnisses und zusätzlich aufgeteilt nach Hinfahrten und Rückfahrten	50
Abbildung 4-14	Vergleich von Simulationsdaten mit Messdaten der Beschleunigung des Fahrtriebs bei 50 kg Nutzlast (vgl. [Rüc-2018b])	51
Abbildung 4-15	Vergleich von Simulationsdaten mit Messdaten der Beschleunigung des Hubantriebs bei 50 kg Nutzlast (vgl. [Fot-2018, S. 75])	52
Abbildung 4-16	Energiebedarf einzelner Fahrbewegungen in Abhängigkeit von der Fahrstrecke (vgl. [Fot-2018, S. 77])	54
Abbildung 4-17	Energiebedarf einzelner Hubbewegungen in Abhängigkeit von der Hubhöhe (vgl. [Fot-2018, S. 78])	55
Abbildung 4-18	Vergleich von Simulationsdaten mit Messdaten der Beschleunigung des Fahrtriebs von RBG-2 ohne Nutzlast (vgl. [Fot-2018, S. 82])	56

Abbildung 4-19	Vergleich von Simulationsdaten mit Messdaten der Geschwindigkeit des Fahrtriebs von RBG-2 ohne Nutzlast (vgl. [Fot-2018, S. 83])	56
Abbildung 4-20	Leistungsaufnahme von RBG-2 über den Zeitraum von einer Woche (vgl. [Rüc-2018c])	57
Abbildung 4-21	Leistungsaufnahme von RBG-3 während Messung-1 F: Fahrbewegung, H: Hubbewegung, S: Senkbewegung und KB: kombinierte Bewegung (vgl. [Fot-2018, S. 86])	59
Abbildung 4-22	Leistungsaufnahme von RBG-3 während Messung-2 Balkenhöhe im Histogramm: 2000 W	60
Abbildung 4-23	Leistungsaufnahme von RBG-3 während der Messungen 2 bis 4	61
Abbildung 4-24	Leistungsaufnahme von RBG-4 während Messung-1 Balkenhöhe im Histogramm: 2000 W	62
Abbildung 4-25	Leistungsaufnahme von RBG-4 während der Messungen 1 bis 3	63
Abbildung 5-1	Schematische Darstellung der Architektur des Simulationsmodells (vgl. [Rüc-2020a])	67
Abbildung 5-2	Aktivitätsdiagramm des kompletten Simulationsprozesses	68
Abbildung 5-3	Theoretischer Leistungsverlauf P_x und theoretischer Beschleunigungsverlauf a_x einer Normalfahrt des Fahrtriebs (vgl. [Rie-2018, S. 20])	73
Abbildung 5-4	Gemessener Leistungsverlauf einer Normalfahrt des Fahrtriebs von RBG-2	73
Abbildung 5-5	Gemessener Leistungsverlauf einer Normalfahrt des Hubantriebs von RBG-2	74
Abbildung 5-6	Theoretische Leistungsverläufe von P_x und P_y bei einer kombinierten Fahr- und Hubbewegung (vgl. [Rie-2018, S. 20 und A-2])	74
Abbildung 5-7	Aktivitätsdiagramm des Berechnungsablaufs der „Assemblierung der Leistungsverläufe“ (vgl. [Rie-2018, S. 41])	76
Abbildung 5-8	Aktivitätsdiagramm des Berechnungsablaufs der Auftragslisten-generierung	77
Abbildung 5-9	Abweichung zwischen Messung und Simulation des Fahrtriebs	78
Abbildung 5-10	Abweichung zwischen Messung und Simulation des Hubantriebs	80
Abbildung 6-1	Ergebnisraum der untersuchten AKL Konfigurationen aus Studie 1 als Punkteplot von Durchsatz und mittlerem Energiebedarf	90
Abbildung 6-2	Ergebnisraum der untersuchten APL Konfigurationen aus Studie 1 als Punkteplot von Durchsatz und mittlerem Energiebedarf	91
Abbildung 6-3	Pearson Korrelation zwischen a_x und E_{AKL} im Doppelspielbetrieb mit und ohne Rückspeiseeinheit	92
Abbildung 6-4	Pearson Korrelationen der variierten Parameter der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb (vgl. [Rüc-2020a])	94

Abbildung 6-5	Pearson Korrelationen der variierten Parameter der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb (vgl. [Rüc-2020a])	96
Abbildung 6-6	R^2 Werte der einzelnen Regressionsmodelle von Studie 1	98
Abbildung 6-7	Haupteffekte der Basisparameter und des Einsatzes einer Rückspeiseeinheit auf den Durchsatz	100
Abbildung 6-8	Adjusted response des Durchsatzes der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb	101
Abbildung 6-9	Adjusted response des Durchsatzes der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb	102
Abbildung 6-10	Haupteffekte der Basisparameter und des Einsatzes einer Rückspeiseeinheit auf den Energiebedarf	103
Abbildung 6-11	Adjusted response des Energiebedarfs der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb	105
Abbildung 6-12	Adjusted response des Energiebedarfs der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb	106
Abbildung 6-13	Ergebnisraum der AKL Konfigurationen mit normiertem Durchsatz und gemittelten Durchsatzwerten aufgetragen über dem Regalwandfaktor	109
Abbildung 6-14	Ergebnisraum der APL Konfigurationen mit normiertem Durchsatz und gemittelten Durchsatzwerten aufgetragen über dem Regalwandfaktor	109
Abbildung 6-15	Ergebnisraum der AKL Konfigurationen mit normiertem Energiebedarf und gemittelten Energiebedarfswerten aufgetragen über dem Regalwandfaktor	110
Abbildung 6-16	Ergebnisraum der APL Konfigurationen mit normiertem Energiebedarf und gemittelten Energiebedarfswerten aufgetragen über dem Regalwandfaktor	111
Abbildung 6-17	Ergebnisraum der untersuchten AKL Konfigurationen in Simulationsstudie 1 und 2	112
Abbildung 6-18	Ergebnisraum der untersuchten APL Konfigurationen in Simulationsstudie 1 und 2	112
Abbildung 6-19	R^2 Werte der einzelnen Regressionsmodelle der Studie 2	113
Abbildung 6-20	Haupteffekte der zusätzliche Parameter auf den Energiebedarf	114
Abbildung 7-1	Zusammenhang Durchsatz und Effizienzkennzahl für AKLs	118
Abbildung 7-2	Zusammenhang Durchsatz und Effizienzkennzahl für APLs	118
Abbildung 7-3	Zusammenhang Energiebedarf und Effizienzkennzahl für AKLs	119
Abbildung 7-4	Zusammenhang Energiebedarf und Effizienzkennzahl für APLs	119
Abbildung 7-5	Pearson Korrelationen zwischen den variierten Parametern und k_{EE} der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb	120

Abbildung 7-6	Pearson Korrelationen für die variierten Parameter und k_{EE} der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb	122
Abbildung 7-7	Haupteffekte der Basisparameter und des Einsatzes der Rückspeiseeinheit auf die Effizienz Kennzahl k_{EE}	124
Abbildung 7-8	Adjusted response der Effizienz Kennzahl der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb	125
Abbildung 7-9	Adjusted response der Effizienz Kennzahl der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb	126
Abbildung 7-10	Ergebnisraum der AKL Konfigurationen mit normierter Effizienz Kennzahl und gemittelten Effizienz Kennzahlwerten aufgetragen über dem Regalwandfaktor	127
Abbildung 7-11	Ergebnisraum der APL Konfigurationen mit normierter Effizienz Kennzahl und gemittelten Effizienz Kennzahlwerten aufgetragen über dem Regalwandfaktor	127
Abbildung 7-12	Verteilung der Effizienz Kennzahl für AKLs mit Klassengrenzen	129
Abbildung 7-13	Verteilung der Effizienz Kennzahl für APLs mit Klassengrenzen	130
Abbildung 7-14	Schema des FEM-Doppelspiels mit $P_E(1/5 \cdot L 2/3 \cdot H)$ und $P_A(2/3 \cdot L 1/5 \cdot H)$ (vgl. [Rüc-2020b])	131
Abbildung 7-15	Vergleich der mittleren Energiebedarfe und der Energiebedarfe des FEM-Doppelspiels und Histogramm des relativen Fehlers mit $\bar{\epsilon}_{FEM} = 5,34\%$ und $\sigma_\epsilon = 2,40\%$ für AKL (vgl. [Rüc-2020b])	131
Abbildung 7-16	Vergleich der mittleren Energiebedarfe und der Energiebedarfe des FEM-Doppelspiels und Histogramm des relativen Fehlers mit $\bar{\epsilon}_{FEM} = 6,10\%$ und $\sigma_\epsilon = 4,40\%$ für APL (vgl. [Rüc-2020b])	132
Abbildung 7-17	Schema des FEM-Doppelspiels vorwärts/rückwärts mit $P_{E,1}, P_{A,2}(1/5 \cdot L 2/3 \cdot H)$ und $P_{A,1}, P_{E,2}(2/3 \cdot L 1/5 \cdot H)$	134
Abbildung 7-18	Vergleich der mittleren Energiebedarfe und der Energiebedarfe des FEM-Doppelspiels vorwärts und rückwärts gefahren und Histogramm des relativen Fehlers mit $\bar{\epsilon}_{FEM} = 2,89\%$ und $\sigma_\epsilon = 2,30\%$ für AKL	135
Abbildung 7-19	Vergleich der mittleren Energiebedarfe und der Energiebedarfe des FEM-Doppelspiels vorwärts und rückwärts gefahren und Histogramm des relativen Fehlers mit $\bar{\epsilon}_{FEM} = -1,56\%$ und $\sigma_\epsilon = 2,07\%$ für APL	135

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1	Technische Daten der untersuchten Geräte	38
Tabelle 4-2	Geschwindigkeitsstufen und Nutzlasten für die Messreihen an Fahrwerk und Hubwerk (vgl. [Rüc-2018b])	44
Tabelle 4-3	Messergebnisse der untersuchten Fahrten von RBG-2 inklusive Grundlast (F = Fahrbewegung, H = Hubbewegung, S = Senkbewegung, KB = Kombinierte Bewegung)	53
Tabelle 4-4	Ergebnisse der untersuchten Fahrten von RBG-3 aus Messung-1 inklusive Grundlast (F = Fahrbewegung, H = Hubbewegung, S = Senkbewegung, KB = Kombinierte Bewegung)	59
Tabelle 4-5	Ergebnisse der Messungen 2, 3 und 4 an RBG-3	62
Tabelle 4-6	Ergebnisse der Messungen 1, 2 und 3 an RBG-4	64
Tabelle 5-1	Vergleich von Ergebnissen aus Messung und Simulation des Fahrtriebs von RBG-1	79
Tabelle 5-2	Vergleich von Ergebnissen aus Messung und Simulation des Hubtriebs von RBG-1	81
Tabelle 5-3	Vergleich von Ergebnissen aus Messung und Simulation bei einer kombinierten Bewegung von RBG-1	82
Tabelle 5-4	Vergleich von Ergebnissen aus Messung und Simulation von RBG-2	83
Tabelle 5-5	Auflistung der variierten Basisparameter und der Grenzen ihrer Intervalle (Erweiterung der Parameter aus [Rüc-2020a])	85
Tabelle 5-6	Auflistung der fixen Parameter für AKL und APL	88
Tabelle 5-7	Auflistung der zusätzlich variierten Parameter und der Grenzen ihrer Intervalle in Studie 2	88
Tabelle 6-1	Korrelationswerte der variierten Parameter der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb mit Signifikanzgrenze α , p -Wert und Signifikanz S (Tabellenwerte der Abbildung 6-4)	95
Tabelle 6-2	Korrelationswerte der variierten Parameter der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb mit Signifikanzgrenze α , p -Wert und Signifikanz S (Tabellenwerte der Abbildung 6-5)	97
Tabelle 7-1	Korrelationswerte der variierten Parameter mit k_{EE} der AKL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb mit Signifikanzgrenze α , p -Wert und Signifikanz S (Tabellenwerte der Abbildung 7-5)	121
Tabelle 7-2	Korrelationswerte für die variierten Parameter und k_{EE} der APL Konfigurationen im Doppelspielbetrieb mit Signifikanzgrenze α , p -Wert und Signifikanz S (Tabellenwerte der Abbildung 7-6)	123
Tabelle 7-3	Tabelle der Grenzwerte für eine Klassifizierung auf Basis einer Normalverteilung	128
		167

Tabelle 7-4 Verhältnisse von $TP_{AKL/APL}$ und $E_{AKL/APL}$ im Einzel- und Doppelspielbetrieb

136

A Liste der eigenen Publikationen und der betreuten Studienarbeiten

Im Rahmen der Forschungsarbeiten habe ich zusammen mit anderen Autoren die folgenden Publikationen veröffentlicht. Die veröffentlichten Publikationen bilden die Grundlage dieser Dissertation.

