



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Reduzierung der Betriebskosten mehrgassiger Lagersysteme mittels elektrischem Lastmanagement

Paul Hahn-Woernle

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen

der Technischen Universität München

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing Johannes Fottner

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

2. Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Die Dissertation wurde am 29.03.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 21.08.2018 angenommen.

Herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, Technische Universität München, 2018

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, 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: Paul Hahn-Woernle

Copyright © Paul Hahn-Woernle, 2018

ISBN: 978-3-941702-90-5

Printed in Germany, 2018

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als externer wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München und als Mitarbeiter von viastore SYSTEMS GmbH. In dieser Zeit habe ich mich intensiv mit dem Energieverbrauch von Regalbediengeräten und von mehrgassigen Lagersystemen, bedient von Regalbediengeräten, auseinandergesetzt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner, für das entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit diese Arbeit unter seiner Betreuung schreiben zu dürfen. Die gegebenen Freiräume haben es erst ermöglicht diese Arbeit neben meiner täglichen Tätigkeit umzusetzen. Es war eine sehr interessante und abwechslungsreiche Zeit an seinem Lehrstuhl mit tollen Kollegen. Zudem bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Prof. Dr.-Ing Johannes Fottner für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl fml für die gegenseitige Unterstützung. Insbesondere gilt mein Dank Sebastian Habenicht, Herrn Dr. Martin Krebs, Herrn Dr. Matthias Schweizer und Götz Bartling für die konstruktiven Diskussionen und wertvollen Korrekturvorschläge. Darüber hinaus danke ich den Kollegen aus der Arbeitsgruppe „Energieeffizienz & Nachhaltigkeit“.

Ich bedanke mich bei meinen Eltern und meinen Geschwistern, die mich immer bedingungslos unterstützt haben. Abschließend danke ich besonders meiner geliebten Frau Laura und meiner Tochter Rosa. Sie haben mich durch die Höhen und Tiefen meines Promotionsvorhabens begleitet, unterstützt und in schlechteren Phasen immer wieder aufgemuntert. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen

München, im Februar 2018

Paul Hahn-Woernle

Kurzzusammenfassung

Globalisierung erhöht den Wettbewerb, aber auch den Kostendruck für Unternehmen. Um diesem standzuhalten, müssen die Lieferketten und die Logistik permanent optimiert werden. Die Logistik teilt sich in die Transportlogistik und die Logistik in den Knotenpunkten des Logistiknetzwerks. Letztere wird Intralogistik genannt und steuert, organisiert und optimiert den innerbetrieblichen Warenfluss sowie den zugehörigen weltweiten Informationsfluss. Mit steigendem Automatisierungsgrad der Intralogistiksysteme steigt deren Bedarf an elektrischer Energie. Der Energiebedarf von mehrgassigen vollautomatisierten Lagersystemen ist aufgrund der vielen Beschleunigungs-, Verzögerungs-, Hebe- und Senkvorgänge mit wechselnden Lasten sehr volatil. Aufgrund von leistungsabhängigen Stromkostenanteilen und überdimensionierten Stromversorgungskomponenten entstehen dadurch zusätzliche Kosten. Daneben steigt in Deutschland der Anteil erneuerbarer Energien am Strommix und damit der Anteil der fluktuierenden Energiequellen wie Sonnen- und Windenergie. Diese sind in der Produktion unkontrollierbar, und um Versorgungsengpässe zu vermeiden, müssen die entstehenden Schwankungen ausgeglichen werden. Lastmanagement, bei der mittels Verzögerung von Prozessen die Stromnutzung der Stromproduktion angepasst wird, glättet den Energiebedarf, reduziert die zusätzlichen Strom- und Hardwarekosten und kann die volatile Stromproduktion zum Teil ausgleichen.

Das in dieser Dissertation vorgestellte Lastmanagement begrenzt den maximalen Leistungsbedarf sowie den Leistungsmittelwert des Lagersystems und verschiebt bei Bedarf Teilaufträge. Diese Verschiebung reduziert die Durchsatzleistung (Ein- und Auslagerungen pro Stunde), welche für die Betreiber die oberste Priorität hat. Damit die Betreiber dem Einsatz eines Lastmanagements zustimmen, muss der Einfluss auf die Durchsatzleistung bekannt sein. Dieser Einfluss wird in der vorliegenden Arbeit anhand einer Simulationsstudie quantifiziert. Dafür wurden das Lastmanagement und darauf aufbauend ein Simulationsmodell konzipiert, mit dem anhand von Screening-Versuchsplänen die signifikanten Einflussfaktoren auf die relative Durchsatzleistung des Lagersystems ermittelt wurden. Mit schrittweisen Regressionsanalysen wurden anschließend Regressionsgleichungen ermittelt, die eine schnelle, unkomplizierte Berechnung des Einflusses der Lastganggrenze auf die relative Durchsatzleistung ermöglichen. Die relative Durchsatzleistung verhält sich nahezu proportional zur Lastganggrenze. Die Grenze für den maximalen Leistungsbedarf beeinflusst die Durchsatzleistung nicht. Ein Lastmanagement begrenzt die maximalen Leistungsbedarf und

den Leistungsmittelwert aktiv und reduziert die leistungsabhängigen Kosten des Lagersystems.

Eine Leistungsbegrenzung verhindert aktiv Anlagenausfälle, und darüber hinaus können Komponenten kleiner dimensioniert werden. Der maximale Leistungsbedarf kann um bis zu 80 % reduziert werden. Dabei sinkt die relative Durchsatzleistung maximal um 1 %. Zusätzlich ergibt sich die Möglichkeit, an den durch die Energiewende entstehenden Regelenergiemärkten oder mit verschiebbaren Lasten an Strombörsen teilzunehmen, um die Stromkosten zu senken.

Abstract

Globalisation exposes companies to greater competitive and financial pressure. To withstand this competition, supply chains and the related logistics processes have to be optimized continuously. These processes can be divided into 'transport logistics' and the logistics inside the supply chain hubs. The latter is also called 'intralogistics', and controls, organizes and optimizes the in-house material flow as well as the related global information flow. The growing need of automatization increases the electrical energy demand of intralogistics systems. Due to repetitive acceleration, deceleration, lifting and lowering movements with varying loads, multi-aisle storage and retrieval systems have a volatile energy consumption, which leads to high energy dependent costs through high peak loads and oversized electrical hardware. Additionally, in Germany, the share of sustainable energies in the electricity mix increases and, within it, the share of fluctuating energy sources like solar and wind energy. Fluctuating energy is uncontrollable in production. To avoid a blackout the volatile energy production has to be balanced. On demand, an electrical power load management system delays energy consuming tasks and reduces the power peaks. It is therefore able to balance volatile energy production and to reduce the energy dependent costs of multi-aisle storage and retrieval systems.

This dissertation presents a power load management system which limits the maximum power demand and the mean power demand within a defined period (in this case 15 minutes). For that purpose it delays tasks of the storage and retrieval systems. However, for the operator of a material-handling system, the throughput (the inbound and outbound movements) of the system has the highest priority. For the strategies of a power load management system to be accepted by the operators, the impact of the power load management on the throughput of a multi-aisle storage and retrieval system has to be quantified, using a simulation study. The power load management system and a simulation model are designed to identify the significant input values that have an impact on the relative throughput performance, using screening experiments. A stepwise regression allows to determine a simplified equation to calculate the impact of the power load management system on the relative throughput performance of multi-aisle storage and retrieval systems. The relative throughput performance is proportional to the relative mean power limit of the system. The maximum power limit does not impact the relative throughput performance. The presented power load management limits the maximum and the mean power demand of the system and, therefore, reduces the energy dependent costs of the multi-aisle storage and retrieval system. Additionally the maximum power limit actively prevents a system breakdown and the

electrical equipment can be downsized. With a relative throughput loss of less than 1 % the maximum power demand can be reduced by up to 80 % by the power load management system. In the future, using the power load management system will allow companies to participate in the emerging energy balancing markets in order to reduce energy costs even further.

Inhaltsverzeichnis

Formelverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung	5
1.3 Vorgehensweise	6
2 Stand der Technik und Wissenschaft	9
2.1 Stand der Technik von automatisierten Lagersystemen	9
2.1.1 Aufbau eines vollautomatischen Lagersystems mit RBG	10
2.1.2 Typen und Aufbau eines Regalbediengeräts	12
2.1.3 Arbeitsweise und Steuerungsstrategien eines RBG	20
2.1.4 Materialflussleistung eines RBG	24
2.1.5 Software und IT	26
2.2 Energietechnische Grundlagen	28
2.2.1 Netzanschlussschreiben und Kabelquerschnittsberechnung	28
2.2.2 Lastmanagement	31
2.2.3 Stromkosten	34
2.2.4 Auslegung von Transformatoren	38
2.3 Stand der Forschung	41
2.3.1 Energiebedarfsermittlung von Lagersystemen	42
2.3.2 Spielzeit- und Durchsatzleistungsberechnung	49
2.3.3 Lastmanagement	50
2.4 Forschungslücke und Aufgabenstellung	52
2.4.1 Forschungsfragen	54
2.4.2 Methodischer Ansatz	56
3 Systemanalyse und Konzipierung des Lastmanagements und des Simulationsmodells	61
3.1 Aufgabendefinition	61
3.2 Systemanalyse	63
3.2.1 RBG-Auftragseinlastung	64

3.2.2	RBG-Steuerungsfunktionen	66
3.2.3	RBG-Energieversorgung	71
3.2.4	Lastmanagement	73
3.3	Konzeptmodell	76
3.3.1	Administrationsebene des Simulationsmodells	77
3.3.2	Dispositionsebene	79
3.3.3	Steuerungsebene	80
3.3.4	Operationsebene	81
3.4	Ablaufstruktur des Simulationsmodells	83
3.4.1	Externe Ablauflogik des Simulationsmodells	83
3.4.2	Interne Ablauflogik des Simulationsmodells	85
3.5	Modellformalisierung	88
3.5.1	Einfache Achssteuerung	89
3.5.2	Erweiterte Achssteuerung	89
3.5.3	Lastmanagement-Freigaben	95
3.5.4	Erweiterungen der Leistungsberechnung	97
3.5.5	Leistungsberechnung RBG-Fahrten	98
4	Implementierung des Simulationsmodells	103
4.1	Lastmanagement	103
4.2	Auftragsabwicklung	106
4.3	Achssteuerung	107
4.4	Bremsensteuerung	108
4.5	LAM-Leistung	114
4.6	Schaltschränke	115
4.6.1	Mitfahrender Schaltschrank	115
4.6.2	Stationärer Schaltschrank	117
5	Verifikation und Validierung des Simulationsmodells	119
5.1	Verifikation	120
5.2	Datenbeschaffung und -aufbereitung	121
5.2.1	Systemlastdaten	123
5.2.2	Technische Daten	126
5.2.3	Kalibrierungs- und Validierungsdaten	129
5.3	Kalibrierung und Validierung der RBG-Parameter	135
5.3.1	Fahrwerksparameter AKL	135

5.3.2	Hubwerkparameter AKL	142
5.3.3	Fahrwerkparameter APL	147
5.3.4	Hubwerkparameter APL	152
5.4	Validierung der Leistungsberechnung von einzelnen Fahrten des einzelnen RBG	157
5.5	Validierung der Leistungsberechnung von mehreren parallelen RBG über einen längeren Zeitraum	165
5.6	Validierung der Funktionsweise des LM	168
5.7	Zusammenfassung Verifikation und Validierung	177
6	Simulation und Ergebnisse	179
6.1	Grundlagen der Versuchsplanung und Varianzanalyse	179
6.1.1	Regressionsanalyse	185
6.2	Planung der Simulationsexperimente	188
6.2.1	Festlegen der Zielgrößen und Erfassung der Randbedingungen	190
6.2.2	Ermittlung der möglichen Einflussgrößen und Abschätzung deren Auswirkungen auf die Zielgrößen	191
6.2.3	Ermittlung der Wertebereiche der variablen Eingangsgrößen	192
6.2.4	Aussieben signifikanter Einflussfaktoren mit Hilfe von Screening-Versuchsplänen	194
6.3	Simulationsvorbereitung für die Hauptuntersuchung	214
6.3.1	Auswahl der Art der Experimentplanung des Plantyps und der Stufen für die Einflussgrößen	214
6.3.2	Bestimmung der Simulationsdauer und Art der Statistiksammlung	217
6.3.3	Umsetzen in Modellvarianten und Durchführung der Simulation	219
6.4	Simulationsergebnisse der Hauptuntersuchung	222
6.4.1	Automatisiertes Kleinteilelager	222
6.4.2	Automatisiertes Palettenregallager	235
6.5	Abschließende Bewertung der Auswirkungen des Lastmanagements	246
7	Zusammenfassung und Ausblick	253
	Literaturverzeichnis	259
	Abbildungsverzeichnis	269
	Tabellenverzeichnis	277
	Anhang A Programmcode	A-1