- [Rüc-2017] Energiebedarf und Nutzen - Entwicklung einer Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten
Dieser Zeitschriftenbeitrag enthält eine kurze Beschreibung des Forschungsprojekts und seiner geplanten Arbeitsinhalte. Er diene hauptsächlich der Bekanntmachung des Projekts und als Hilfe bei der Suche weiterer Partner für das Projekt.
- [Rüc-2018b] Bestimmung spezifischer Wirkungsgrade von Hub- und Fahrtrieb eines Regalbediengerätes
Dieser Konferenzbeitrag beschreibt die Ergebnisse von Leistungsmessungen am Forschungsregalbediengeräte des Lehrstuhls. Die Einflüsse der kinematischen Parameter werden detailliert dargestellt.
- [Rüc-2018a] Forschungsansatz zur Bestimmung der Energieeffizienz von Fördermitteln der Intralogistik
Im Rahmen dieses Konferenzbeitrags werden erste Schritte in Richtung einer Klassifizierung von RBGs und die mögliche Erweiterung der Bewertungsmethodik auf andere Fördermittel beschrieben.
- [Rüc-2018c] Entwicklung einer mehrkomponentigen Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten
Dieser Konferenzbeitrag enthält, aufbauend auf den bisherigen Veröffentlichungen, bereits einen ersten konkreten Vorschlag für eine Bewertungsmethodik.
- [Rüc-2018d] Marktstudie Hochregallager
In diesem Zeitschriftenbeitrag werden die Daten mehrerer jährlicher Erhebungen, den sogenannten Anwenderstatistiken der Zeitschrift Materialfluss, zu Inbetriebnahmen von automatischen HRLs analysiert und ausgewertet.
- [Fot-2018] Entwicklung einer Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten
Der Forschungsbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt mit allen bisherigen Forschungsergebnissen.
- [Kar-2019] Entwicklung eines Systems zur Beschleunigungsmessung an RBGs auf Arduino Basis
Dieser Konferenzbeitrag enthält ausgewählte Ergebnisse der Studienarbeit von Karzel zum gleichnamigen Thema.

- [Rüc-2019; Rüc-2020a] An investigation of mean energy demand, performance and reference cycles for stacker cranes
Im Rahmen dieses Konferenzbeitrags, der auch in einem Journal veröffentlicht wurde, werden die Ergebnisse einer ersten Simulationsstudie von AKLs und APLs vorgestellt.
- [Rüc-2020b] Development of a method for the energy efficiency determination of stacker cranes in automated high-bay warehouses
Dieser Journal Artikel enthält einen detaillierten Vorschlag für die Einführung von Energieeffizienzklassen für RBGs.

Des Weiteren habe ich die nachfolgenden Studienarbeiten wissenschaftlich und inhaltlich betreut.

- **Modellierung des elektrischen Antriebssystems von Regalbediengeräten**
Semesterarbeit von Alexander Geffel [Gef-2017]
- **Entwicklung einer Bewertung für die Energieeffizienz von Lastaufnahmemitteln bei Regalbediengeräten**
Semesterarbeit von Johannes Jung [Jun-2018]
- **Entwicklung eines Systems zur Beschleunigungsmessung an Regalbediengeräten auf Arduino Basis**
Bachelorarbeit von Lukas Karzel [Kar-2017]
- **Entwicklung und Validierung eines Balkenmodells zur Untersuchung der Mastschwingung von Regalbediengeräten**
Semesterarbeit von Lukas Karzel [Kar-2019]
- **Untersuchung des Einflusses von strategischen Parametern auf Energiebedarf und Durchsatz von Regalbediengeräten**
Masterarbeit von Lukas Karzel [Kar-2020]
- **Entwicklung und Bewertung von Steuerstrategien eines Lagerbediengerätes in doppelter Ausführung anhand simulativer Untersuchungen**
Masterarbeit von John-Dean Kasher [Kas-2020]
- **Ermittlung von repräsentativen Fachanfahrten für den mittleren Energiebedarf eines Regalbediengerätes mithilfe von Simulationsreihen**
Bachelorarbeit von Christian Parr [Par-2017]
- **Analyse der Verlustleistung eines Regalbediengerätes mittels Thermografie**
Semesterarbeit von Sebastian Preis [Pre-2018]
- **Simulation des Energiebedarfs von Doppel-Lastaufnahmemitteln an Regalbediengeräten**
Semesterarbeit von Jona Rief [Rie-2018]
- **Entwicklung eines Referenzzyklus für die Energieeffizienzbestimmung eines Regalbediengerätes**
Masterarbeit von Jona Rief [Rie-2019]

-
- **Wirkungsgradbestimmung von Hub- und Fahrtrieb eines Regalbediengerätes durch Energiebedarfsmessungen**
Semesterarbeit von Ying Shen [She-2017]
 - **Entwicklung und Bewertung mehrkomponentiger Energieeffizienzklassen für Fördermittel in der Intralogistik**
Semesterarbeit von Ivan Tsikolenko [Tsi-2019]
 - **Entwicklung eines Technologieradars für die Intralogistik**
Masterarbeit von Ivan Tsikolenko [Tsi-2020]
 - **Simulation des Energiebedarfs eines Regalbediengerätes mittels künstlicher neuronaler Netze**
Masterarbeit von Joao Paulo Verissimo Caschera [Ver-2019]

Zusätzlich haben mich studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte im Rahmen meiner Forschungsarbeit bei den folgenden Themen unterstützt:

- **Lukas Karzel** bei der Weiterentwicklung des Simulationsmodells und bei der Erstellung und Formatierung von Tabellen und Abbildungen (2020-2021)
- **Christian Parr** bei der Weiterentwicklung des Simulationsmodells (2018)
- **Philipp Gauß** bei der Auswertung der Anwenderstatistiken (2018)
- **Sajjad Ahmed Oomro** bei der Auswertung von Messdaten (2017-2018)
- **Benjamin Zhou** bei Rechercharbeiten im Bereich der Klassifizierung von Energieeffizienz (2017)
- **Muhammad Umer** bei der Entwicklung eines Messsystems zur Fahrstreckenbestimmung eines RBGs (2017)

B Ergänzende Messergebnisse

B.1 Beschleunigung und Geschwindigkeit des Hubwerks von RBG-2

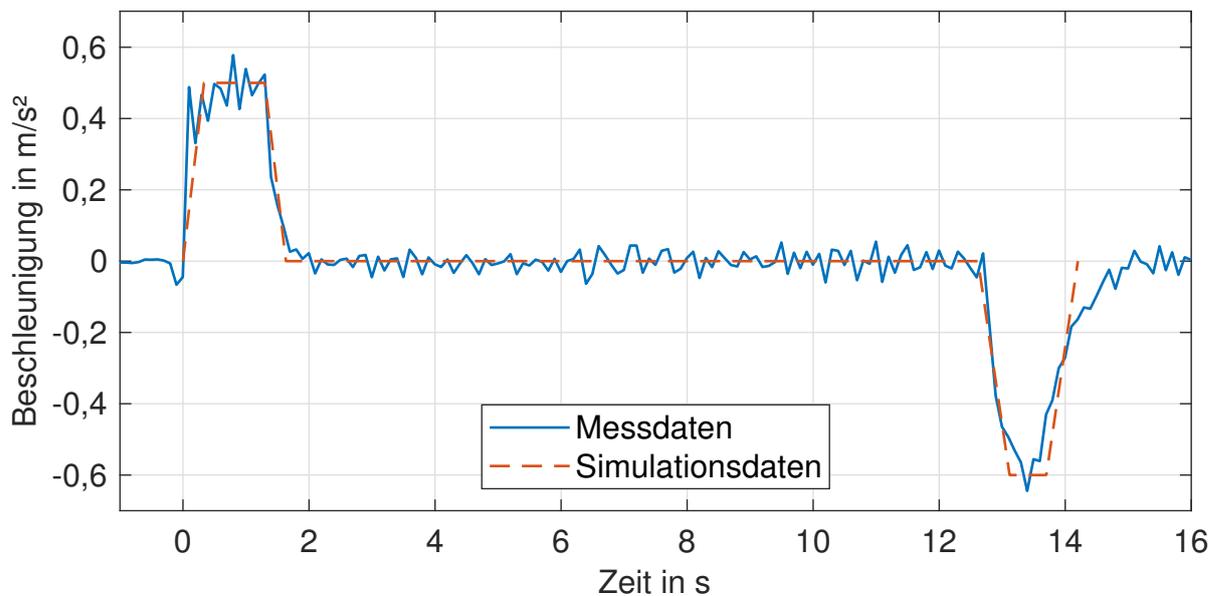


Abbildung B-1: Vergleich von Simulationsdaten mit Messdaten der Beschleunigung des Hubantriebs von RBG-2 ohne Nutzlast (vgl. [Fot-2018, S. 84])

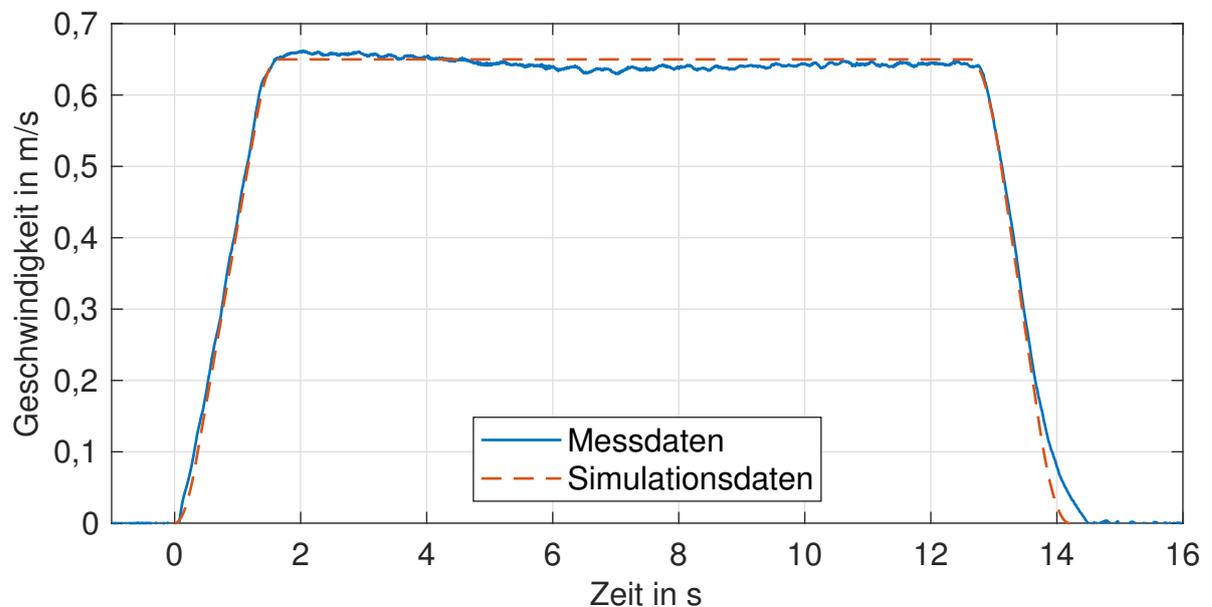


Abbildung B-2: Vergleich von Simulationsdaten mit Messdaten der Geschwindigkeit des Hubantriebs von RBG-2 ohne Nutzlast (vgl. [Fot-2018, S. 84])

B.2 Niederspannungshauptversorgung von RBG-2

Im Rahmen der Messungen an RBG-2 wurden im Auftrag des Betreibers des Betriebs die beiden Niederspannungshauptversorgungen über jeweils eine Woche vermessen. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen B-3 und B-4 dargestellt. Die Daten wurden im Jahr 2018 erhoben.

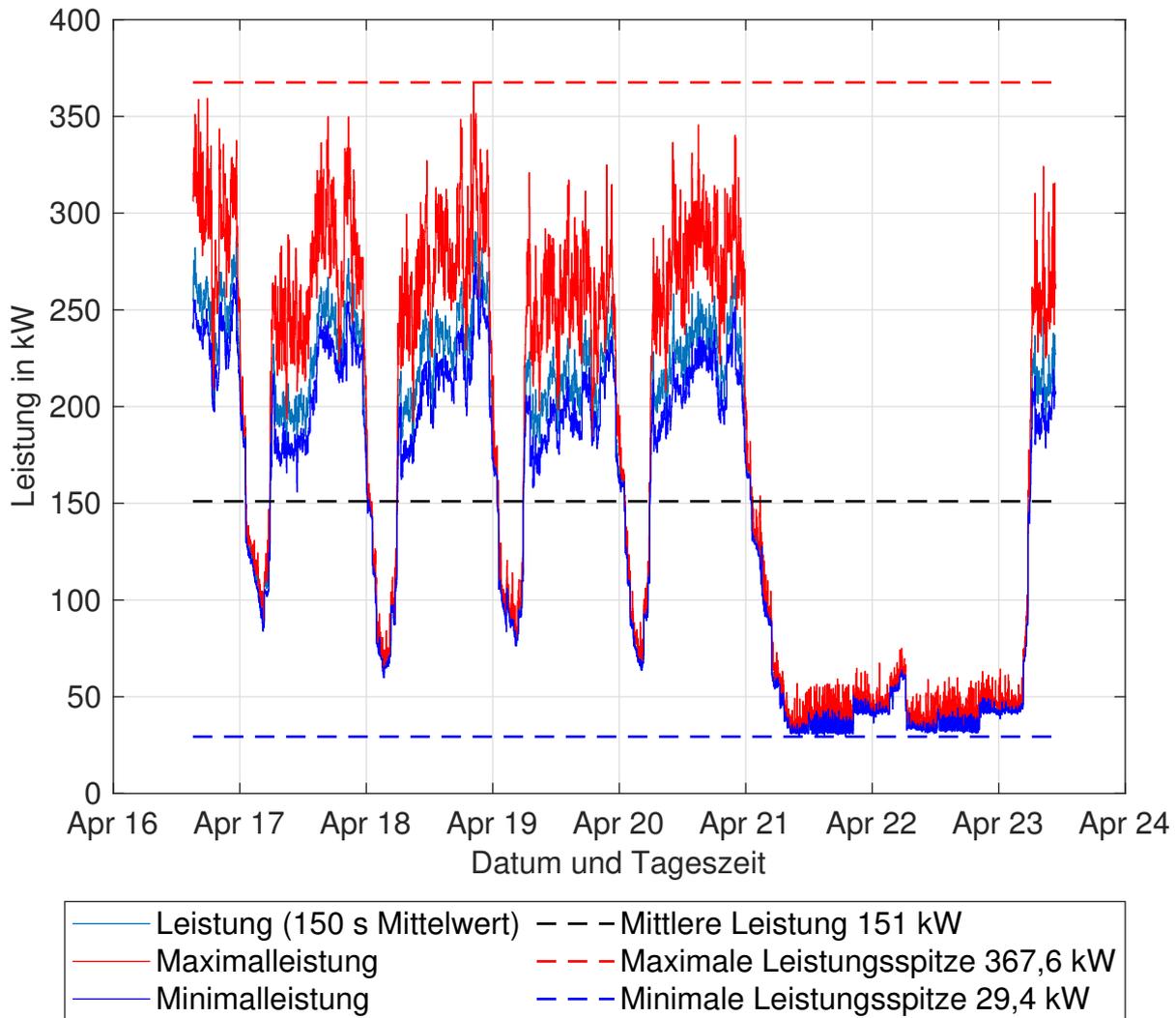


Abbildung B-3: Leistungsaufnahme der Niederspannungshauptversorgung 1 des Betriebs von RBG-2