A.1 Prüfen der Leistungs- und Lastganggrenze	A-1
A.2 Berechnen der Zeitinformationen	A-2
A.3 Freigabepfung und aktualisieren der Leistungsvoraussage	A-2
Anhang B Berechnungen	B-1
B.1 Berechnen der Strecke des Spitzbogens auf die maximale Beschleunigung	B-1
B.2 Berechnen der Strecke des Spitzbogens auf die maximale Geschwindigkeit	B-2
B.3 Berechnen der Strecke des Spitzbogens auf die maximale Geschwindigkeit	B-4
B.4 Berechnen des gesuchten Zeitbedarfs der Fahrt für den 2. Fall, bis die Verzögerung einsetzt	B-5
B.5 Berechnen des gesuchten Zeitbedarfs der Fahrt für den 3. Fall, bis die Verzögerung einsetzt	B-6
B.6 Berechnung der Teststrecke der 2. Achse für die erweiterte Achssteuerung	B-6
B.7 Berechnung der reduzierten Geschwindigkeit der erweiterten Achssteuerung für den 2. Fall	B-7
B.8 Berechnung der reduzierten Geschwindigkeit der erweiterten Achssteuerung für den 3. Fall	B-9
Anhang C Technische Daten des Simulationsmodells	C-1
Anhang D Quantile der t-Verteilung	D-1
Anhang E Simulationsergebnisse	E-1
E.1 Screening Versuchsplan AKL	E-1
E.2 Screening Versuchsplan APL	E-3
E.3 Hauptuntersuchung AKL	E-5
E.4 Hauptuntersuchung APL	E-10

Formelverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
\bar{y}_g		Differenz der Mittelwerte
A	[mm ²]	Leiterquerschnitt
DF_F		Freiheitsgrade des Fehlers
DF_i		Freiheitsgrade des Modellparameters
DF_{VP}		Freiheitsgrade für den Versuchsplan
DSL_{mLM}		Simulierte Durchsatzleistung mit aktiviertem Lastmanagement
DSL_{oLM}		Simulierte Durchsatzleistung mit deaktiviertem Lastmanagement
E_{bez}	[kWh]	Bezogene elektrische Energie
E_i		Effekt
$E_{statSSab}$	[Ws]	Abgegebene Energie des stationären Schaltschranks
$E_{statSSauf}$	[Ws]	Aufgenommene Energie des stationären Schaltschranks
$E_{statSSges}$	[Ws]	Gesamter Energiebedarf des stationären Schaltschranks
F_{NLR}	[N]	Normalkraft auf die Laufrollen
F_{NLRy}	[N]	Normalkraft auf die Laufrollen des Hubwagens
$F_{Prüfi}$		Testgröße
F_{RWgax}	[N/(m/s)]	Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand des Fahrwerks
F_{RWgay}	[N/(m/s)]	Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand des Hubwagens
F_{RWy}		Rollwiderstand des Hubwagens
$GWLG$	[W]	Grenzwert für die Lastganggrenze
$GWLSP$	[W]	Grenzwert für die Leistungsspitze
GZF		Gleichzeitigkeitsfaktor (Tabelle 2-2)
H	[m]	Maximaler Hubweg

H_0		Nullhypothese
I	[A]	Aktuelle Stromstärke bzw. Strombedarf des Antriebs
I_A	[A]	Anlaufstrom aller RBG dieser Zuleitung oder der Komponente
I_{Ai}	[kW]	Anlaufstrom des RBG
I_{GM}	[A]	Grundmagnetisierungsstrom des Antriebs
I_N	[A]	Nennstrom
J_{Ax}	[kgm ²]	Trägheitsmoment des Fahrantriebes
J_{Ay}	[kgm ²]	Trägheitsmoment des Hubantriebs
J_{Gx}	[kgm ²]	Trägheitsmoment des Fahrwerkgetriebes
J_{Gy}	[kgm ²]	Trägheitsmoment des Hubwerkgetriebes
J_{LR}	[kgm ²]	Trägheitsmoment des Laufrads
J_{RT}	[kgm ²]	Trägheitsmoment des Riementriebs
K_A	[€]	Arbeitsabhängige Stromkosten
K_{NA}	[€]	Leistungsabhängige NAK
$K_{P,A}$	[€]	Stromkosten für den Abrechnungszeitraum
K_P	[€]	Leistungsabhängige Stromkosten
L	[m]	Maximaler Fahrweg
LGG	[%]	Relative Lastganggrenze
LSP	[%]	Relative Leistungsgrenze
M	[Nm]	Abtriebsmoment des Antriebs
M_{Ax}	[Nm]	Antriebsmoment des Fahrantriebs
M_{Ay}	[Nm]	Antriebsmoment des Hubwerks
M_N	[Nm]	Nennmoment des Antriebs
MP		Anzahl der berechneten Haupteffekte und Wechselwirkungen
MS		Mittlere quadratische Abweichung (Mean Squares)
P	[W]	Momentane elektrische Wirkleistung
P_0	[kW]	Leerlaufverluste des Transformators
P_A	[kW]	Anfahrleistung aller RBG

P_{Ai}	[kW]	Anfahrleistung des RBG
P_{Ax}	[W]	Antriebsleistung des Fahrtriebs
P_{Ay}	[W]	Antriebsleistung des Hubtriebs
P_K	[kW]	Kurzschlussverluste des Transformators bei 100 % Last
P_{LMW}	[W]	Leistungsmittelwert
P_{MWmax}	[W]	Maximaler Leistungsmittelwert
P_N	[W]	Nennleistung der Komponente
P_V	[kW]	Verlustleistung des Transformators bei der Belastung S_{ab}
P_{VGi}	[W]	Grundverluste der restlichen Komponenten
P_{VGr}	[W]	Grundverlustleistung
P_{VN}	[W]	Nennverlustleistung
P_{Vla}	[W]	Leistungsabhängige Verlustleistung
P_{VorA}	[W]	Leistungsvoraussage der Anlage
P_{VorA}^*	[W]	Vorläufige Leistungsvoraussage der Anlage
P_{VorTA}	[W]	Leistungsvoraussage des Teilauftrags
P_{Vsa}	[W]	Stromabhängige Verlustleistung
P_{mP0}	[W]	Arithmetische Mittel der Leistungsvoraussage für die aktuelle Periode
P_{mP1}	[W]	Arithmetische Mittel der Leistungsvoraussage für die folgende Periode
$P_{maxFahrt}$	[W]	Maximale Leistung der Leistungsvoraussagen für die Fahrten
R^2		Bestimmtheitsmaß
R_{adj}^2		Adjustierte Bestimmtheitsmaß
S_M	[kVA]	Mittlere Scheinleistung
S_N	[kVA]	Nennscheinleistung des Transformators
S_N	[VA]	Nennscheinleistung
S_{ab}	[kVA]	Abgegebene Scheinleistung des Transformators
S_i	[kVA]	Konstante Last über einen Zeitraum, die Last kann auch 0 kVA betragen

$SeKoeff_i$		Standardfehler des Faktors i oder der Wechselwirkung i
SSW		Summe der quadrierten Abweichungen innerhalb der Faktorstufen (Sum of Squares Within Groups)
SSB		Summe der quadrierten Abweichungen zwischen den Faktorstufen (Sum of Squares Between Groups)
T_{PD}	[min]	Dauer einer Messperiode
T_m	[h/a]	Jahresnutzungsdauer
TSS		Summe der quadrierten Abweichungen (Total Sum of Squares)
U	[V]	Spannung
X_i		Faktor
Y		Zielgröße
\hat{Y}		Ansatz für die Regressionsgerade
Z_{FWBr}		Zustand der Fahrwerksbremse
Z_{HWBr}		Zustand der Hubwerksbremse
a_{eff}	[m/s ²]	Effektive Beschleunigung
a_x	[m/s ²]	Fahrbeschleunigung
a_y	[m/s ²]	Hubbeschleunigung
b_0		Konstantes Glied
b_1		Regressionskoeffizient
b_i		Regressionskoeffizienten
$cos\varphi$		Phasenverschiebung
d_y		Richtungsfaktor
dt_{start}	[s]	Verzögerung durch das Öffnen der Bremsen
e		Residualgrößen bzw. Residuum
e		Schätzfehler
e_A	[€/kWh]	Arbeitspreis
e_{NA}	[€/kW]	Netzanschlussleistungspreis
e_P	[€/kW]	Jahres- bzw. Monats-Leistungspreis
f_{RWx}		Rollwiderstandsbeiwert des Fahrwerks

f_{RWy}		Rollwiderstandsbeiwert
g		Faktorstufe
i_{Gx}		Fahrwerksgetriebeübersetzung
i_{Gy}		Hubwerksgetriebeübersetzung
i_{SR}		Anzahl der festen Seilrollen zwischen Seiltrommel und Flaschenzug bzw. Last
l	[m]	Länge der Zuleitung
lmw		Variable zum Leistungsmittelwert (wahr: Lastganggrenze nicht verletzt, falsch: Lastganggrenze verletzt)
lsp		Variable zur Leistungsspitze (wahr: Leistungsgrenze nicht verletzt, falsch: Leistungsgrenze verletzt)
m_{LAM}	[kg]	Gewicht des Hubwagens mit LAM und Zuladung
m_{RBG}	[kg]	Masse des RBG inkl. Zuladung
n		Versuchsnummer
n		Anzahl der Stränge in einem Flaschenzug
n_{SP}		Stichprobenumfang
n_{RBG}		Anzahl der RBG
r	[m/s ³]	Ruck
r_{LR}	[m]	Laufgradradius
r_{ZRS}	[m]	Zahnriemenscheibenradius
s		Standardfehler der Schätzung
s_{b_i}		Standardfehler des Regressionskoeffizienten b_i
s_{A2}	[m]	Vorgegebene Strecke der 2. Achse
s_{HW}	[m]	Hubstrecke
s_{Pi}	[m]	In Phase i zurückgelegte Strecke
s_{SBa}	[m]	Strecke einer Spitzbogenfahrt auf die maximale Beschleunigung
s_{SBv}	[m]	Strecke für den Spitzbogen auf die maximale Geschwindigkeit
s_{ges}	[m]	Gesamte Strecke
s_{testA2}	[m]	Teststrecke der 2. Achse

t_0	[s]	Aktueller Simulationszeitpunkt
t_{01}	[s]	Summe der Zeiten beim Einzelspiel (Positionierung, Platzkontrolle, Schalt- und Kontrollvorgänge, Gabel- bzw. LAM-Spiel)
t_{02}	[s]	Summe der Zeiten beim Doppelspiel (Positionierung, Platzkontrolle, Schalt- und Kontrollvorgänge, Gabel- bzw. LAM-Spiel)
t_{Broeff}	[s]	Bremsenöffnungszeitpunkt
t_{Ende}	[s]	Möglicher Endzeitpunkt des Teilauftrags
$t_{FWBroeff}$	[s]	Bremsenöffnungszeit Fahrwerksbremse
$t_{FahrtFW}$	[s]	Fahrzeit des Fahrwerks
$t_{FahrtHW}$	[s]	Fahrzeit des Hubwerks
$t_{Freigabe}$	[s]	Freigabezeit
$t_{HWBroeff}$	[s]	Bremsenöffnungszeitpunkt Hubwerksbremse
t_{P0Ende}	[s]	Endzeitpunkt der aktuellen Messperiode
$t_{P0Start}$	[s]	Startzeitpunkt der aktuellen Messperiode
t_{P1}	[s]	Zeitbedarf für die Fahrt zwischen E und P ₁
$t_{P1E;P2A}$	[s]	Zeitbedarf für die Fahrt zwischen E, P _{1E} , P _{2A} und A
t_{P1Ende}	[s]	Endzeitpunkt der folgenden Messperiode
$t_{P1Start}$	[s]	Startzeitpunkt der folgenden Messperiode
t_{P2}	[s]	Zeitbedarf für die Fahrt zwischen E und P ₂
t_{PVorTa}	[s]	Zeitdauer der Leistungsvoraussage des Teilauftrags
t_{Pi}	[s]	Zeitbedarf für die Phase i
t_{Start}	[s]	Möglicher Startzeitpunkt des Teilauftrags
$t_{StartFW}$	[s]	Startzeitpunkt Fahrwerk
$t_{StartFW}^*$	[s]	Vorläufiger Startzeitpunkt des Fahrwerks
$t_{StartHW}$	[s]	Startzeitpunkt Hubwerk
$t_{StartHW}^*$	[s]	Vorläufiger Startzeitpunkt des Hubwerks
t_{empi}		empirische t-Wert
t_{geg}	[s]	Vorgegebene Zeit

t_{gesA2}	[s]	Zeitbedarf für das Fahren der 2. Achse
t_i	[s]	Zeitdauer der konstanten Last
t_i		t-Wert des Faktors
t_{m1}	[s]	Zeit für das mittlere Einzelspiel
t_{m2}	[s]	Zeit für das mittlere Doppelspiel
t_{oVerz}	[s]	Zeitbedarf ohne die Verzögerungsphase (5, 6, 7)
v_{Gr}	[m/s]	Grenzeschwindigkeit
v_{opt}	[m/s]	Optimierte Geschwindigkeit
v_x	[m/s]	Fahrgeschwindigkeit
v_y	[m/s]	Hubgeschwindigkeit (Heben positiv, Senken negativ)
y_n		Versuchsergebnis
z		Quantil für die Standardnormalverteilung
η_{Ax}		Wirkungsgrad des Fahrentriebs
η_{Ax}^*		Beschleunigungsabhängiger Wirkungsgrad des Fahrwerk- antriebs
η_{Ay}		Wirkungsgrad des Antriebs
η_{Gredx}		Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei Rückspei- sung
η_{Gredy}		Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei Rückspei- sung
η_{Gx}		Wirkungsgrad des Getriebes
η_{Gy}		Wirkungsgrad des Getriebes
η_{Gy}^*		Beschleunigungsabhängiger Wirkungsgrad des Getriebes
η_{Gy}^*		Richtungsabhängiger Wirkungsgrad des Getriebes
η_{LR}		Wirkungsgrad des Lauftrads
η_{LR}^*		Beschleunigungsabhängiger Wirkungsgrad des Laufrads
η_R		Wirkungsgrad einer Seilrolle (bei Gleitlagerung $\eta_R = 0,96$ und bei Wälzlagerung $\eta_R = 0,98$)
η_{RT}		Wirkungsgrad des Riementriebs
η_{RT}^*		Richtungsabhängiger Wirkungsgrad des Riementriebs