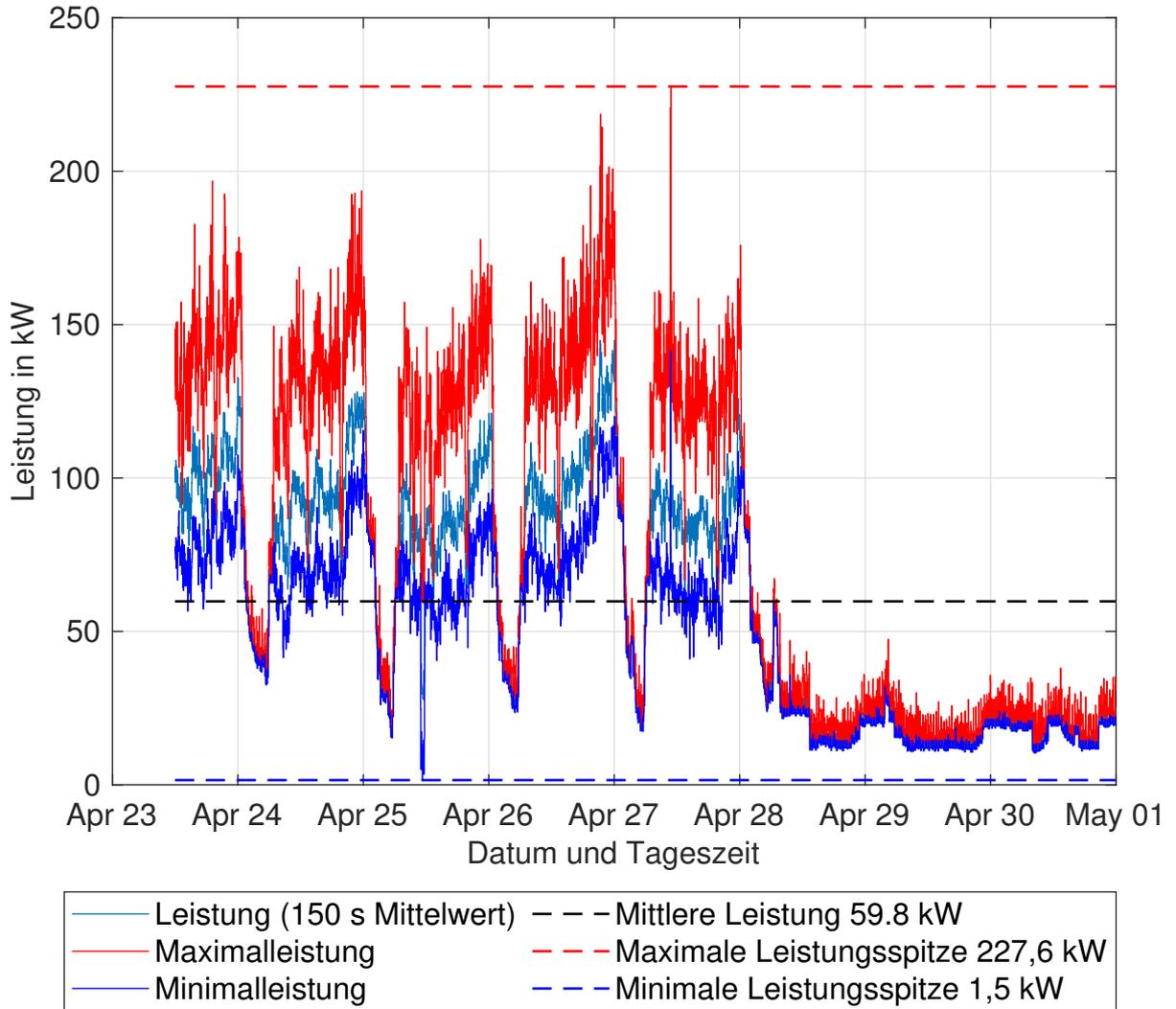


Abbildung B-4: Leistungsaufnahme der Niederspannungshauptversorgung 2 des Betriebs von RBG-2

C Gleichungen des Simulationsmodells

Energiebedarf Fahrbewegung (vgl. [Bra-2016a, S. 139, Gleichung 4.8, 4.9 und 4.10] und [Rie-2018, S. 15 Gleichung 2-14, 2-15 und 2-16])

$$E_{x,B} = \frac{(m_x \cdot a_x + F_{x,R}) \cdot |s_{x,B}|}{\eta_x} \quad (\text{C-1})$$

$$E_{x,K} = \frac{F_{x,R} \cdot |s_{x,K}|}{\eta_x} \quad (\text{C-2})$$

$$E_{x,V} = (-m_x \cdot a_x + F_{x,R}) \cdot |s_{x,V}| \cdot \eta_x \quad (\text{C-3})$$

Energiebedarf Hubbewegung (vgl. [Par-2017, S. 23 Gleichung 3-26, 3-27 und 3-28] und [Rie-2018, S. 17 Gleichung 2-27, 2-28 und 2-29]) Die Strecken in y-Richtung $s_{y,B}$, $s_{y,K}$ und $s_{y,V}$ sind vorzeichenbehaftet und werden nach dem Koordinatensystem in Abbildung 2-4 mit Vorzeichen versehen.

$$E_{+y,B} = \frac{((m_{HS} + m_{LAM} + m_{NL}) \cdot (g + a_y) + F_{y,R}) \cdot s_{y,B}}{\eta_y} \quad (\text{C-4})$$

$$E_{+y,K} = \frac{((m_{HS} + m_{LAM} + m_{NL}) \cdot g + F_{y,R}) \cdot s_{y,K}}{\eta_y} \quad (\text{C-5})$$

$$E_{+y,V} = \frac{((m_{HS} + m_{LAM} + m_{NL}) \cdot (g - a_y) + F_{y,R}) \cdot s_{y,V}}{\eta_y} \quad (\text{C-6})$$

Energiebedarf Senkbewegung (vgl. [Par-2017, S. 23 Gleichung 3-29, 3-30 und 3-31] und [Rie-2018, S. 17–18 Gleichung 2-30, 2-31 und 2-32]) Die Strecken in y-Richtung $s_{y,B}$, $s_{y,K}$ und $s_{y,V}$ sind vorzeichenbehaftet und werden nach dem Koordinatensystem in Abbildung 2-4 mit Vorzeichen versehen.

$$E_{-y,B} = ((m_{HS} + m_{LAM} + m_{NL}) \cdot (g - a_y) - F_{y,R}) \cdot s_{y,B} \cdot \eta_y \quad (\text{C-7})$$

$$E_{-y,K} = ((m_{HS} + m_{LAM} + m_{NL}) \cdot g - F_{y,R}) \cdot s_{y,K} \cdot \eta_y \quad (\text{C-8})$$

$$E_{-y,V} = ((m_{HS} + m_{LAM} + m_{NL}) \cdot (g + a_y) - F_{y,R}) \cdot s_{y,V} \cdot \eta_y \quad (\text{C-9})$$

Energiebedarf Lastaufnahmemittel (vgl. [Par-2017, S. 24 Gleichung 3-23] und [Rie-2018, S. 18 Gleichung 2-33]) Im Vergleich zu einer detaillierten Modellierung des Energiebedarfs des LAMs, wurde im Modell eine mittlere Leistung und die Gesamtzeit für einen Ein- oder Auslagervorgang t_{ges} verwendet.

$$E_{\text{LAM}} = P_{\text{LAM}} \cdot t_{\text{ges}} \quad (\text{C-10})$$

D Theoretische Leistungsverläufe

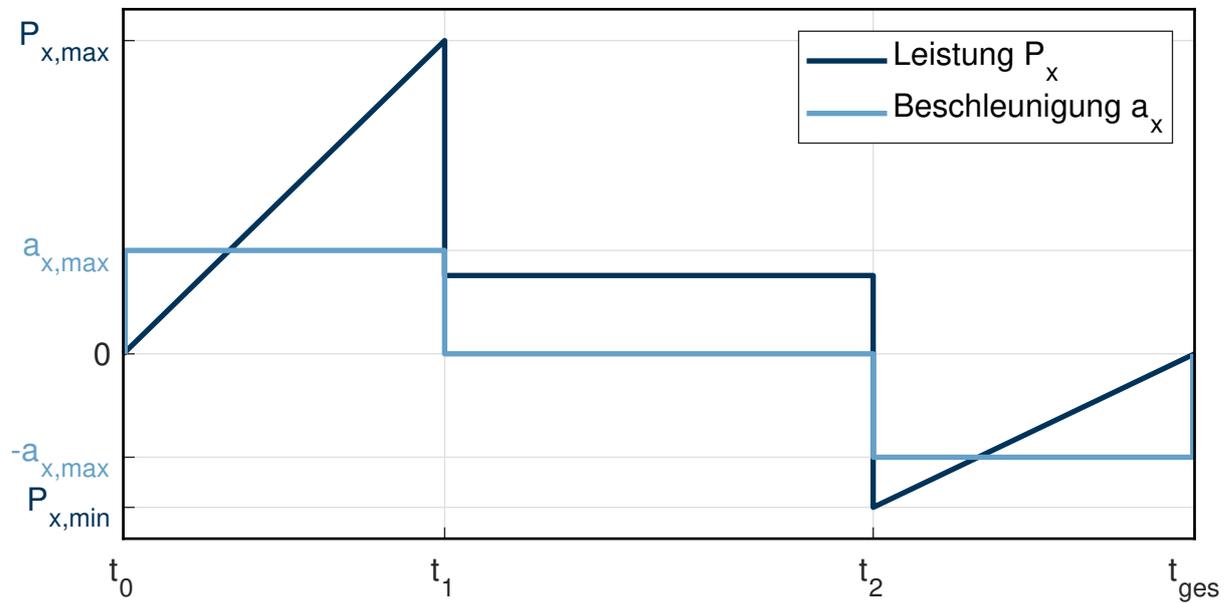


Abbildung D-1: Theoretischer Leistungsverlauf P_x und theoretischer Beschleunigungsverlauf a_x einer Normalfahrt des Fahrtriebs über der Zeit (vgl. [Rie-2018, S. 20])

$$P_{x,B}(v_x) = \frac{(m_x \cdot a_x + F_{x,R}) \cdot |v_x|}{\eta_x} \quad [t_0, t_1] \quad (\text{D-1})$$

$$P_{x,K}(v_x) = \frac{F_{x,R} \cdot |v_x|}{\eta_x} \quad [t_1, t_2] \quad (\text{D-2})$$

$$P_{x,V}(v_x) = (-m_x \cdot a_x + F_{x,R}) \cdot |v_x| \cdot \eta_x \quad [t_2, t_{\text{ges}}] \quad (\text{D-3})$$