η_S		Wirkungsgrad des Flaschenzugs
μ_{rLRFW}		Rollreibungskoeffizient für die Laufrollen des Fahrwerks
μ_{rLRHW}		Rollreibungskoeffizient für die Laufrollen des Hubwagens
ω_{Ax}	[1/s]	Winkelgeschwindigkeit des Antriebs
$1 - \alpha$		Wahrscheinlichkeit für den Vertrauensbereich
Δv_{Pi}	[m/s]	Geschwindigkeitsänderung in der Phase i
ΔDSL	[%]	Prozentuale Reduzierung der Durchsatzleistung
κ	$\left[\frac{m}{mm^2 \Omega} \right]$	Leitwert (für Kupfer $56 \frac{m}{mm^2 \Omega}$, Aluminium $36 \frac{m}{mm^2 \Omega}$)
σ		Standardabweichung

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
2FWW	2-Faktor-Wechselwirkungen
A	Auslagerpunkt
A2A	Administration-To-Administration
AKL	Automatisches Kleinteilelager
APL	Automatisches Palettenlager
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
DSM	Demand Side Management
DSP	Doppelspiel
E	Einlagerpunkt
EAP	Einlager-/Auslagerplatz
EB	Energiebroker
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EnMS	Energiemanagementsysteme
EVU	Energieversorgungsunternehmen
fml	Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
GWLG	Grenzwert für die Lastganggrenze
GWLSP	Grenzwert für die Leistungsspitze
GZF	Gleichzeitigkeitsfaktor
HRL	Hochregallager
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IT	Informationstechnologie
LGG	Relative Lastganggrenze

LM	Lastmanagement
LMS	Lastmanagementsystem
LSP	Relative Leistungsgrenze
LVS	Lagerverwaltungssystem
MFR	Materialflussrechner
MFS	Materialflusssystem
<i>MS</i>	Mean Squares
NAK	Netzanschlusskosten
P_i	Referenzpunkte
P_{iA}	Referenzauslagerpunkt beim Doppelspiel
P_{iE}	Referenzeinlagerpunkt beim Doppelspiel
RBG	Regalbediengerät
SSB	Sum of Squares Between Groups
SSW	Sum of Squares Within Groups
TE	Transporteinheit
<i>TSS</i>	Total Sum of Squares
V&V	Verifikation und Validierung

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Globalisierung gibt Unternehmen die Möglichkeit in neue Märkte vorzudringen und neue Zulieferer und Kunden zu erschließen. Gleichzeitig steigen Wettbewerb und Kostendruck. Um in diesem Wettbewerb zu bestehen, bedarf es effizienter Lieferketten, welche die Logistik beinhalten [Boe-2007]. Ein Teil dieser Logistik ist die Intralogistik. Diese ist „die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschlages in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen“ [Arn-2006]. Ein Intralogistiksystem benötigt zum Betrieb Energie in Form von Elektrizität bzw. Strom. Die Kosten für den Strom steigen in den vergangenen Jahren an (siehe Abbildung 1-1), sodass die Betreiber der Intralogistiksysteme immer mehr darauf achten, welchen Strombedarf die Anlage hat. Früher war wichtig, welche Materialflussleistung ein Intralogistiksystem maximal erbringt. Heute vergleichen die Betreiber in der Vertriebsphase den Energiebedarf verschiedener Anlagen bei der benötigten Systemleistung.

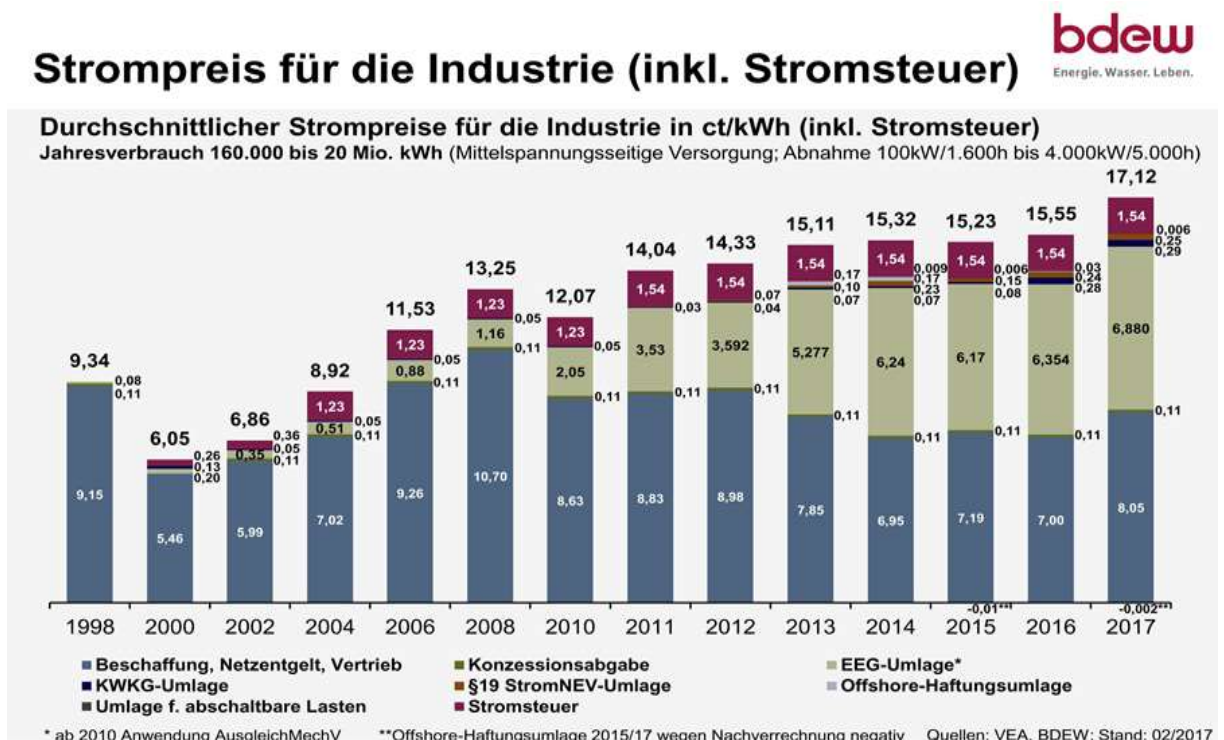


Abbildung 1-1: Strompreis für die Industrie [BDE-2017]

Der größte und am stärksten wachsende Anteil an den Stromkosten ist die Erneuerbare-Energien-Gesetz(EEG)-Umlage. Diese wird bspw. für die Vergütung von Strom aus erneuerbaren Energien verwendet, womit die Investition in erneuerbare Energien (EE) wirtschaftlich interessant und der Ausbau angeregt wird. Die Politik fördert EE, um das Fortschreiten der Klimaerwärmung aufzuhalten oder zumindest zu begrenzen. Mit dem Pariser UN-Klimaabkommen wurde beschlossen, die Erderwärmung bezogen auf das vorindustrielle Zeitalter auf unter 2 °C zu begrenzen [UNF-2015]. Wenn möglich, soll die Erderwärmung bei 1,5 °C gestoppt werden. Die Erderwärmung ist nach der Meinung vieler Forscher auf die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre zurückzuführen. Eines dieser Treibhausgase ist CO₂, dessen Konzentration in der Luft kontinuierlich steigt (siehe Abbildung 1-2). Um diesen Anstieg aufzuhalten, müssen anstelle von fossilen Brennstoffen regenerative Energiequellen (Sonnenenergie, Bioenergie, Wasserkraft, Windenergie etc.) für die Energieerzeugung verwendet werden. Diese setzen bei der Energieerzeugung kein CO₂ frei oder erneuern sich in menschlichen Zeitmaßstäben [Wes-2009] und binden das CO₂ wieder als Feststoff. Als Reaktion auf die Klimaerwärmung legt die Bundesregierung im EEG den Anteil der EE an der Stromversorgung in vier Stufen fest. Diese sind (nach [Deu-2008]):

- 35 Prozent spätestens bis zum Jahr 2020
- 50 Prozent spätestens bis zum Jahr 2030
- 65 Prozent spätestens bis zum Jahr 2040
- 80 Prozent spätestens bis zum Jahr 2050

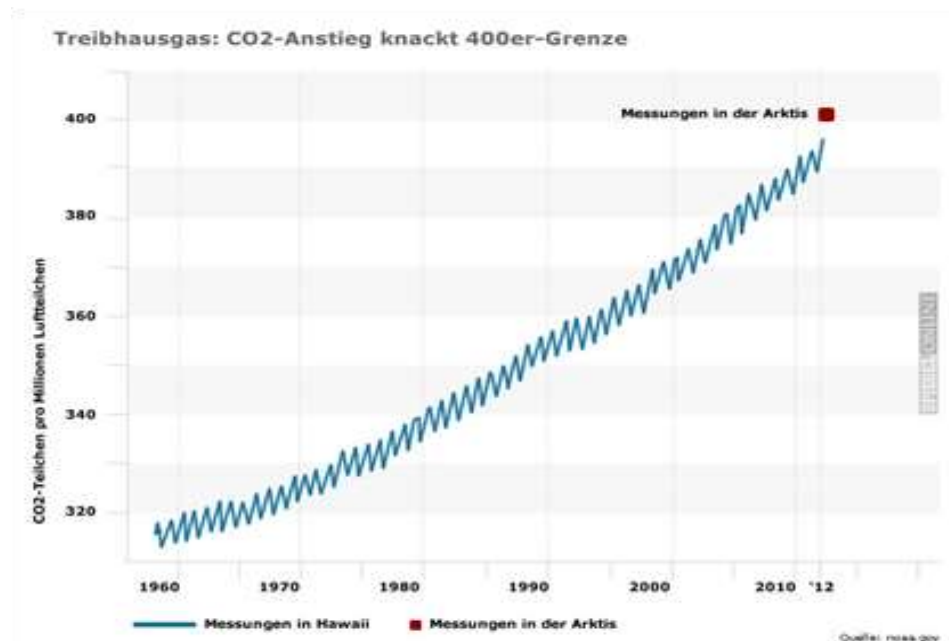


Abbildung 1-2: CO₂-Konzentration in der Luft (auf Hawaii) [Onl-2013]

In Abbildung 1-3 ist die Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien abgebildet. 2016 betrug in Deutschland der Anteil der EE am Bruttostromverbrauch ca. 32 % [BMW-2017]. Mit zunehmendem Anteil der EE steigt der Anteil sogenannter fluktuierender erneuerbarer Energien am Strommix. Fluktuierende erneuerbare Energien wie Wind- und Sonnenenergie sind Energiequellen, die in der Produktion nicht kontrollierbar sind. Auf Grund dieser EE ist ein Teil der Stromerzeugung stark von der Wettersituation abhängig.