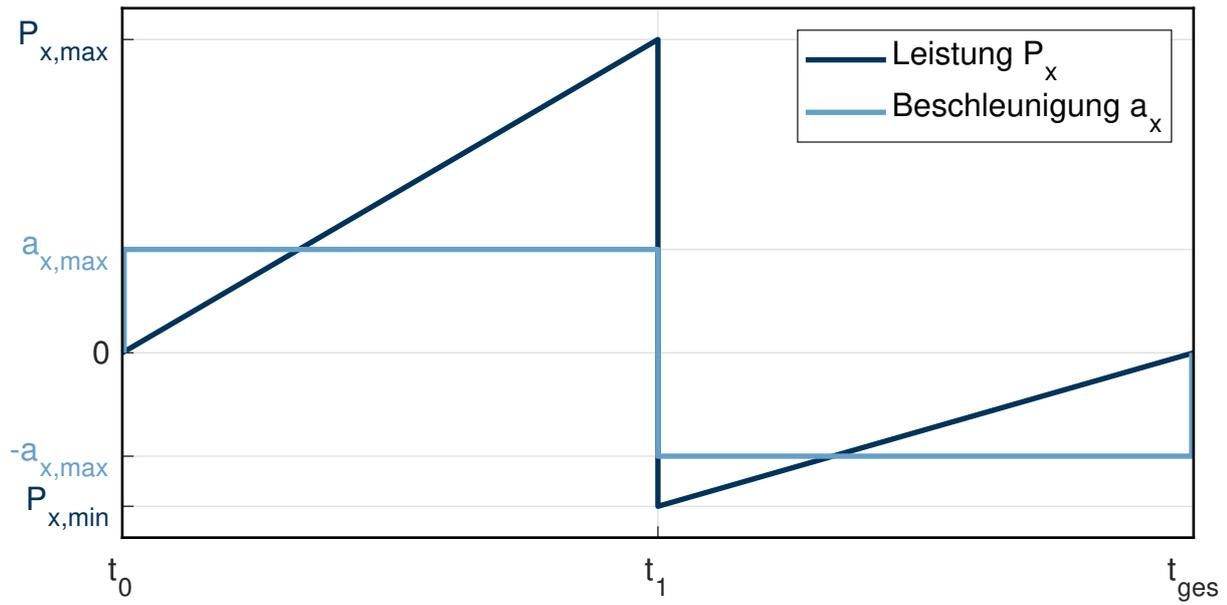


Abbildung D-2: Theoretischer Leistungsverlauf P_x und theoretischer Beschleunigungsverlauf a_x einer Spitzfahrt des Fahrtriebs über der Zeit (vgl. [Rie-2018, S. 21])

$$P_{x,B}(v_x) = \frac{(m_x \cdot a_x + F_{x,R}) \cdot |v_x|}{\eta_x} \quad [t_0, t_1] \quad (\text{D-4})$$

$$P_{x,V}(v_x) = (-m_x \cdot a_x + F_{x,R}) \cdot |v_x| \cdot \eta_x \quad [t_1, t_{\text{ges}}] \quad (\text{D-5})$$

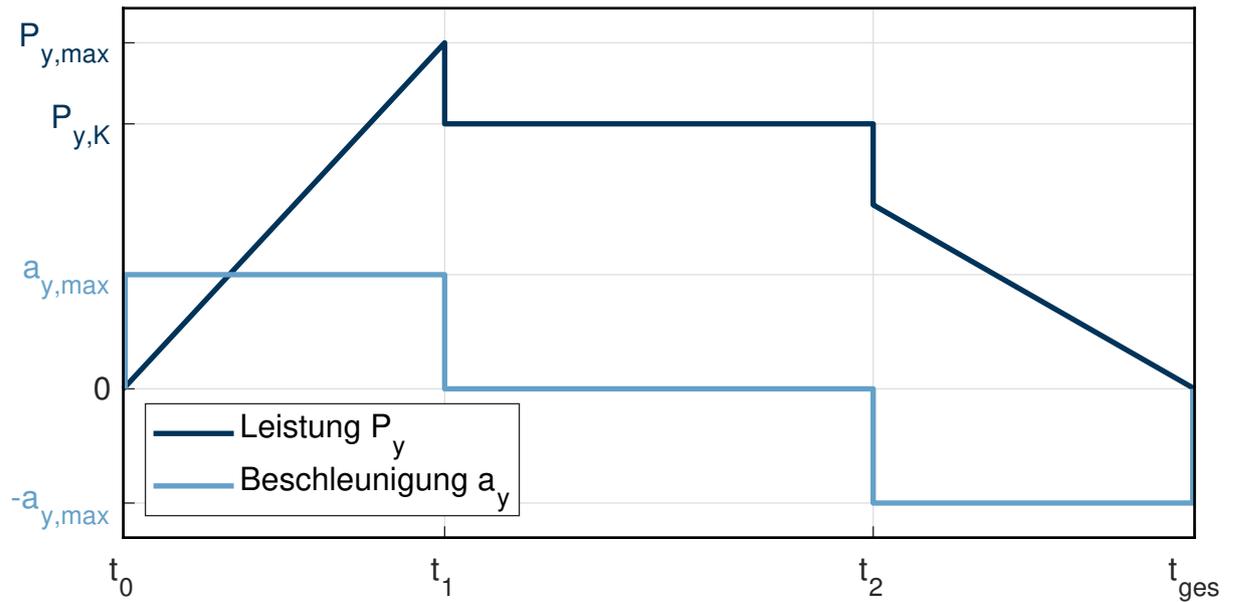


Abbildung D-3: Theoretischer Leistungsverlauf P_y und theoretischer Beschleunigungsverlauf a_y einer Normalfahrt des Hubantriebs (Hubbewegung) über der Zeit (vgl. [Rie-2018, S. A-2])

$$P_{+y,B}(v_y) = \frac{(m_y \cdot (g + a_y) + F_{y,R}) \cdot |v_y|}{\eta_y} \quad [t_0, t_1] \quad (D-6)$$

$$P_{+y,K}(v_y) = \frac{(m_y \cdot g + F_{y,R}) \cdot |v_y|}{\eta_y} \quad [t_1, t_2] \quad (D-7)$$

$$P_{+y,V}(v_y) = \frac{(m_y \cdot (g - a_y) + F_{y,R}) \cdot |v_y|}{\eta_y} \quad [t_2, t_{\text{ges}}] \quad (D-8)$$

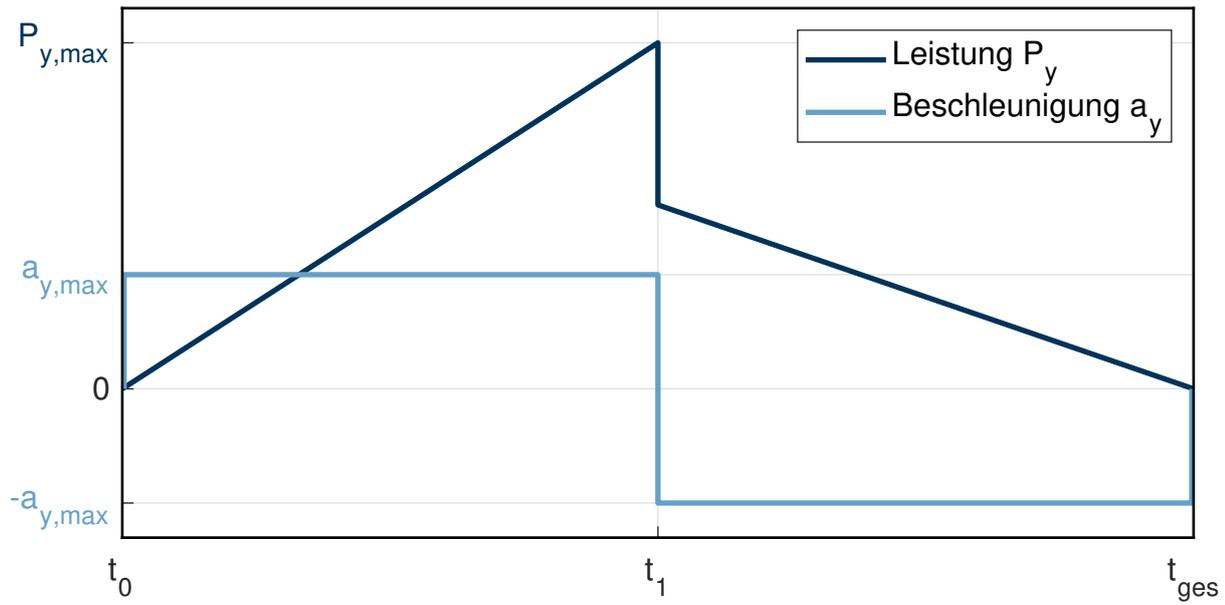


Abbildung D-4: Theoretischer Leistungsverlauf P_y und theoretischer Beschleunigungsverlauf a_y einer Spitzfahrt des Hubantriebs (Hubbewegung) über der Zeit (vgl. [Rie-2018, S. A-5])

$$P_{\text{Hub,B}}(v_y) = \frac{(m_y \cdot (g + a_y) + F_{y,R}) \cdot |v_y|}{\eta_y} \quad [t_0, t_1] \quad (\text{D-9})$$

$$P_{\text{Hub,V}}(v_y) = \frac{(m_y \cdot (g - a_y) + F_{y,R}) \cdot |v_y|}{\eta_y} \quad [t_1, t_{\text{ges}}] \quad (\text{D-10})$$

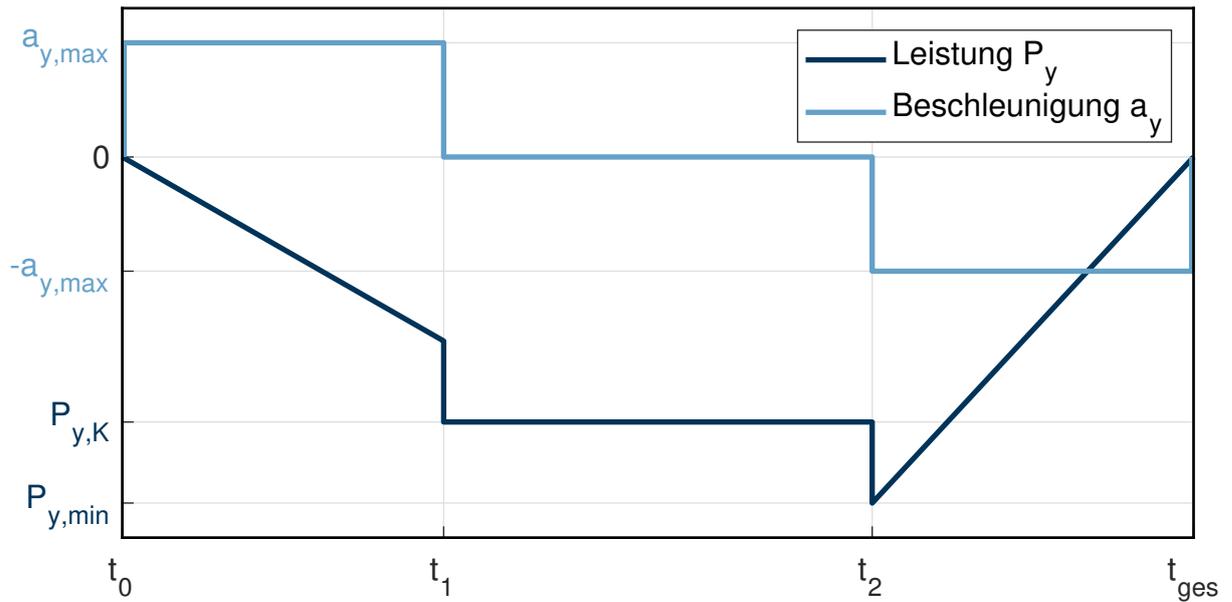


Abbildung D-5: Theoretischer Leistungsverlauf P_y und theoretischer Beschleunigungsverlauf a_y einer Normalfahrt des Hubantriebs (Senkbewegung) über der Zeit (vgl. [Rie-2018, S. A-3])

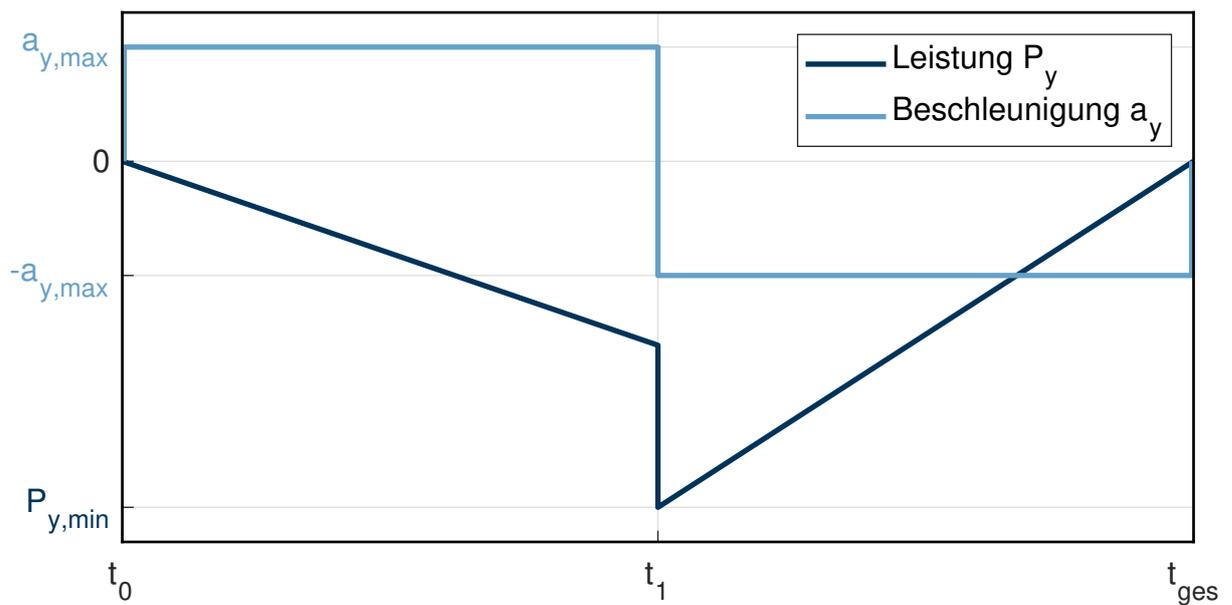


Abbildung D-6: Theoretischer Leistungsverlauf P_y und theoretischer Beschleunigungsverlauf a_y einer Spitzfahrt des Hubantriebs (Senkbewegung) über der Zeit (vgl. [Rie-2018, S. A-6])