Abbildung 1-3: Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien [BMW-2016]

Im Stromnetz müssen der Stromverbrauch und die Stromerzeugung immer im gleichen Verhältnis bleiben. Wenn dies nicht der Fall ist, ändert sich die Netzfrequenz des Stroms. Es gilt, dass „ein Überschuss an erzeugter Wirkleistung im Netz eine Frequenzerhöhung und ein Mangel eine Frequenzabsenkung nach sich zieht“ [Heu-2010, S. 63]. Aktuell folgt die Stromerzeugung dem Strombedarf, die Momentanreserve und Regelleistung gleichen die Schwankungen im Stromnetz aus. Um die Versorgungssicherheit, einen angemessenen Strompreis und eine konstante Netzfrequenz zu gewährleisten, erhöht sich bei steigendem Anteil von EE am Strommix u. a. der Bedarf an Regelleistung [Deu-2014, S. 3] und Speichertechnologien [Sta-2014, S. 50]. Diese gleichen punktuelle Netzüberlastungen und die schwankende Stromerzeugung aus. Lastmanagement (engl. Demand-Side-Management (DSM)) eignet sich als Regelleistung und reduziert zusätzlich den Bedarf an Speicherkapazitäten [Sta-2014, S. 66]. „Das Lastmanagement ist die gezielte und aktive Steuerung des Energieverbrauchs zur Netzstabilisierung oder Ausnutzung von Strompreisschwankungen. Um die Energienachfrage an die Erzeugung anzupassen, können Stromkunden einzelne Stromverbraucher zu- oder abschalten“ [Ago-2013]. Das Lastmanagement reduziert nicht den Strombedarf, sondern verschiebt den Bedarfszeitpunkt der elektrischen Energie.

Ein Lastmanagement verschiebt Prozesse der Intralogistikanlage, um den Strombedarf aktiv zu begrenzen und reduziert somit direkt und indirekt die Stromkosten der Intralogistikanlage. Direkt, indem die Stromkosten reduziert oder die Verschiebung der Last vergütet wird. Indirekt, indem Stromversorgungskomponenten exakter ausgelegt werden und der Ausfall der Anlage vermieden wird. Das Lastmanagement für ein Intralogistiksystem ermöglicht die Teilnahme am Regelenergiemarkt. An diesem wird die Erhöhung bzw. die Reduzierung der Last vergütet. Zusätzlich eignen sich die Lastmanagementpotentiale zur Teilnahme an Spotmärkten. Diese handeln Strom in Blöcken und der Strompreis ist abhängig vom Stromangebot (Abbildung 1-4). Bei einem Überangebot sind die Stromblöcke günstig und die Last kann zu einem günstigen Preis erhöht werden („Valley Filling“). Bei einem Unterangebot sind die Stromblöcke hingegen sehr teuer und mit der Lastreduzierung kann ein hoher Preis für den Stromblock erzielt werden („Peak Shaving“).

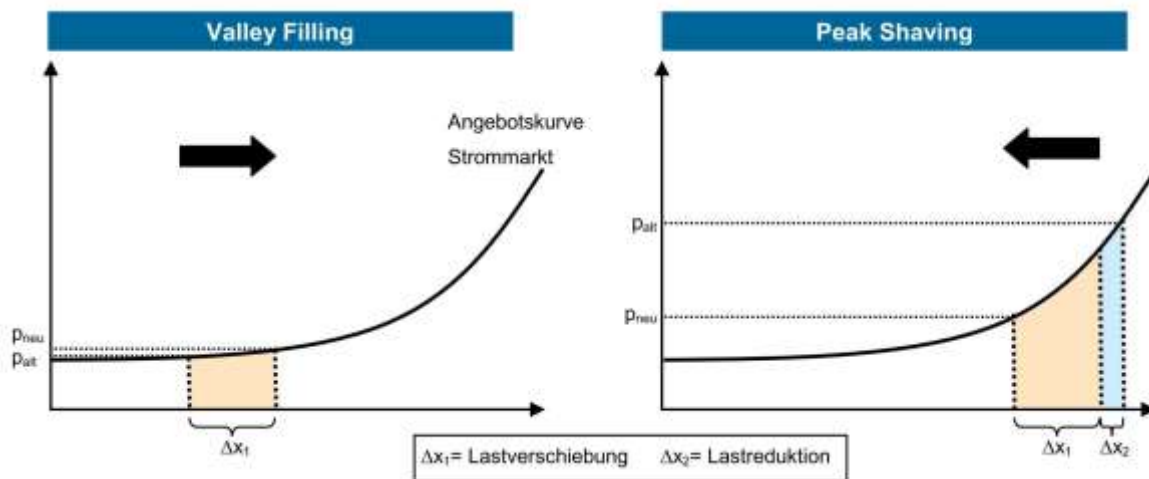


Abbildung 1-4: Einfluss von Valley Filling und Peak-Shaving-Maßnahmen auf den Strompreis [Deu-2010, S. 407]

Die Stromkostenabrechnung bei Verbrauchern mit einem Jahresverbrauch über 100.000 kWh teilt sich in zwei Bestandteile: den Leistungspreis und den Arbeitspreis. Der Arbeitspreis ist davon abhängig, wie viel elektrische Energie verbraucht wurde. Der Leistungspreis hängt davon ab, welchen maximalen Leistungsmittelwert (LMW, durchschnittlich bezogene Leistung über eine Messperiode (in Deutschland 15 min)) das EVU liefern muss. Anhand des n-höchsten LMW im Abrechnungszeitraum berechnet das EVU den Leistungspreis für den Kunden. Das bedeutet, dass bei einem einmalig sehr hohen LMW im Jahr zusätzliche Kosten für den Betreiber der Anlage entstehen.

Die Stromversorgungskomponenten (bspw. Transformatoren oder Leitungsquerschnitte) werden zum Teil mit der maximalen elektrischen Leistung bzw. dem maximalen Strombedarf ausgelegt. Hierfür werden heute die maximalen Leistungsbedarfe aller elektrischen Verbraucher, die gleichzeitig im Betrieb sind, mit dem sogenannten Gleichzeitigkeitsfaktor aufsummiert. Diese basieren auf Erfahrungswerten und sind ein Kompromiss zwischen Optimierung der Bauteile und Sicherheit. Ein Gleichzeitigkeitsfaktor muss so hoch sein, dass ein Anlagenausfall mit hoher Wahrscheinlichkeit vermieden wird, und gleichzeitig so klein wie möglich sein, dass die Komponenten nicht überdimensioniert sind. Bei einem zu kleinen Gleichzeitigkeitsfaktor kann es vorkommen, dass die maximal zulässige Leistung übertroffen wird und damit die Anlage oder Teile der Anlage ausfallen. Eine aktive Begrenzung der Leistungsspitze durch das Lastmanagement vermeidet den Ausfall, reduziert die Baugrößen der Komponenten und spart Kosten in der Anschaffung. Zusätzlich weisen bspw. Transformatoren bei einer kleineren Baugröße eine geringere Verlustleistung auf. Die Verschiebung der Prozesse reduziert aber die Materialflussleistung des Intralogistiksystems (bspw. die Ein- und Auslagerungen pro Stunde). Um einem Betreiber der Anlage von dem Einsatz eines Lastmanagements zu überzeugen, muss der Einfluss auf die Materialflussleistung quantifizierbar sein.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Forschungsbeitrag zur Quantifizierung des Einflusses der Grenzen eines Lastmanagements auf die Durchsatzleistung von mehrgassigen Lagersystemen mit automatisierten Regalbediengeräten zu leisten. Hierfür ist die Konzipierung eines Lastmanagementsystems erforderlich. Das Lastmanagement soll durch zeitliche Verschiebung von Teilaufträgen des mehrgassigen Lagersystems den Leistungsmittelwert und die maximale Leistungsaufnahme begrenzen. Aufgrund dieser Verschiebung wird die Durchsatzleistung des Lagersystems reduziert. Um eine Entscheidung zu treffen, benötigen Betreiber Informationen über den Einfluss des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung des Lagersystems.

Der Stand der Technik muss erarbeitet werden, um einen Überblick über den Aufbau von Lagersystemen, den Aufbau von RBG, die Berechnung der Durchsatzleistung von RBG und für die Einbindung des Lastmanagements in die Software und die IT zur Einlastung der Lageraufträge zu schaffen. Besonderes Augenmerk gilt den Steuerungsfunktionen des RBG. Grundlegend sollen neben den Lagersystemen die Netzanschlussschreiben, die Stromkostenabrechnung, die Auslegung von Transformatoren und Lastmanagement beschrieben werden. Der Stand der Forschung konzentriert sich auf die Themen:

- Energiebedarfsermittlung von Lagersystemen,
- Spielzeit- und Durchsatzleistungsberechnung,
- Lastmanagement sowie
- Einfluss des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung von Lagersystemen.

Auf Basis des Stands der Technik und der Forschung wird die Forschungslücke identifiziert, anhand der die Forschungsfragen abgeleitet werden, die im Zuge dieser Arbeit beantwortet werden. Zudem sollen die Methoden beschrieben werden, die zur Beantwortung der Forschungsfragen Anwendung finden.

Mit diesen Grundlagen ist das Lastmanagement zu konzipieren. Das Lastmanagement trifft anhand des Leistungsbedarfs für den Teilauftrag des RBG die Entscheidung, ob dieser verschoben werden muss. Hierfür muss der elektrische Leistungs- und Energiebedarf für den Teilauftrag berechnet und somit untersucht werden. Um den Einfluss des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung zu untersuchen, muss die Berechnung und Abbildung des Energiebedarfs über alle Betriebszustände und der Durchsatzleistung ermittelt und formalisiert werden.

Darauf aufbauend sollen die Einflussgrößen auf die Auswirkung des Lastmanagements auf die relative Durchsatzleistung eines Lagersystems ermittelt werden. Hierfür sind die Methoden zu definieren, um die signifikanten Einflussfaktoren zu identifizieren. Abschließend sollen die Zusammenhänge zwischen den Parametern des Lagersystems, des Lastmanagements und der relativen Durchsatzleistung im Detail erarbeitet werden, um den Betreibern die Auswirkungen des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung aufzeigen zu können.

1.3 Vorgehensweise

Die Arbeit ist in sechs Teile gegliedert:

- Stand der Technik und Wissenschaft
- Systemanalyse und Konzipierung des Lastmanagements und des Simulationsmodells
- Implementierung des Simulationsmodells
- Verifikation und Validierung des Simulationsmodells
- Simulation und Ergebnisse
- Zusammenfassung und Ausblick

„Stand der Technik und Wissenschaft“ schafft eine theoretische Grundlage für diese Arbeit. Hier werden die Lagersysteme, das Lastmanagement, die Stromkostenberechnung und die relevanten Komponenten zur Stromversorgung des Lagersystems sowie der Stand der Forschung über bereits getätigte Untersuchungen in diesem Themenumfeld beschrieben. Genauer geht die Arbeit dann auf Lagersysteme und deren gängige Ausprägungen ein und grenzt sie auf die in dieser Dissertation untersuchten Systemvarianten ein. Anschließend werden die Systemkomponenten des Lagersystems sowie deren Einbindung und Ansteuerung dargestellt. Zudem werden Ausprägung, Aufbau, Energieversorgung und Anschlussauslegung von RBG detailliert betrachtet. Im Anschluss werden die Themen wie Lastmanagement, Stromkostenabrechnung von Lagersystemen sowie die Auslegung von Transformatoren und Leistungsquerschnitten behandelt. Hinzu kommen aktuelle Themen der Energiebedarfsermittlung von RBG, der Ermittlung der Durchsatzleistung und des Lastmanagements bei RBG. Darauf aufbauend erfolgen die Identifizierung der Forschungslücke sowie die Formulierung der Aufgabenstellung. Abschließend wird der in dieser Dissertation verwendete methodische Ansatz beschrieben.

Das Kapitel „Systemanalyse und Konzipierung des Lastmanagements und des Simulationsmodells“ untersucht das Lagersystem, plant und formalisiert mit den Grundlagen das Simulationsmodell und konzipiert das Lastmanagement. Hierfür werden im ersten Schritt die Anforderungen zur Konzeptionierung des Simulationsmodells definiert. Daraufhin wird die Systemanalyse des Lagersystems durchgeführt mit dem Ziel, Kenntnis über die Auftragseinlastung, die internen Steuerungsfunktionen und die Energieversorgung zu erlangen. Dazu wird das Lastmanagement definiert und ein Konzeptmodell für das Simulationsmodell erarbeitet. Abschließend werden die zusätzlich für diese Untersuchung benötigten Funktionen formal beschrieben.

Das darauffolgende Kapitel beschreibt die „Implementierung des Simulationsmodells“ mit den Systemkomponenten Lastmanagement, Auftragsabwicklung, Achssteuerung, Bremsensteuerung, LAM-Leistung und Schaltschränke in der mathematischen Programmierumgebung MatLab von MathWorks. Des Weiteren erfolgt die Festlegung der physikalischen und qualitativen Größen, die dem Simulationsmodell von außen zugrunde gelegt werden müssen.

Bei der „Verifikation und Validierung des Simulationsmodells“ wird nachgewiesen, dass das Simulationsmodell die richtigen Aufgaben durchführt und diese auch richtig ausführt. Hierfür werden die Simulationsergebnisse mit Messungen des realen Systems verglichen. Abschließend wird die korrekte Funktionsweise des Lastmanagements validiert. Hierbei werden die Vorausberechnungen des Lastmanagements mit den Simulationsergebnissen verglichen und auf Abweichungen geprüft.

Im Kapitel „Simulation und Ergebnisse“ wird die eigentliche Simulation durchgeführt und deren Ergebnisse aufbereitet sowie bewertet. Bei der Simulationsplanung werden die Zielgrößen festgelegt und alle möglichen Einflussgrößen auf deren Effekt auf die Durchsatzleistung bewertet. Anschließend werden mit Hilfe von statistischen Methoden wie Screening-Versuchsplänen Faktoren mit signifikanten Effekten auf die Durchsatzleistung identifiziert. Mit diesen Faktoren erfolgt die Versuchsplanung für die Hauptuntersuchung mit anschließenden Simulationsläufen und nachfolgender Auswertung der Ergebnisse. Anhand von Regressionsanalysen werden abschließend Gesetzmäßigkeiten zwischen den Eingangsgrößen und der relativen Durchsatzleistung formuliert.

In „Zusammenfassung und Ausblick“ werden die Erkenntnisse aus dieser Untersuchung zusammengefasst und ein Ausblick für mögliche weitere Forschungen auf diesem Gebiet und zur Nutzung von Lastmanagement in Intralogistiksystemen gegeben.

2 Stand der Technik und Wissenschaft

2.1 Stand der Technik von automatisierten Lagersystemen

Ein vollautomatisches Lager ist eine Komponente der innerbetrieblichen Materialflusstechnik eines Intralogistiksystems. Die Materialflusstechnik ist die Technik zum Bewegen von Waren [Hom-2011]. Zur Materialflusstechnik gehören unter anderem die Verpackungstechnik, die Fördermittel, die Steuerungs- und Informationstechnik und die Lagertechnik. In dieser Arbeit wird die Lagertechnik untersucht, die für das Lagern der Ware zuständig ist. Das Lagern „ist jedes geplante Liegen des Arbeitsgegenstandes im Materialfluss“ [VDI-2411]. Lagern wird verwendet, um den Materialfluss für eine definierte Zeit zu unterbrechen. Das ist bspw. notwendig, um Schwankungen in der Produktion auszugleichen oder um die Ware für Weiterverarbeitungen zu puffern und bereitzustellen. Die Systemelemente der Materialflusstechnik sind in Abbildung 2-1 illustriert.

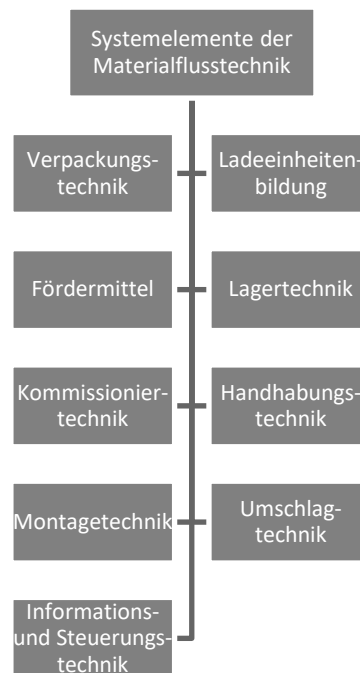


Abbildung 2-1: Systemelemente der Materialflusstechnik [Gün-2013]

Die Lagertechnik wird in die Lagereinrichtung, die Lagerbedienung, die Kommissioniertechnik und die Steuerungstechnik unterteilt [Gün-2013]. Die *Lagereinrichtung* ist der Überbegriff für den Ort der Lagerung. Das sind der Boden bei einem Boden-Blocklager und das Regal bei einem Palettenregallager oder einem Umlaufregallager. Die

Lagerbedienung ist die Art, wie die Lagereinheiten aus der Lagereinrichtung entnommen oder abgegeben werden. Die Aufteilung der Lagerbedienung nach dem Automatisierungsgrad ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Bei einer *manuellen Lagerbedienung* lagert ein Lagermitarbeiter die Lagereinheit ein oder aus. Dies geschieht von Hand oder unterstützt von einer Maschine (bspw. Hubwagen oder Gabelstapler). Die *halb- oder teilautomatisierte Lagerbedienung* erfolgt zu Teilen nach dem Ware-zu-Mann-Prinzip. Der Lagermitarbeiter wählt an einem Bedienterminal das benötigte Lagerfach aus. Dieses bewegt sich daraufhin zu dem Lagermitarbeiter, welcher aus dem Lagerfach den benötigten Artikel entnimmt oder den einzulagernden Artikel hineinstellt. Ein Beispiel hierfür ist ein Horizontalumlauf- lager. Bei der *vollautomatisierten Lagerbedienung* wird der Transport der Ladeinheit vollautomatisch von einer Handhabungsmaschine durchgeführt. Zu den schienengebundenen Handhabungsmaschinen für die vollautomatisierte Lagerbedienung zählen Regalbediengeräte. Der Fokus dieser Dissertation liegt auf Lagersystemen mit mehreren parallel arbeitenden RBG. In den folgenden Kapiteln werden ausschließlich diese Lagersysteme detailliert.

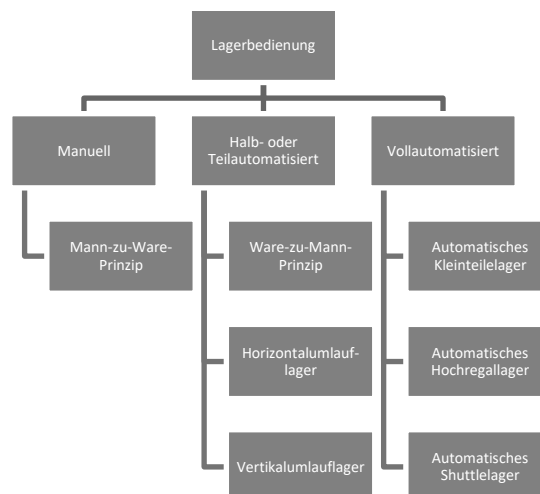


Abbildung 2-2: Lagerbedienung

2.1.1 Aufbau eines vollautomatischen Lagersystems mit RBG

Ein vollautomatisches Lagersystem mit RBG ist eine Systemkomponente eines Materialflusssystemes zur temporären Speicherung von Lagereinheiten. In Abbildung 2-3 ist ein 2-gassiges Lagersystem abgebildet. Die Hauptbestandteile des Lagersystems sind [Hom-2011]:

- Regalsystem
- Regalbediengeräte
- Lagereinheiten
- Fördertechnik

- Organisations- und Rechnerntechnik
- evtl. die Bauhülle
- Sicherheitstechnik

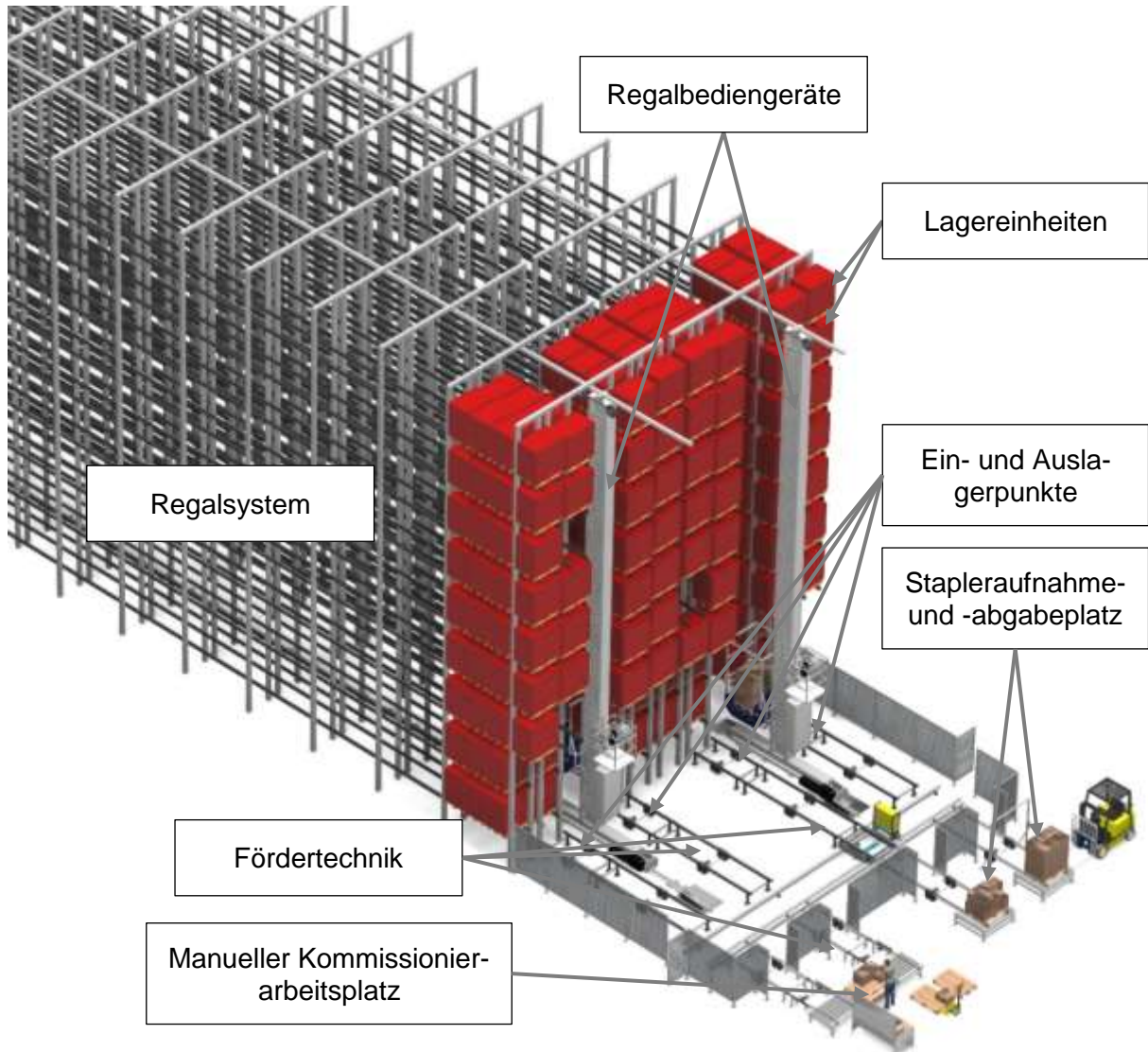


Abbildung 2-3: 2-gassiges APL-Lagersystem mit Lagervorzone (Bildquelle: viastore SYSTEMS GmbH)

Hier ist ein Lager für die Lagerung von Paletten abgebildet, das manuell mit dem Stapler an- und abgedient wird und über einen manuellen Kommissionierarbeitsplatz verfügt. Der Bereich außerhalb der Umzäunung mit dem Staplerabgabe- und -aufnahmeplatz sowie dem manuellen Kommissionierarbeitsplatz wird Lagervorzone genannt. Oft befindet sich in der Lagervorzone weitere Fördertechnik, die den Lagerbereich mit anderen Bereichen wie der Produktion oder den Versand verbindet. Die Fördertechnik innerhalb der Umzäunung transportiert die Lagereinheiten von der Lagervorzone zu den Einlagerpunkten der RBG oder von den Auslagerpunkten der RBG zur Lagervor-

zone. Für eine Einlagerung nimmt das RBG die sich auf dem Einlagerpunkt befindenden LE auf und lagert diese im vom Lagerverwaltungssystem bestimmten Regalplatz ein. Bei einer Auslagerung wird die auszulagernde LE vom RBG aufgenommen und an den Auslagerpunkt abgegeben. Von dort wird sie von der Fördertechnik zur Lagervorzone transportiert.

Das RBG bewegt sich entlang einer Schiene in der Gasse zwischen zwei Regalfronten. Das RBG kann zu beiden Seiten ein- und auslagern und somit beide Regalfronten bedienen. Das abgebildete Regal ist ein Regal mit einer doppeltiefen Lagerung. Bei einem doppeltiefen Regal befinden sich zwei hintereinanderliegende Lagerplätze pro Regalfach und Regalfront, es können in einem Regalfach also zwei LE hintereinander gelagert werden. Neben doppeltiefen Regalen gibt es einfachtiefe Regale für einen Lagerplatz sowie drei- oder mehrfachtiefe Regale für drei oder mehrere hintereinanderliegende Lagerplätze pro Regalfach und Regalfront. In dieser Dissertation werden größtenteils einfachtiefe Regale betrachtet. Bei doppeltiefen Regalen steigt der zeitliche Anteil der Lastwechsel an der Gesamtnutzungsdauer. Der Lastwechsel hat einen niedrigen Leistungsbedarf und reduziert den mittleren Leistungsbedarf und die Häufigkeit der maximalen Leistungsbedarfe des RBG. Somit verbessert sich das Ergebnis bei doppeltiefen RBG. Ausschließlich bei der Validierung des Simulationsmodells werden Fahrten von einem RBG mit doppeltiefem Regal verwendet. Dies war notwendig, da zu diesem Zeitpunkt kein einfachtiefes RBG dieser Bauform für die Versuche zur Verfügung stand.