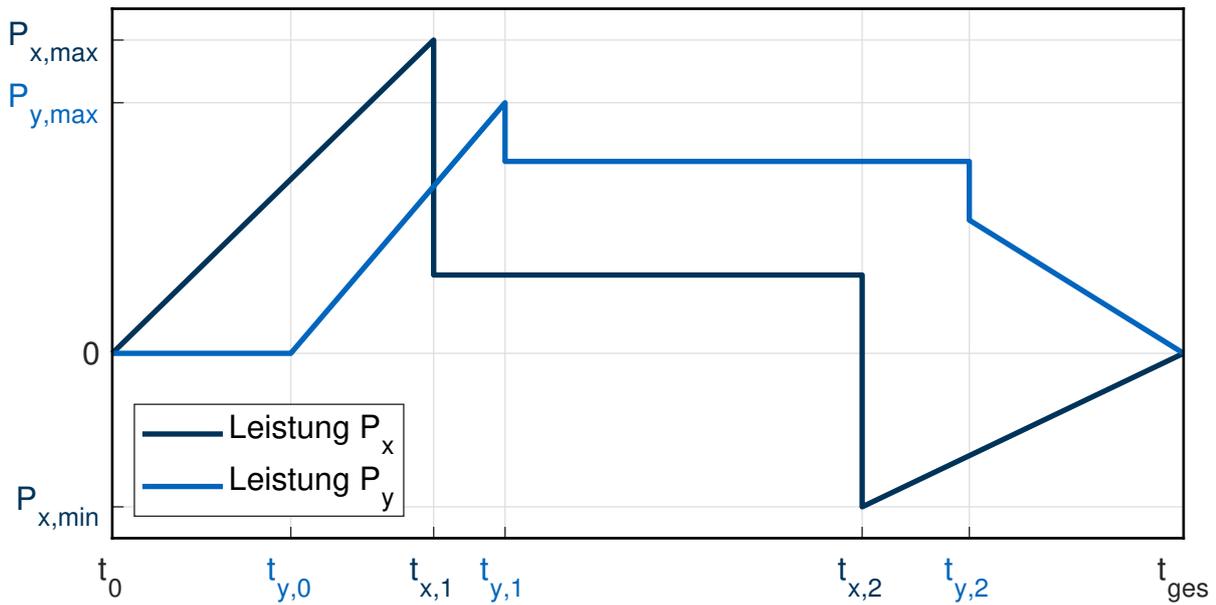


Abbildung D-7: Theoretische Leistungsverläufe von P_x und P_y bei einer kombinierten Fahr- und Hubbewegung über der Zeit bei Verwendung einer Rückspeiseeinheit (vgl. [Rie-2018, S. 20, A-2])

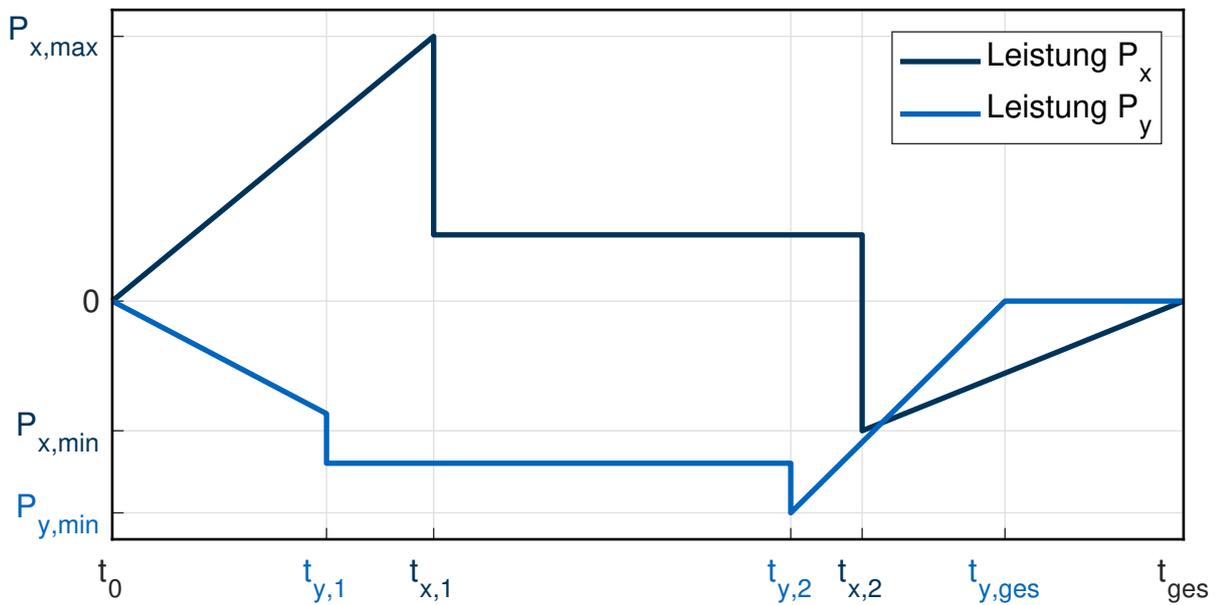


Abbildung D-8: Theoretische Leistungsverläufe von P_x und P_y bei einer kombinierten Fahr- und Senkbewegung über der Zeit bei Verwendung einer Rückspeiseeinheit (vgl. [Rie-2018, S. 20, A-3])

E Ergänzende Simulationsergebnisse

E.1 Tabellen der Korrelationswerte der Konfigurationen im Einzelspielbetrieb

Tabelle E-1: Korrelationswerte für die variierten Parameter der AKL Konfigurationen im Einzelspielbetrieb mit Signifikanzgrenze α , p -Wert und Signifikanz S

Parameter	Energiebedarf				Durchsatz			
	α in %	p in %	s	r	α in %	p in %	s	r
n_{col}	0,31	0,00	+	0,24	0,25	0,00	+	-0,84
n_{lev}	0,21	0,00	+	0,48	0,28	0,00	+	-0,27
a_x	0,45	0,00	+	0,11	0,38	0,00	+	0,12
a_y	0,83	5,87	-	-0,02	0,50	0,00	+	0,08
v_x	0,22	0,00	+	0,40	0,26	0,00	+	0,32
v_y	5,00	87,52	-	0,00	0,42	0,00	+	0,12
η_x	0,23	0,00	+	-0,48	1,25	12,20	-	-0,02
η_y	0,29	0,00	+	-0,25	1,67	13,01	-	-0,02
m_{FW}	0,28	0,00	+	0,26	0,56	0,00	+	-0,05
m_{HW}	0,33	0,00	+	0,23	0,63	4,28	-	-0,02
m_{NL}	0,56	0,00	+	0,06	0,71	4,65	-	-0,02
Occ	1,00	6,32	-	-0,02	2,50	53,59	-	-0,01

Tabelle E-2: Korrelationswerte für die variierten Parameter der APL Konfigurationen im Einzelspielbetrieb mit Signifikanzgrenze α , p -Wert und Signifikanz S

Parameter	Energiebedarf				Durchsatz			
	α in %	p in %	s	r	α in %	p in %	s	r
n_{col}	0,33	0,00	+	0,20	0,25	0,00	+	-0,67
n_{lev}	0,21	0,00	+	0,58	0,28	0,00	+	-0,33
a_x	0,50	0,00	+	0,06	0,45	0,00	+	0,10
a_y	5,00	92,42	-	0,00	0,42	0,00	+	0,11
v_x	0,36	0,00	+	0,20	0,26	0,00	+	0,45
v_y	1,67	16,82	-	-0,01	0,31	0,00	+	0,24
η_x	0,29	0,00	+	-0,25	0,83	0,23	+	-0,03
η_y	0,22	0,00	+	-0,40	2,50	74,17	-	0,00
m_{FW}	0,36	0,00	+	0,16	0,83	2,79	-	-0,02
m_{HW}	0,24	0,00	+	0,42	0,71	0,11	+	0,03
m_{NL}	0,63	0,01	+	0,04	1,00	4,52	-	-0,02
Occ	1,25	15,66	-	0,01	0,56	0,01	+	-0,04

Tabelle E-3: Korrelationswerte für die variierten Parameter und k_{EE} der AKL Konfigurationen im Einzelspielbetrieb mit Signifikanzgrenze α , p -Wert und Signifikanz S

Parameter	K_{EE}			
	α_{corr} in %	p in %	s	r
n_{col}	0,50	0,00	+	0,33
n_{lev}	0,42	0,00	+	0,40
a_x	2,50	0,80	+	0,03
a_y	1,25	0,00	+	0,06
v_x	0,71	0,00	+	-0,14
v_y	1,67	0,05	+	0,03
η_x	0,56	0,00	+	0,31
η_y	0,63	0,00	+	0,17
m_{FW}	1,00	0,00	+	0,11
m_{HW}	0,83	0,00	+	-0,12
m_{NL}	0,45	0,00	+	0,64
Occ	5,00	14,47	-	0,01

Tabelle E-4: Korrelationswerte für die variierten Parameter und k_{EE} der APL Konfigurationen im Einzelspielbetrieb mit Signifikanzgrenze α , p -Wert und Signifikanz S

Parameter	K_{EE}			
	α_{corr} in %	p in %	s	r
n_{col}	0,50	0,00	+	0,36
n_{lev}	1,25	0,01	+	0,04
a_x	1,67	0,97	+	-0,03
a_y	2,50	1,77	+	0,02
v_x	1,00	0,00	+	0,06
v_y	0,83	0,00	+	0,14
η_x	0,63	0,00	+	0,23
η_y	0,56	0,00	+	0,35
m_{FW}	0,71	0,00	+	-0,18
m_{HW}	0,45	0,00	+	-0,36
m_{NL}	0,42	0,00	+	0,52
Occ	5,00	58,95	-	-0,01

E.2 Absolutwerte der Haupteffekte

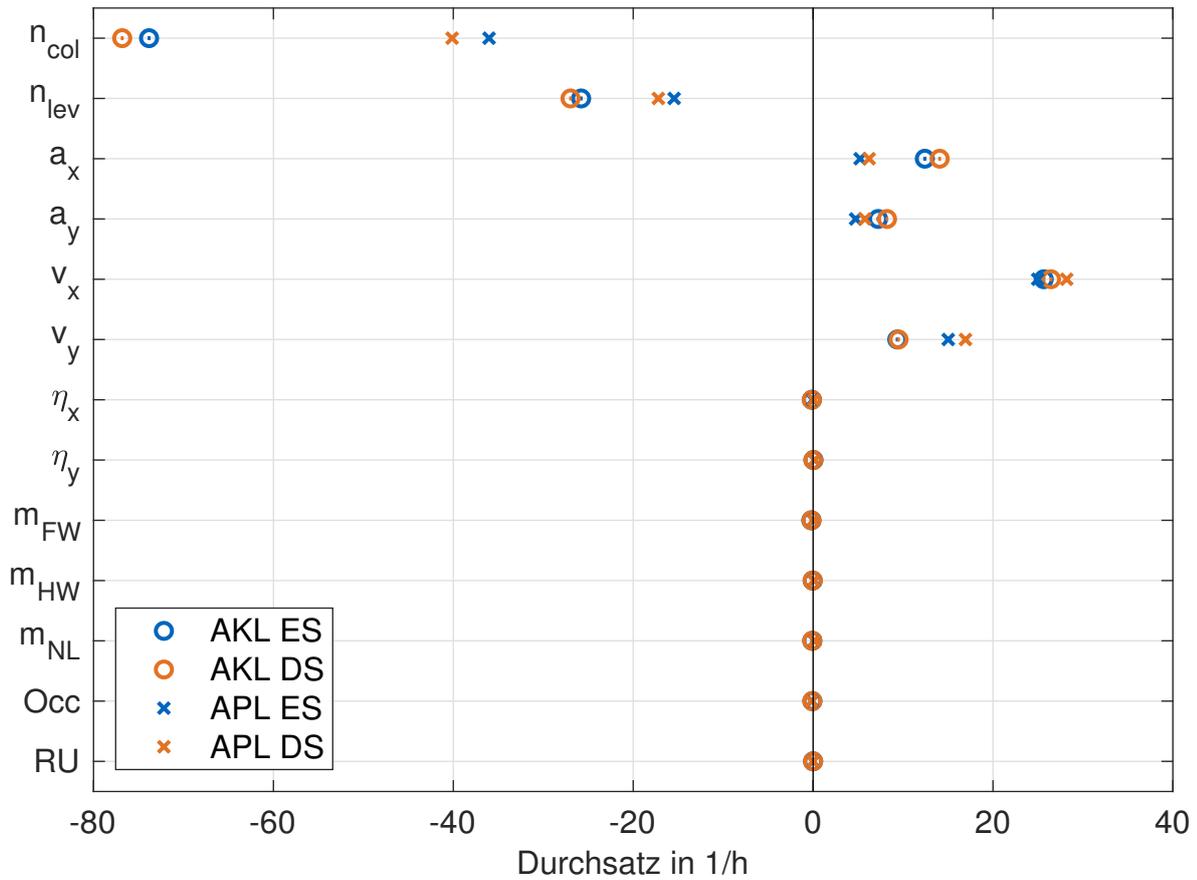


Abbildung E-1: Absolutwerte der Haupteffekte der Basisparameter und des Einsatzes der Rückspeiseeinheit auf den Durchsatz $TP_{AKL/APL}$