2.1.2 Typen und Aufbau eines Regalbediengeräts

Das Regalbediengerät (RBG) „...ist ein Förder- und Hebezeug zur manuellen oder automatischen mechanischen Bedienung der Regalfächer einer Lageranlage“ [FEM-9b]. Ein RBG für die Bedienung eines Palettenlagers ist in der Abbildung 2-4 dargestellt. Die Hauptbaugruppen eines RBG sind:

- Fahrwerk
- Mast
- Hubwerk
- Hubwagen mit Lastaufnahmemittel (LAM)
- Mastkopf bzw. Kopftraverse

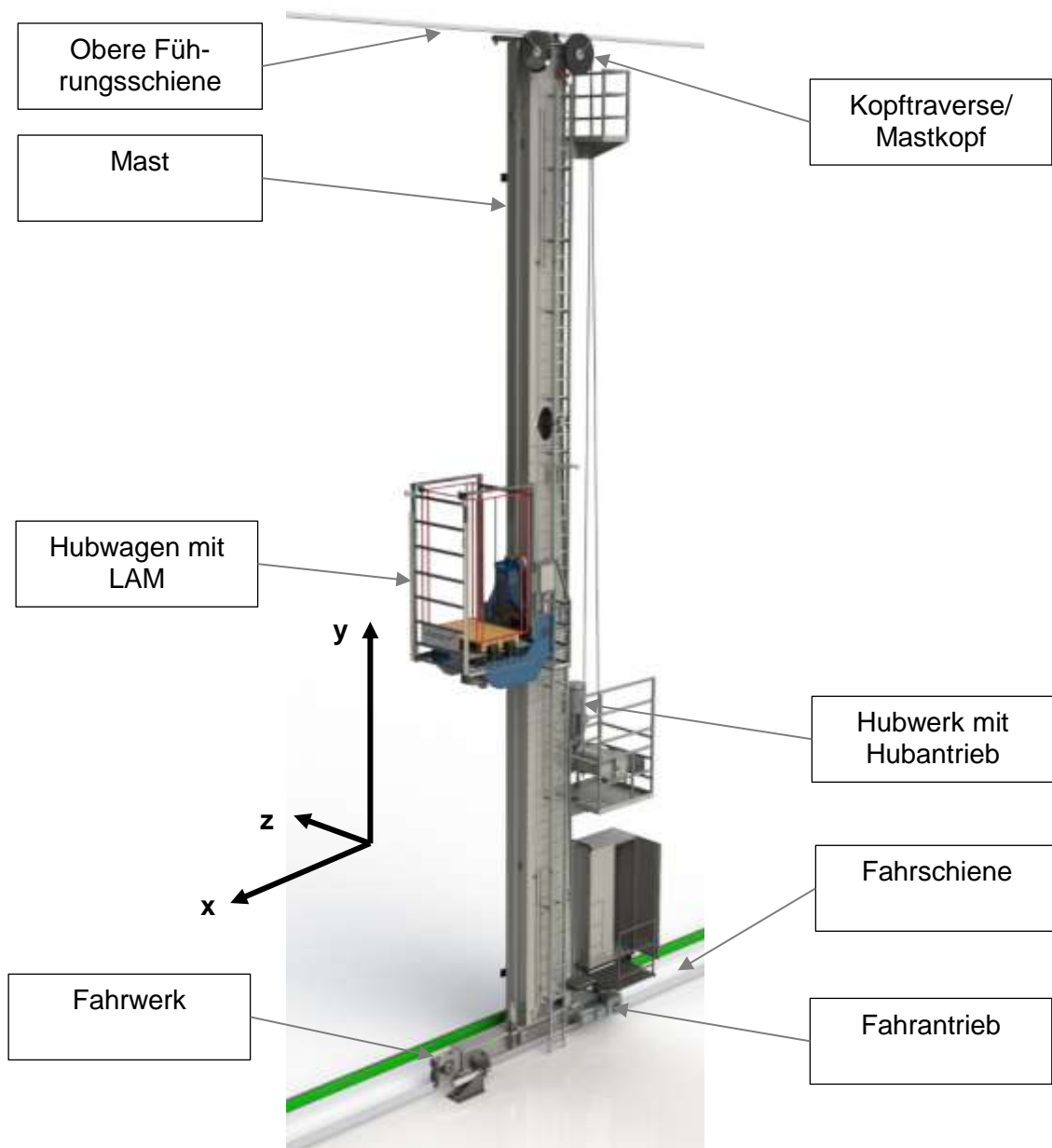


Abbildung 2-4: Hauptbaugruppen eines RBG für Paletten (Bildquelle: viastore SYSTEMS GmbH)

Die drei Hauptbewegungsrichtungen sind das Fahren entlang der x-Achse, das Heben bzw. Senken entlang der Y-Achse und die Lastübernahme bzw. die Lastübergabe entlang der Z-Achse. Beim Fahren bewegt sich das RBG entlang der Gasse zwischen den beiden Regalfronten. Geführt wird es dabei von der Fahrschiene und der oberen Führungsschiene. Der Hubwagen, der das LAM trägt, wird am Mast geführt und vom Hubwerk angehoben oder abgesenkt. Das LAM ist für die Lastübernahme und die Lastübergabe zuständig. Eingeteilt werden die RBG nach den LE, die sie aufnehmen können:

- Automatische Kleinteilelager (AKL)
- Kleine LE von bis zu 50 kg Gewicht (bspw. Kartons oder Kleinladungsträger (KLT))
- Tablarlager
- Tablare werden mit bis zu 300 kg an Lagergut gelagert (sortenrein oder gemischt; bspw. Dokumentordner, unterschiedliche Ersatzteile, Matratzen)
- Palettenlager oder automatisches Palettenlager (APL)
- Beispielsweise Euro- oder Industriepaletten mit einer Zuladung bis ca. 3000 kg
- Sonderlager
- Kundenindividuelle Lager (bspw. Stahlcoils, Stoffrollen, PKW)

In dieser Dissertation werden ausschließlich AKL und APL behandelt.

Die Kraftübertragung für die Fahrbewegung kann kraftschlüssig oder formschlüssig erfolgen. Zusätzlich wird unterschieden, ob die Fahrtriebe stationär oder mitfahrend sind und ob das RBG nur unten oder unten und oben angetrieben wird. Als Laufrollen werden die von oben aufliegenden Rollen bezeichnet. Die Laufrollen sind teilweise angetrieben. Die von unten eingreifenden Rollen werden Gegendruckrollen genannt (siehe Abbildung 2-5). Diese verhindern bei RBGs mit hoher Dynamik das Abheben der Laufrollen von der Führungsschiene und garantieren, dass bei Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen noch genügend Reibkraft vorhanden ist. Die Rollen für die horizontale Führung des Fahrwerks werden Führungsrollen genannt. Mit den Führungsrollen wird das Fahrwerk an der Fahrschiene ausgerichtet.

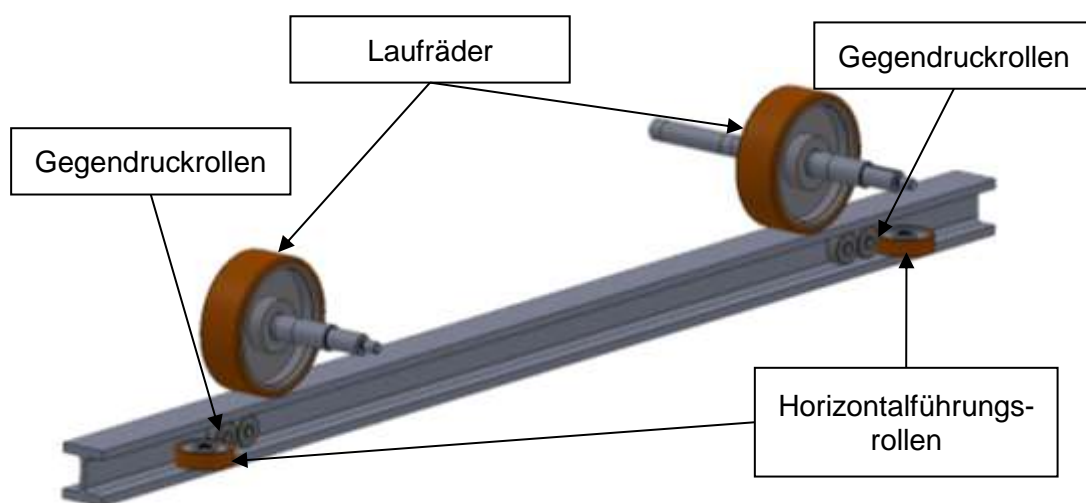


Abbildung 2-5: Fahrwerk Rollenordnung (Bildquelle: viastore SYSTEMS GmbH)

Die Fahrbewegung wird vom Fahrtrieb oder den Fahrtrieben erzeugt. Die Antriebe werden in formschlüssige und kraftschlüssige bzw. reibschlüssige Systeme unterteilt. Bei einem unten angetriebenen RBG muss die Tragstruktur (Fahrwerk und Mast) die ausragenden Kräfte aufnehmen, und der Mast neigt zum Schwingen. Bei einem zusätzlichen oberen Antrieb werden die Antriebskräfte verteilt und dadurch das Schwingen reduziert. Bei einem oberen Antrieb ist bei der Regalauslegung darauf zu achten, dass in die Regalkonstruktion zusätzlich zu den statischen auch dynamische Kräfte eingeleitet werden.

In der Praxis werden für die Verbindung zwischen oberen und unteren Antrieben Kardanwellen oder sog. elektrische Wellen verwendet. Bei der elektrischen Welle wird die mechanische Verbindung zwischen den Antrieben durch eine geregelte Schaltungsverknüpfung ersetzt. Dadurch kann das Material für die Kardanwelle eingespart werden.

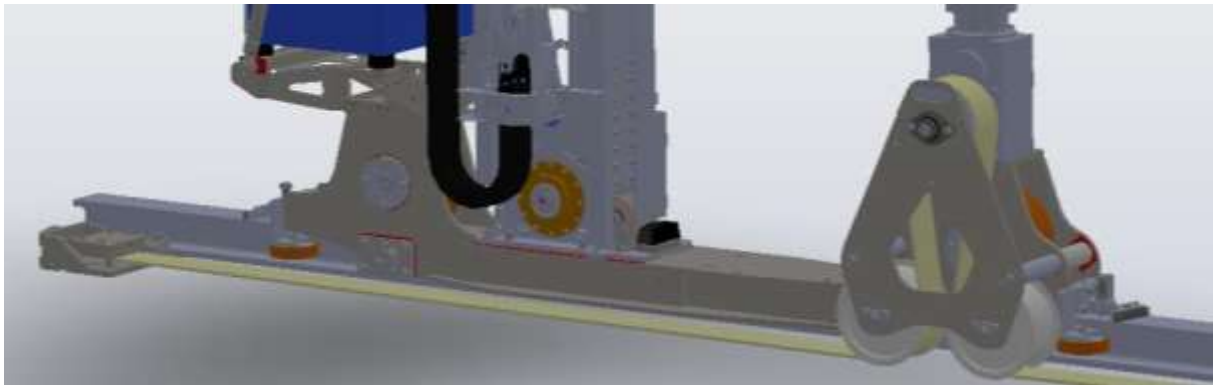


Abbildung 2-6: Fahrwerk Omegaantrieb (Bildquelle: viastore SYSTEMS GmbH)

Formschlüssige Antriebssysteme sind bspw. Zahnriemen- oder Zahnstangensysteme. Häufig wird der Omegaantrieb verwendet, dabei handelt es sich um einen Zahnriementrieb. Bei diesem formschlüssigen Antriebssystem zieht sich das RBG an dem Zahnriemen, der fest entlang der Fahrschiene verlegt ist. Für die Fahrbewegung nimmt das RBG den Zahnriemen mit den unteren Umlenkrollen wie in Abbildung 2-6 zu sehen auf und lenkt ihn über die obere angetriebene Zahnriemenscheibe. Benannt ist dieses System nach seinem Aussehen. Teilweise werden Zahnriemen auch bei einem RBG mit stationärem Fahrtrieb eingesetzt.

Die Zahnstange ist bei Zahnstangensystemen entlang der Fahrschiene verbaut. Ein angetriebenes Zahnrad greift in diese Zahnstange ein und erzeugt durch die Drehung die Fortbewegung entlang der Zahnstange.