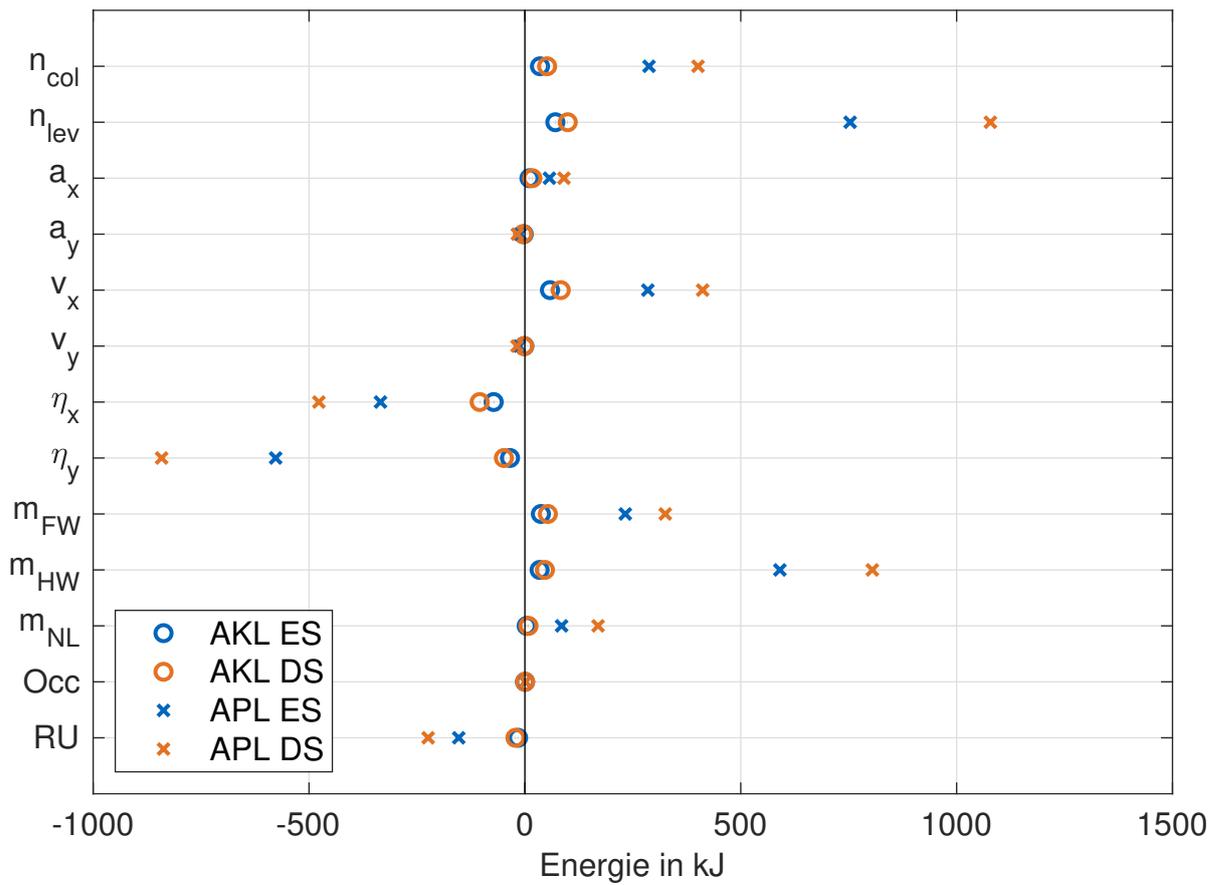


Abbildung E-2: Absolute Haupteffekte der Basisparameter und des Einsatzes der Rückspeiseeinheit auf den Energiebedarf $E_{AKL/APL}$

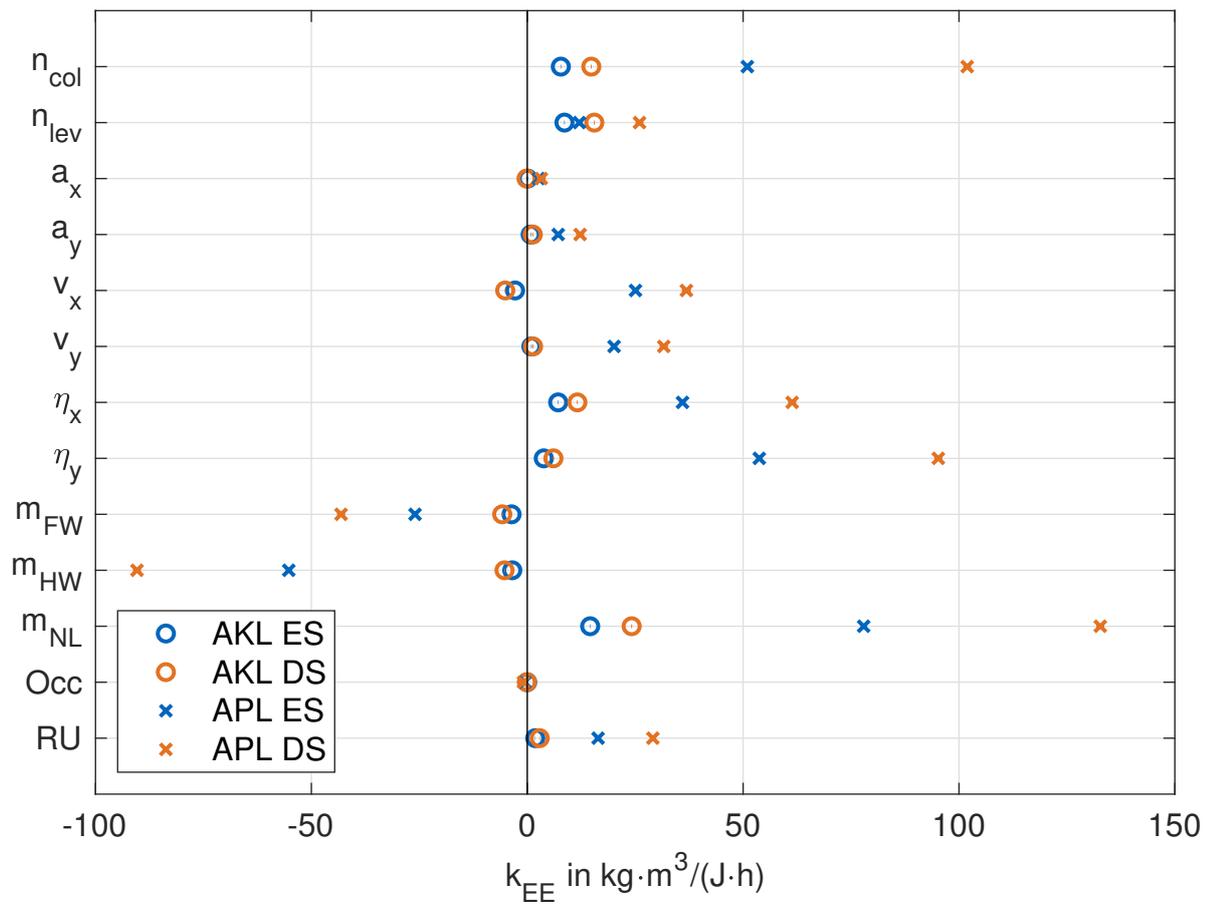


Abbildung E-3: Absolutwerte der Haupteffekte der Basisparameter und des Einsatzes der Rückspeiseinheit auf die Effizienzkennzahl k_{EE}

E.3 Tabellenwerte der Haupteffekte

Tabelle E-5: *Relativwerte der Haupteffekte auf den Durchsatz*

Parameter	Wertebereich AKL		AKL ES	AKL DS	Wertebereich APL		APL ES	APL DS
	Min.	Max.	in %	in %	Min.	Max.	in %	in %
n_{col}	30	150	-51,93	-43,40	20	120	-59,96	-51,92
n_{lev}	10	50	-18,14	-15,24	6	20	-25,72	-22,26
a_x	2 m/s ²	5 m/s ²	8,74	7,95	0,5 m/s ²	1,5 m/s ²	8,70	8,06
a_y	1 m/s ²	3 m/s ²	5,08	4,64	0,2 m/s ²	1 m/s ²	7,88	7,46
v_x	3 m/s	6 m/s	18,04	14,94	1,0 m/s	4,0 m/s	41,58	36,48
v_y	1,5 m/s	3 m/s	6,59	5,37	0,5 m/s	2 m/s ²	25,01	21,92
η_x	0,4	0,9	-0,09	-0,08	0,4	0,9	-0,07	0,08
η_y	0,4	0,9	0,03	0,02	0,4	0,9	0,30	0,23
m_{FW}	0,7 t	2 t	-0,14	-0,10	2 t	20 t	0,07	0,06
m_{HW}	0,15 t	0,45 t	-0,04	-0,02	1,0 t	4,5 t	0,16	0,12
m_{NL}	25 kg	100 kg	-0,07	-0,05	500 kg	1500 kg	0,26	0,23
Occ	0,4	0,9	-0,06	-0,05	0,4	0,9	-0,20	-0,22
RU	0	1	0,00	0,00	0	1	0,00	0,00

Tabelle E-6: Relativwerte der Haupteffekte auf den Energiebedarf

Parameter	Wertebereich AKL		AKL ES	AKL DS	Wertebereich APL		APL ES	APL DS
	Min.	Max.	in %	in %	Min.	Max.	in %	in %
n_{col}	30	150	32,49	33,64	20	120	33,30	32,32
n_{lev}	10	50	65,71	64,96	6	20	87,23	86,92
a_x	2 m/s ²	5 m/s ²	9,81	11,25	0,5 m/s ²	1,5 m/s ²	6,58	7,29
a_y	1 m/s ²	3 m/s ²	-2,64	-2,74	0,2 m/s ²	1 m/s ²	-1,30	-1,41
v_x	3 m/s	6 m/s	54,06	54,30	1,0 m/s	4,0 m/s	32,98	33,19
v_y	1,5 m/s	3 m/s	-1,30	-1,25	0,5 m/s	2 m/s ²	-1,49	-1,47
η_x	0,4	0,9	-67,37	-68,51	0,4	0,9	-38,73	-38,47
η_y	0,4	0,9	-32,20	-31,82	0,4	0,9	-66,85	-67,83
m_{FW}	0,7 t	2 t	34,48	34,79	2 t	20 t	26,93	26,21
m_{HW}	0,15 t	0,45 t	31,72	30,31	1,0 t	4,5 t	68,39	64,88
m_{NL}	25 kg	100 kg	3,83	5,46	500 kg	1500 kg	9,84	13,66
Occ	0,4	0,9	0,32	0,32	0,4	0,9	0,11	0,12
RU	0	1	-16,38	-16,71	0	1	-18,11	-18,58

Tabelle E-7: Relativwerte der Haupteffekte auf die Effizienzkennzahl

Parameter	Wertebereich AKL		AKL ES	AKL DS	Wertebereich APL		APL ES	APL DS
	Min.	Max.	in %	in %	Min.	Max.	in %	in %
n_{col}	30	150	62,30	70,88	20	120	59,63	67,50
n_{lev}	10	50	69,06	74,24	6	20	14,12	17,23
a_x	2 m/s ²	5 m/s ²	1,03	-0,75	0,5 m/s ²	1,5 m/s ²	3,07	2,15
a_y	1 m/s ²	3 m/s ²	6,34	6,11	0,2 m/s ²	1 m/s ²	8,38	8,11
v_x	3 m/s	6 m/s	-22,64	-24,39	1,0 m/s	4,0 m/s	29,32	24,42
v_y	1,5 m/s	3 m/s	7,68	6,44	0,5 m/s	2 m/s ²	23,52	20,95
η_x	0,4	0,9	57,41	55,49	0,4	0,9	42,07	40,65
η_y	0,4	0,9	30,67	28,97	0,4	0,9	62,87	63,07
m_{FW}	0,7 t	2 t	-29,11	-27,71	2 t	20 t	-30,41	-28,57
m_{HW}	0,15 t	0,45 t	-27,79	-25,16	1,0 t	4,5 t	-64,61	-59,88
m_{NL}	25 kg	100 kg	116,76	115,60	500 kg	1500 kg	91,15	87,92
Occ	0,4	0,9	-0,24	-0,24	0,4	0,9	-0,67	-0,58
RU	0	1	14,80	13,72	0	1	19,19	19,27

Tabelle E-8: Absolutwerte der Haupteffekte auf den Durchsatz

Parameter	Wertebereich AKL		AKL ES	AKL DS	Wertebereich APL		APL ES	APL DS
	Min.	Max.	in 1/h	in 1/h	Min.	Max.	in 1/h	in 1/h
n_{col}	30	150	-73,83	-76,81	20	120	-36,02	-40,13
n_{lev}	10	50	-25,79	-26,97	6	20	-15,45	-17,21
a_x	2 m/s ²	5 m/s ²	12,42	14,07	0,5 m/s ²	1,5 m/s ²	5,23	6,23
a_y	1 m/s ²	3 m/s ²	7,22	8,22	0,2 m/s ²	1 m/s ²	4,73	5,76
v_x	3 m/s	6 m/s	25,64	26,45	1,0 m/s	4,0 m/s	24,98	28,20
v_y	1,5 m/s	3 m/s	9,36	9,50	0,5 m/s	2 m/s ²	15,03	16,94
η_x	0,4	0,9	-0,13	-0,14	0,4	0,9	-0,04	0,07
η_y	0,4	0,9	0,04	0,03	0,4	0,9	0,18	0,18
m_{FW}	0,7 t	2 t	-0,20	-0,18	2 t	20 t	0,04	0,05
m_{HW}	0,15 t	0,45 t	-0,05	-0,04	1,0 t	4,5 t	0,10	0,09
m_{NL}	25 kg	100 kg	-0,09	-0,10	500 kg	1500 kg	0,15	0,18
Occ	0,4	0,9	-0,08	-0,09	0,4	0,9	-0,12	-0,17
RU	0	1	0,00	0,00	0	1	0,00	0,00

Tabelle E-9: Absolutwerte der Haupteffekte auf den Energiebedarf

Parameter	Wertebereich AKL		AKL ES	AKL DS	Wertebereich APL		APL ES	APL DS
	Min.	Max.	in kJ	in kJ	Min.	Max.	in kJ	in kJ
n_{col}	30	150	34,88	51,42	20	120	287,57	401,00
n_{lev}	10	50	70,54	99,31	6	20	753,36	1078,25
a_x	2 m/s ²	5 m/s ²	10,53	17,19	0,5 m/s ²	1,5 m/s ²	56,84	90,45
a_y	1 m/s ²	3 m/s ²	-2,83	-4,19	0,2 m/s ²	1 m/s ²	-11,21	-17,44
v_x	3 m/s	6 m/s	58,04	83,01	1,0 m/s	4,0 m/s	284,81	411,70
v_y	1,5 m/s	3 m/s	-1,40	-1,91	0,5 m/s	2 m/s ²	-12,88	-18,23
η_x	0,4	0,9	-72,33	-104,73	0,4	0,9	-334,45	-477,22
η_y	0,4	0,9	-34,57	-48,64	0,4	0,9	-577,31	-841,40
m_{FW}	0,7 t	2 t	37,02	53,18	2 t	20 t	232,58	325,17
m_{HW}	0,15 t	0,45 t	34,06	46,33	1,0 t	4,5 t	590,61	804,80
m_{NL}	25 kg	100 kg	4,11	8,34	500 kg	1500 kg	84,98	169,49
Occ	0,4	0,9	0,34	0,50	0,4	0,9	0,98	1,46
RU	0	1	-17,58	-25,55	0	1	-156,41	-230,47

Tabelle E-10: Absolutwerte der Haupteffekte auf die Effizienzkennzahl

Parameter	Wertebereich AKL		AKL ES	AKL DS	Wertebereich APL		APL ES	APL DS
	Min.	Max.	in kgm ³ /Jh	in kgm ³ /Jh	Min.	Max.	in kgm ³ /Jh	in kgm ³ /Jh
n_{col}	30	150	7,78	7,41	20	120	50,98	101,90
n_{lev}	10	50	8,62	7,76	6	20	12,07	26,00
a_x	2 m/s ²	5 m/s ²	0,13	-0,08	0,5 m/s ²	1,5 m/s ²	2,62	3,25
a_y	1 m/s ²	3 m/s ²	0,79	0,64	0,2 m/s ²	1 m/s ²	7,17	12,25
v_x	3 m/s	6 m/s	-2,82	-2,55	1,0 m/s	4,0 m/s	25,07	36,87
v_y	1,5 m/s	3 m/s	0,96	0,67	0,5 m/s	2 m/s ²	20,11	31,62
η_x	0,4	0,9	7,16	5,80	0,4	0,9	35,97	61,36
η_y	0,4	0,9	3,83	3,03	0,4	0,9	53,75	95,21
m_{FW}	0,7 t	2 t	-3,63	-2,90	2 t	20 t	-26,00	-43,12
m_{HW}	0,15 t	0,45 t	-3,47	-2,63	1,0 t	4,5 t	-55,23	-90,39
m_{NL}	25 kg	100 kg	14,57	12,09	500 kg	1500 kg	77,93	132,73
Occ	0,4	0,9	-0,03	-0,03	0,4	0,9	-0,57	-0,87
RU	0	1	1,85	1,43	0	1	16,40	29,10

E.4 Adjusted responses der Konfigurationen im Einzelspielbetrieb

E.4.1 Durchsatz

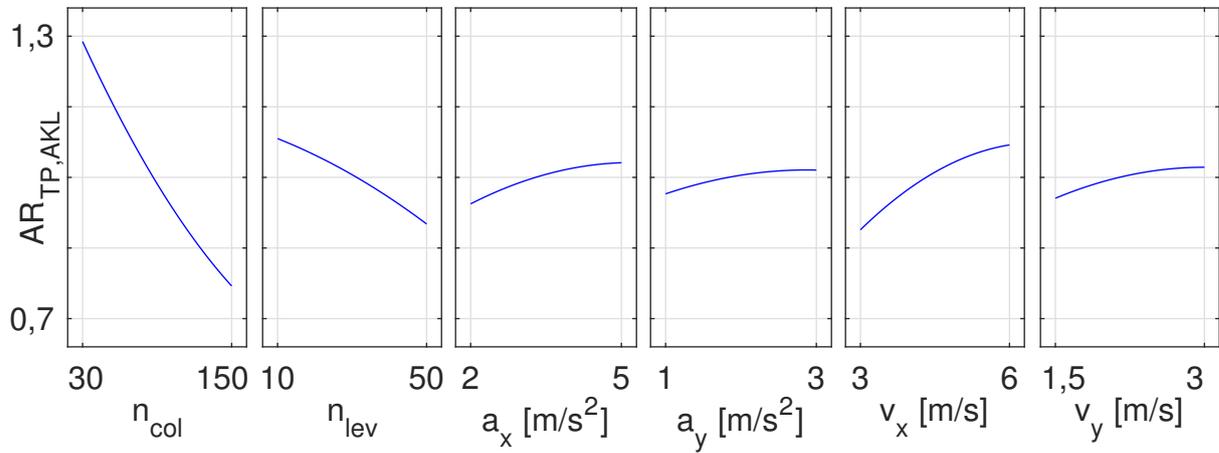


Abbildung E-4: Adjusted responses des Durchsatzes der AKL Konfigurationen im Einzelspielbetrieb

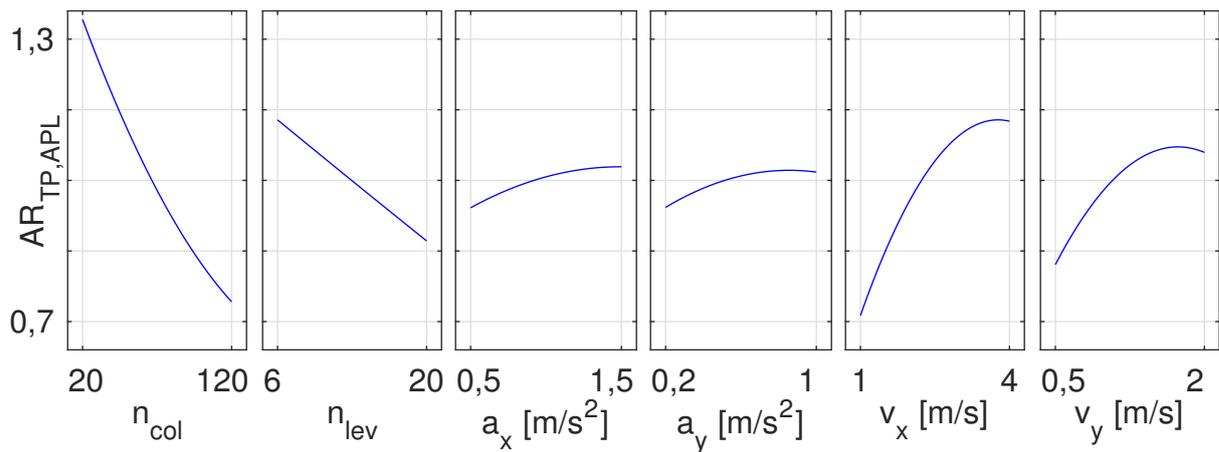


Abbildung E-5: Adjusted responses des Durchsatzes der APL Konfigurationen im Einzelspielbetrieb

E.4.2 Energiebedarf

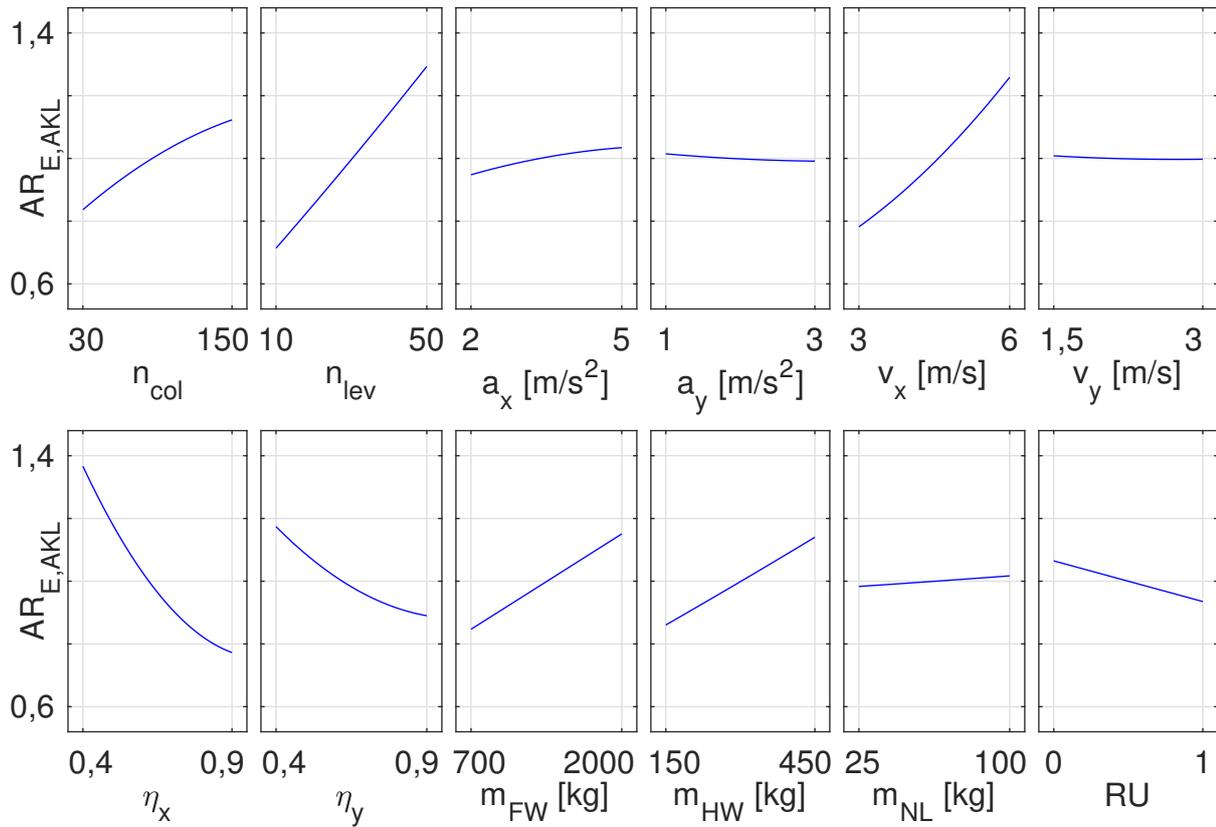


Abbildung E-6: Adjusted responses des Energiebedarfs der AKL Konfigurationen im Einzelspielbetrieb

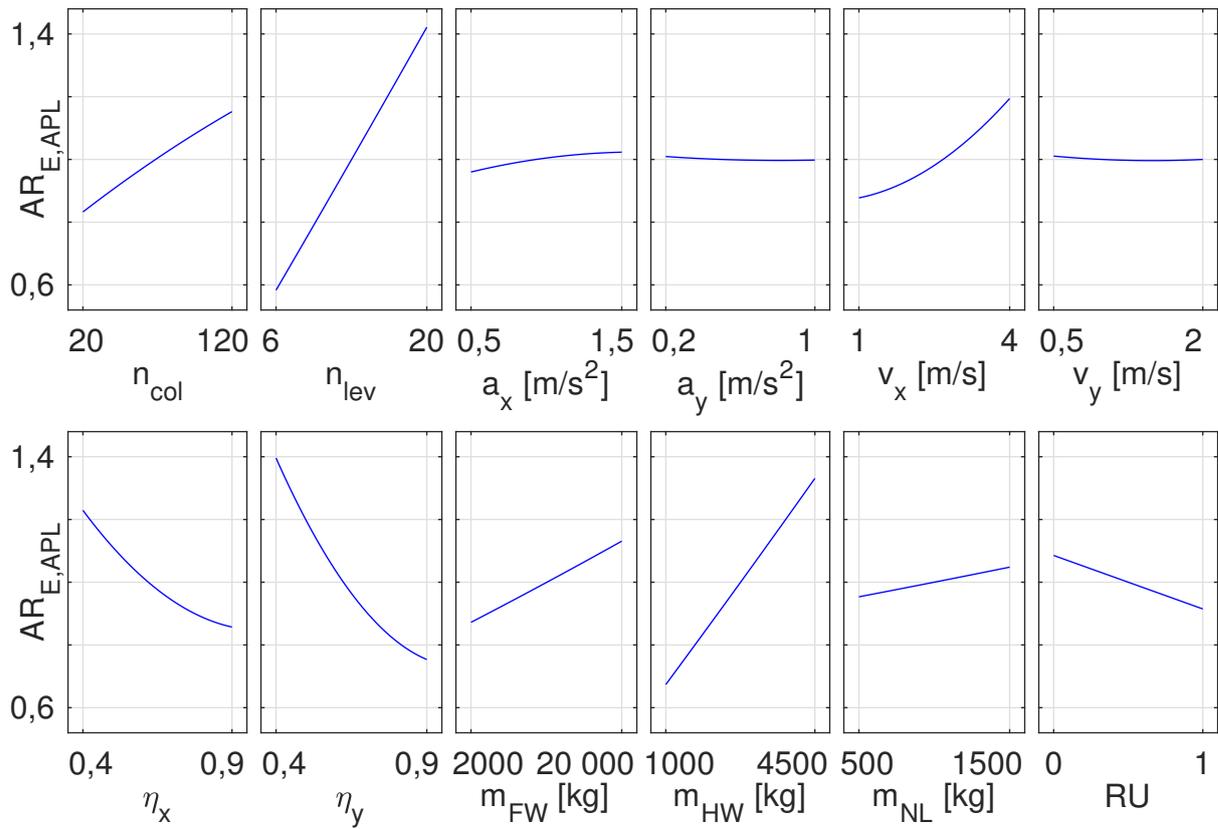


Abbildung E-7: Adjusted responses des Energiebedarfs der APL Konfigurationen im Einzelspielbetrieb