Meistens werden bei kraftschlüssigen Antriebssystemen ein oder mehrere Laufräder angetrieben. In Abbildung 2-7 ist als reibschlüssiges Antriebssystem der „senkrechte

Stegantrieb“ abgebildet. Dabei klemmen meist zwei Antriebsräder den senkrechten Steg der Fahrschiene zwischen sich ein und erzeugen so die benötigte Reibung. Die Antriebsfunktion ist bei dieser Antriebsart von der Tragfunktion der Laufräder getrennt, es können sehr hohe Beschleunigungswerte erreicht werden. Für dieses Antriebssystem muss die Fahrschiene im Bereich des Stegs sehr genau gefertigt sein. Der senkrechte Stegantrieb wird auch für Antriebe am Mastkopf eingesetzt.

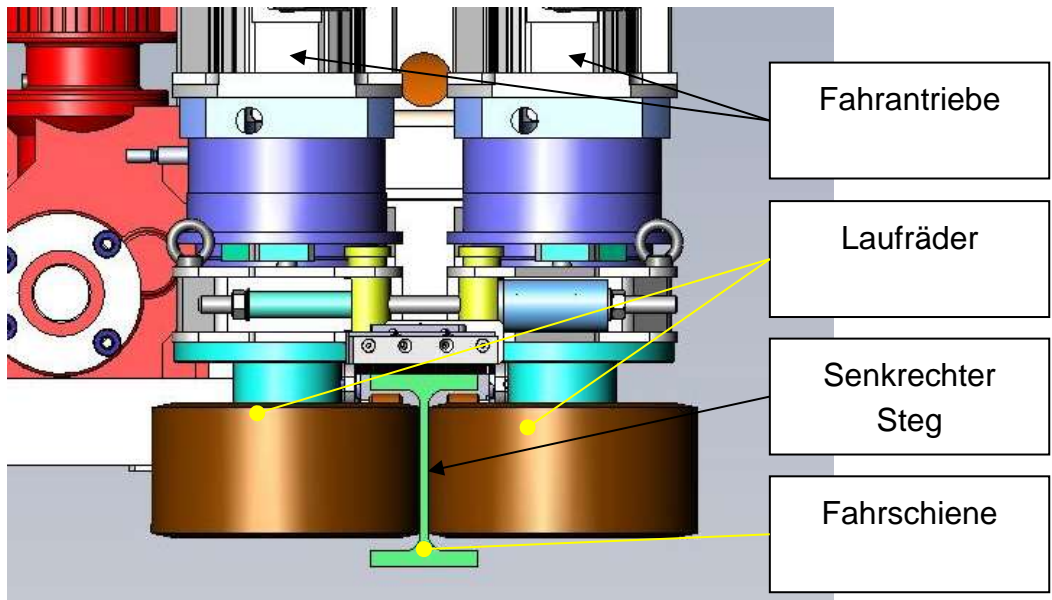


Abbildung 2-7: Fahrwerk senkrechter Stegantrieb (Bildquelle: viastore SYSTEMS GmbH)

Damit bei kraftschlüssigen Antriebssystemen mit angetriebenen Laufrädern höhere Beschleunigungswerte erreicht werden können, werden in manchen Fällen beide Laufräder angetrieben. Die Laufräder können hierfür durch eine elektrische Welle, eine Kardanwelle oder durch einen Riementrieb hergestellt werden (Abbildung 2-8).

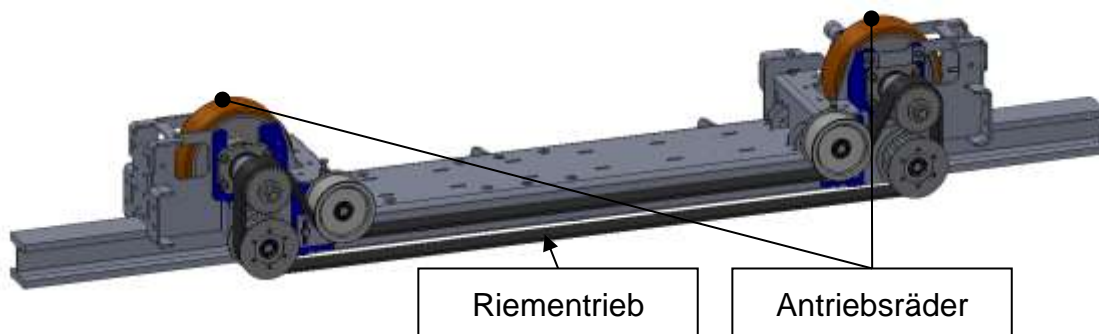


Abbildung 2-8: Fahrwerk 2-Rad-Reibradantrieb (Bildquelle: viastore SYSTEMS GmbH)

Abhängig von der Belastung der Laufräder und der geforderten Beschleunigung des RBG werden für die Lauf- und Antriebsräder unterschiedliche Materialien verwendet. Aufgrund der hohen statischen Last auf den Rädern wird bei APL oft Stahl eingesetzt.

Dieser hält den Belastungen stand, kann aber durch den geringen Reibbeiwert keine hohen Kräfte und somit Beschleunigungen übertragen. Wegen der höheren Dynamik bei den AKL werden in diesem Bereich Elastomere für die Laufräder verwendet. Neben dem höheren Reibbeiwert erzeugt das RBG mit den Elastomer-Laufrollen weniger Fahrgeräusche.

Der Hubwagen eines RBG trägt das LAM, oder das LAM ist in den Hubwagen integriert. Für die Bewegung des Hubwagens werden meist Riementriebe oder Seiltriebe verwendet. Riementriebe werden bei kleineren Hublasten und hoher Dynamik, bspw. beim AKL, und Seiltriebe für größere Lasten und geringerer Dynamik, bspw. bei APL, eingesetzt. Viele Hersteller verwenden umlaufende, geschlossene Riemen für die Hubbewegung. Hierbei wird der Riemen über eine angetriebene Zahnriemenscheibe und eine oder mehrere nicht angetriebene Zahnriemenscheiben gelenkt, Anfang und Ende des Riemens werden miteinander verbunden. An einer Stelle ist der Hubwagen mit dem Riemen verbunden und wird somit, wenn der Riemen angetrieben wird, vom Riemen angehoben oder abgesenkt. Ein geschlossener Hubriementrieb ist in Abbildung 2-9 dargestellt.

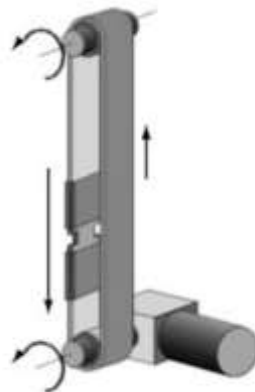


Abbildung 2-9: Geschlossener Hubriementrieb [Arn-2008, S. 684]

Bei größeren Hubgewichten, wie bei Hochregal- oder Tablarlagern, werden häufig Seiltriebe verwendet. Ein typischer Seiltriebaufbau eines APL ist in Abbildung 2-10 dargestellt. Das eine Ende des Drahtseils ist am Mastkopf befestigt. Von dort aus läuft das Drahtseil über die an dem Hubwagen befestigte Umlenkrolle, anschließend über die beiden Umlenkrollen am Mastkopf und dann zur Seiltrommel, auf die das Drahtseil aufgewickelt wird. Dieser Aufbau führt dazu, dass der Seiltrieb für das Heben und Senken untersetzt ist.

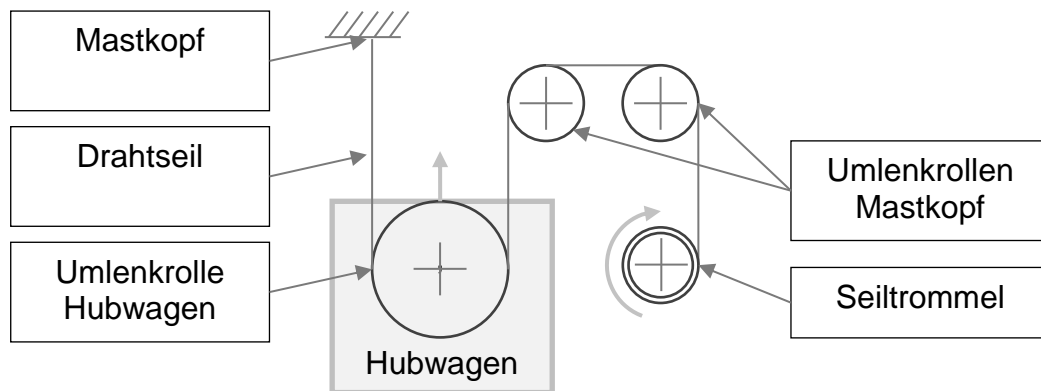


Abbildung 2-10: Seiltrieb für die Hubbewegungen der RBG

Das RBG verfügt normalerweise über einen oder mehrere Fahrtriebe (bspw. Stegantrieb oder elektrische Welle), einen Hubantrieb und mehrere Antriebe für das LAM. Meistens werden für den oder die Fahrtriebe und den Hubantrieb Asynchron-Drehstrommotoren oder Asynchron-Servomotoren eingesetzt, die an einem Frequenzumrichter bzw. einem Servoumrichter betrieben werden. Asynchron-Drehstrommotoren sind sehr robuste Antriebe mit einer mittleren Leistungsdichte [Kie-2007]. Asynchron-Servomotoren dagegen zeichnen sich nach *Kiel* [Kie-2007] durch ihre schlanke Bauform, hohe Leistungs- und Drehmomentdichte, geringe Trägheit, hohe Dynamik, hohe Überlastbarkeit und hohen Wirkungsgrad aus, sind aber auch teurer als Asynchron-Drehstrommotoren.

Der Servomotor eignet sich durch seine hohe Überlastbarkeit und die geringe Trägheit bei hoher Dynamik besonders für die Anforderungen des Fahrwerktriebs von AKL. Hier sind hohe Leistungen in der Beschleunigungsphase und niedrige Leistungen in der Beharrungsphase gefordert. Der Leistungsbedarf während der Beschleunigungsphase ist ein Vielfaches des Leistungsbedarfs der Beharrungsphase.

Für Hubwerksantriebe eignet sich der Drehstrommotor teilweise besser. Beim Heben des Hubwagens ist der Leistungsbedarf während der gesamten Fahrt nahezu konstant, weil der größte Anteil des Energie- und somit des Leistungsbedarfs die potentielle Energie ausmacht. Wegen des günstigeren Preises wird deshalb oft der Drehstrommotor für das Hubwerk verwendet.

Hubwerk und Fahrwerk werden heute üblicherweise mit Umrichtern betrieben. Von Vorteil ist, dass das Antriebsmoment und die Drehzahl sehr viel besser geregelt werden können, dass die Fahrkurve mit den Dynamikparametern (Geschwindigkeit, Beschleunigung/Verzögerung, Ruck) genauer definiert werden kann, dass teilweise Sicherheitsfunktionen im Umrichter integriert sind und dass der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ immer über 0,95 liegt und damit das Netz nicht mit Blindleistung belastet wird.

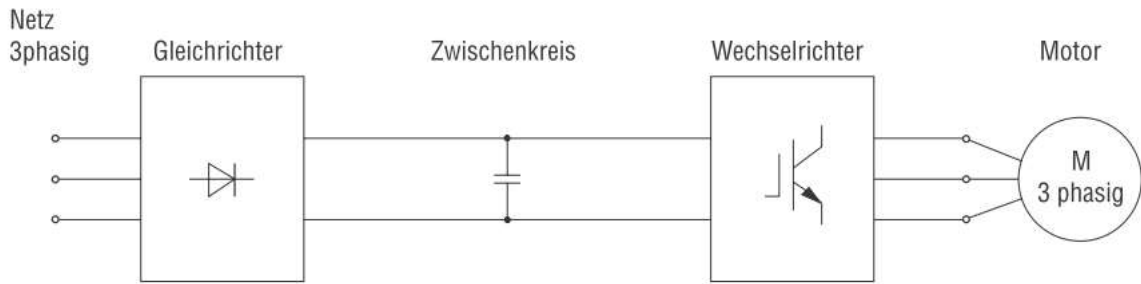


Abbildung 2-11: Vereinfachter Aufbau eines U-Umrichters [SEW-1997]

Der vereinfachte Aufbau des Umrichters ist in Abbildung 2-11 dargestellt. Im Umrichter wird, wenn der Motor treibt, der Netzstrom mit einem Gleichrichter in Gleichstrom für den Zwischenkreis gewandelt. Anschließend wandelt ein Wechselrichter den Zwischenkreisstrom in den vom Motor benötigten Wechselstrom. Beim elektrischen Bremsen funktioniert der Motor wie ein Generator. Der vom Motor erzeugte Wechselstrom wird im Wechselrichter in Gleichstrom für den Zwischenkreis gewandelt. Die im Zwischenkreis vorhandene Energie wird mit Hilfe eines Bremschoppers in einen Bremswiderstand geleitet und in Form von Wärme an die Umwelt abgegeben.