E.4.3 Effizienzkennzahl

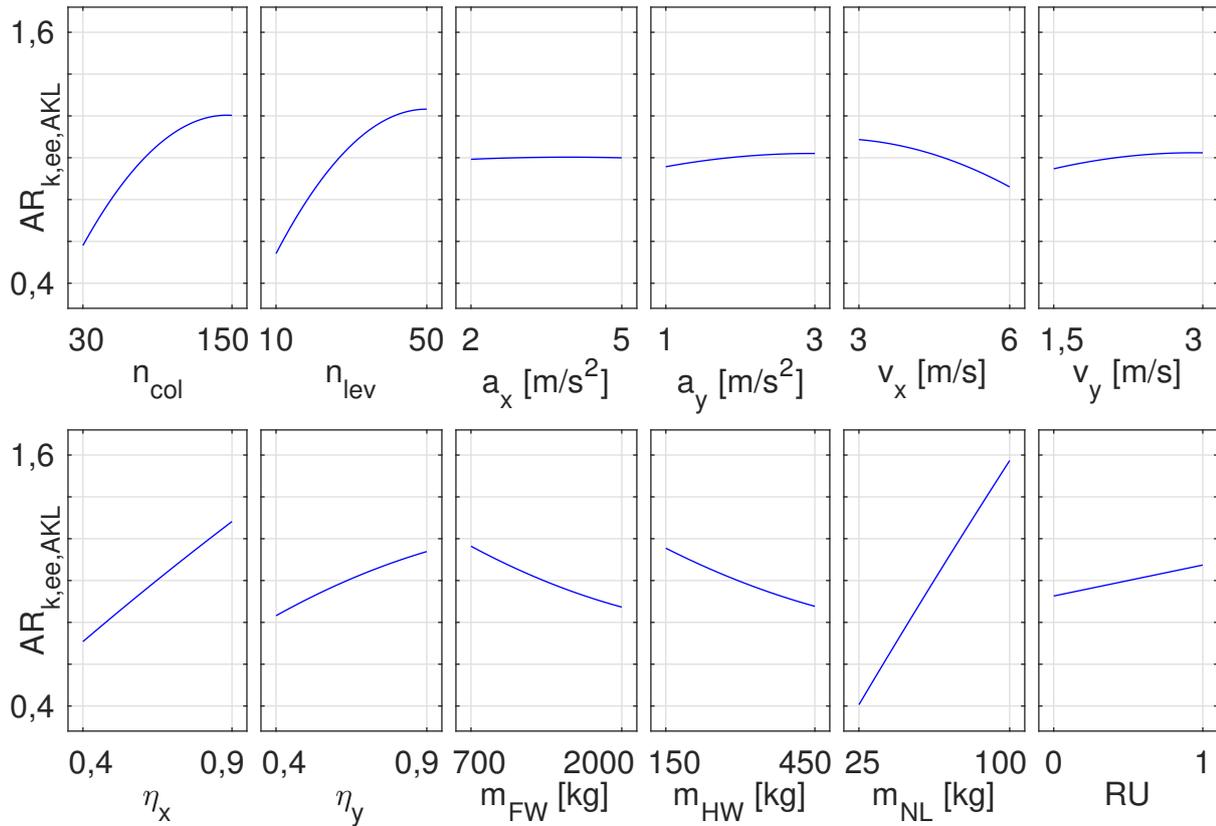


Abbildung E-8: Adjusted responses der Effizienzkennzahl der AKL Konfigurationen im Einzelspielbetrieb

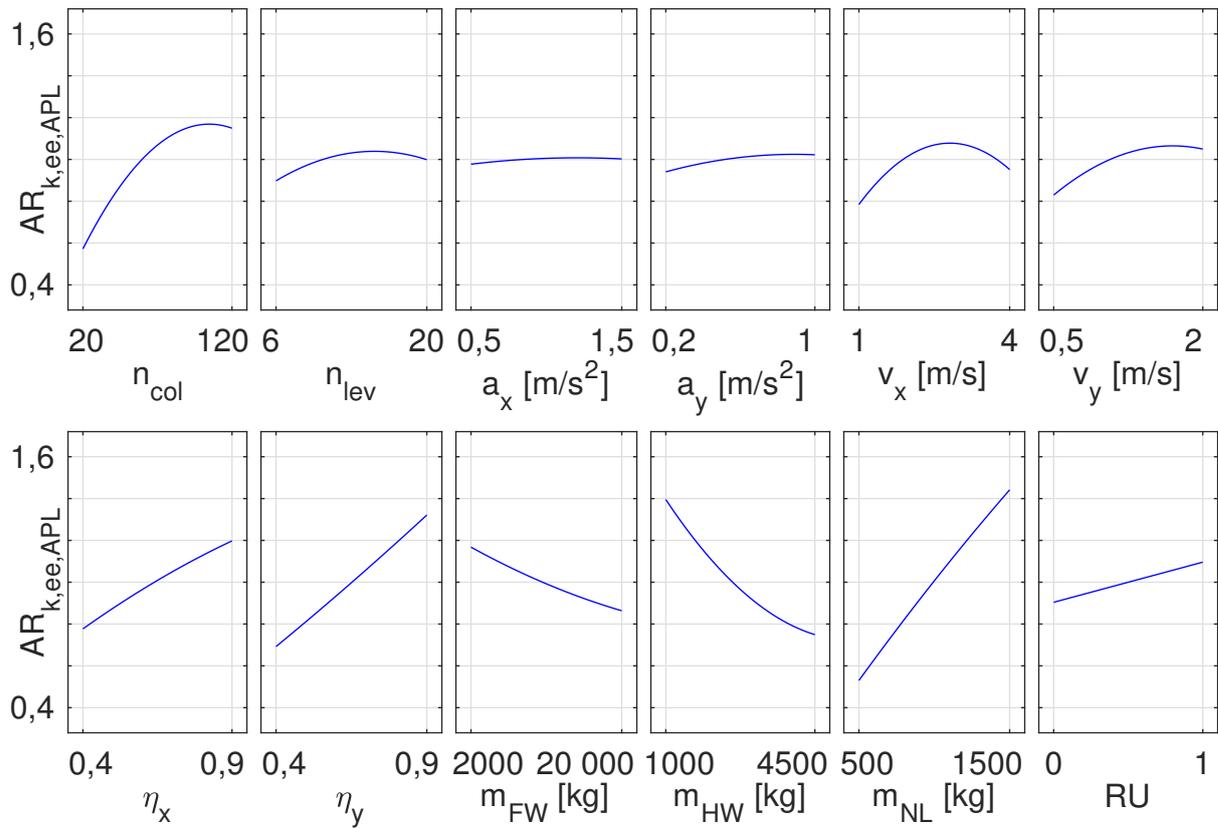


Abbildung E-9: Adjusted responses der Effizienzanzahl der APL Konfigurationen im Einzelspielbetrieb

E.5 Durchsatz des FEM Referenzspiels

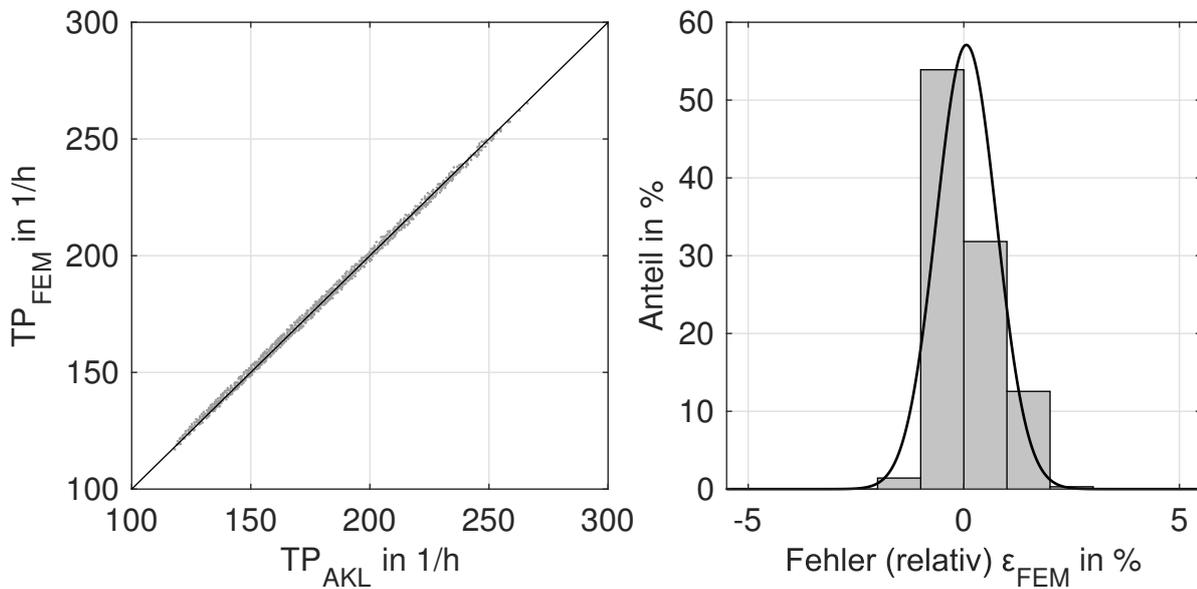


Abbildung E-10: Vergleich der Mittelwerte des Durchsatzes und dem Durchsatz des FEM Doppelspiels und Histogramm des relativen Fehlers mit $\bar{\epsilon}_{FEM} = 0,06\%$ und $\sigma_{\epsilon} = 0,70\%$ für AKLs

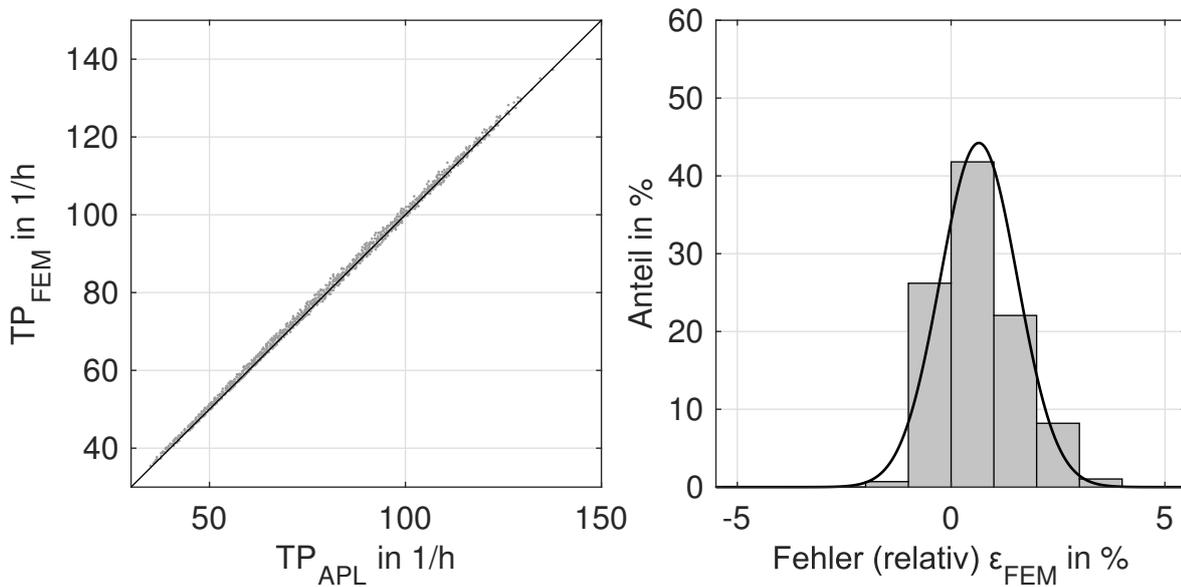


Abbildung E-11: Vergleich der Mittelwerte des Durchsatzes und dem Durchsatz des FEM Doppelspiels und Histogramm des relativen Fehlers mit $\bar{\epsilon}_{FEM} = 0,65\%$ und $\sigma_{\epsilon} = 0,90\%$ für APLs