Wie von Ertl [Ert-2016] beschrieben, werden bei RBG folgende gängigen Antriebskonfigurationen unterschieden (Abbildung 2-12):

- Konventionelle Anordnung mit Bremswiderständen
- Zwischenkreiskopplung (ZK)
- Zwischenkreiskopplung mit Rückspeiseeinheit (ERS)

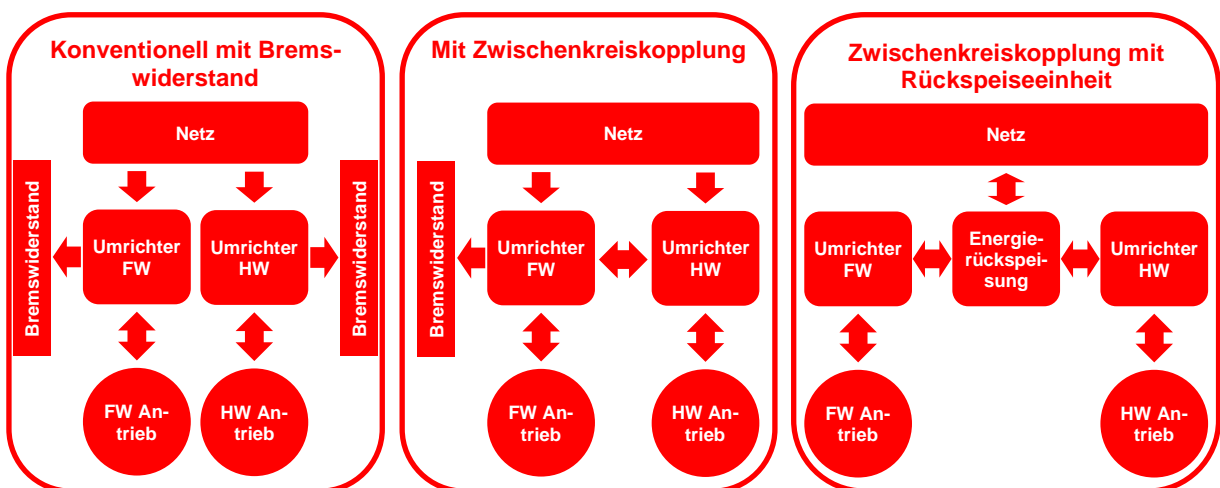


Abbildung 2-12: Antriebskonfigurationen bei RBG

Bei der *konventionellen Anordnung mit Bremswiderständen* existiert keine Verbindung zwischen Fahr- und Hubantriebsumrichter, und jeder Umrichter gibt die überschüssige Energie, die beim elektrischen Bremsen entsteht, in Form von Wärme an die Umwelt ab. Diese Antriebskonfiguration ist nicht mehr Stand der Technik und ist bei Bestandsanlagen verbaut. Aus diesem Grund wird sie in dieser Dissertation nicht weiter untersucht.

Die *Zwischenkreiskopplung* ist eine sehr häufig eingesetzte Antriebskonfiguration. Hierbei sind die Zwischenkreise von Fahr- und Hubantriebsumrichter miteinander gekoppelt. Somit kann die überschüssige Energie im Zwischenkreis entweder von einem anderen an den Zwischenkreis angeschlossenen Antrieb verwendet oder in einem Bremswiderstand in Wärme umgewandelt und an die Umwelt abgegeben werden. Bei dieser Antriebskonfiguration kann mit speziellen Steuerungsstrategien für die RBG-Achssteuerung Energie eingespart oder bei einer Diagonalfahrt mit einer Fahr- und einer Hubbewegung die beim Verzögern des Fahrtriebs erzeugte Energie vom Hubantrieb für das Heben verwendet werden. Das reduziert den Energiebedarf. Die in dieser Untersuchung betrachteten Strategien werden im Kapitel 3.2.2 beschrieben.

Die Antriebskonfiguration „*Zwischenkreiskopplung mit Rückspeiseeinheit*“ ist eine Erweiterung der Antriebskonfiguration „*Zwischenkreiskopplung*“. Zusätzlich zur Kopplung der Zwischenkreise ist eine Rückspeiseeinheit verbaut. Eine Rückspeiseeinheit ist vereinfacht gesagt ein Wechselrichter, der den Gleichstrom aus dem Zwischenkreis in den anlageninternen Netzstrom umwandelt. Wenn bei dieser Antriebskonfiguration zu viel Energie im Zwischenkreis vorhanden ist und nicht von einem anderen Motor verwendet werden kann, wird diese von der Rückspeiseeinheit unter Verlusten in das Stromnetz rückgespeist. Die Rückspeiseeinheit erfüllt oft zwei Funktionen. Zum einen erzeugt sie aus dem Netzstrom die Zwischenkreisgleichspannung, mit der die Achsmodule der Fahr- und Hubachse versorgt werden. Zum anderen wandelt sie die überschüssige Energie im Zwischenkreis in den Netzstrom. Die Achsmodule beinhalten den Wechselrichter, mit denen die Motoren versorgt werden [SEW-1997]. Da die Verluste bei dem Rückspeisen der überschüssigen Energie aus dem Zwischenkreis in das Netz größer sind als bei der direkten Verwendung der Energie des jeweils anderen Antriebs, werden auch bei dieser Antriebskonfiguration die Strategien für die ZK verwendet (Kapitel 3.2.2).

2.1.3 Arbeitsweise und Steuerungsstrategien eines RBG

Das Lagersystem hat die temporäre Speicherung von Lagereinheiten als Aufgabe. In den hier beschriebenen automatisierten Lagersystemen werden LE von RBG in das

Regal ein- bzw. ausgelagert. Unterteilt werden bei einem Lager mit einem einfachtiefen Regal die Ein- und Auslagerungen in die Lagerspiele (Abbildung 2-13):

- Einzelspiel Einlagern (ESP-E)
- Einzelspiel Auslagern (ESP-A)
- Doppelspiel (DSP)

Bei einem Einzelspiel Einlagern (ESP-E) fährt das RBG zum Ein- und Auslagerpunkt (E/A), nimmt die LE dort auf, fährt diese zum Einlagerfach (E) im Regal und stellt sie in das Fach.

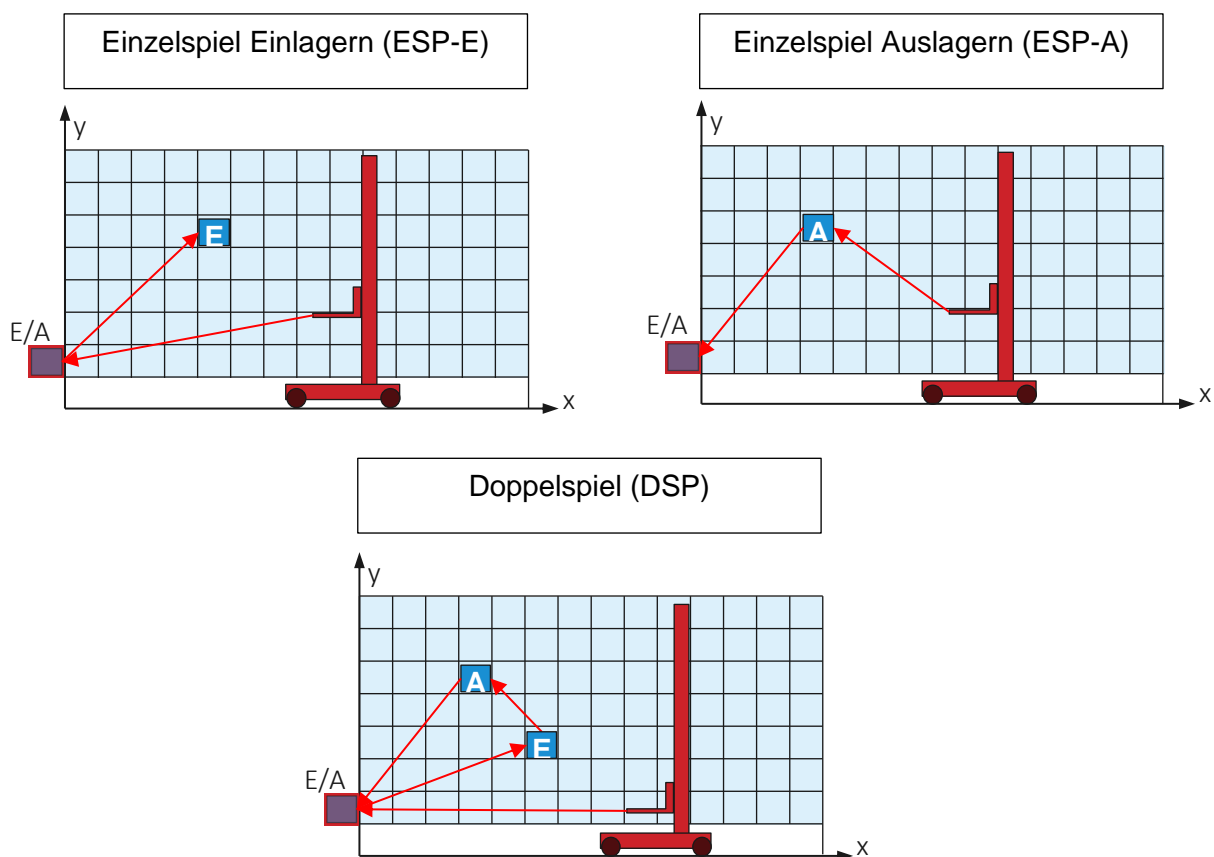


Abbildung 2-13: Ein- und Auslagerspiele eines RBGs [eigene Darstellung]

Für ein Einzelspiel Auslagern (ESP-A) fährt das RBG zu dem Regalfach (A) der auszulagernden LE, nimmt diese auf, fährt anschließend zu dem E/A und stellt die LE dort auf der Fördertechnik (FT) ab.

Ein Doppelspiel ist eine Einlagerung gefolgt von einer Auslagerung. Hierbei fährt das RBG zum E/A, nimmt dort die einzulagernde LE auf, fährt diese zu dem E, stellt die LE im E ab, fährt anschließend zu dem A, nimmt dort die auszulagernde LE auf, fährt diese zum E/A und stellt die LE dort auf der FT ab.

Der Zeitaufwand und der Energiebedarf für die Ein- bzw. Auslagerung sind am geringsten, wenn das RBG ausschließlich Doppelspiele durchführt. Das liegt daran, dass mit einem höheren Anteil an Doppelspielen der Anteil der durchgeführten Leerfahrten sinkt. Aus diesem Grund werden, wenn es möglich ist, DSP durchgeführt. Bei einem Lager ist nicht garantiert, dass immer Einlagerungen und Auslagerungen gleichzeitig anstehen. Dadurch ist die DSP-Bildung nicht immer möglich.

Die Ein- und Auslagerleistung und der Energiebedarf werden durch die Lagerbetriebsstrategien beeinflusst. Diese unterteilen sich nach *Gudehus* [Gud-2012, S. 646] in:

- Belegungsstrategien
- Bewegungsstrategien

Mit den Belegungsstrategien wird der Lagerplatz nach strategischen Auswahlkriterien ausgesucht. Mit den Bewegungsstrategien wird die Reihenfolge der Lagerbewegungen bestimmt [Gud-2012]. Die Belegungsstrategien, die in dieser Dissertation behandelt werden, sind [Atz-2011, S. 36] [Gud-2012, S. 646]:

- Freie Lagerplatzzuordnung bzw. chaotische Lagerung
- Schnellläuferkonzentration
- Einlagerung nahe Auslagerung bzw. Ein- und Umlageroptimierung (ELOULO)

Bei der *chaotischen Lagerung* werden die Lagerplätze für die Einlagerungen zufällig ausgewählt.

Mit der *Schnellläuferkonzentration* wird das Ziel verfolgt, die zurückzulegende Strecke zu minimieren. Oft werden in einem Lager viele Bewegungen wegen nur weniger Artikel durchgeführt. Um die Strecken zu reduzieren, werden die Artikel in Abhängigkeit ihres Durchsatzes in Klassen und die Lagerfächer in Abhängigkeit ihrer Entfernung in Zonen eingeteilt. Bei bspw. der *ABC-Zonierung* bilden die Produkte mit dem größten Durchsatz die A-Artikel und die mit dem kleinsten die C-Artikel. Die Zone mit der kleinsten Entfernung zu dem EA wird A-Zone und die mit der größten wird C-Zone genannt. Damit werden viele kurze Strecken für die A-Artikel und wenige lange Strecken wegen der C-Artikel zurückgelegt. Diese Strategie reduziert den Energiebedarf und erhöht die Ein- und Auslagerleistung des Lagersystems.

Eine weitere Belegungsstrategie zur Reduzierung der zurückzulegenden Strecken ist die *Ein- und Umlageroptimierung (ELOULO)*. Bei dieser Strategie wird die Strecke zwischen dem Auslagerfach und dem Ein- bzw. Umlagerfach reduziert. Eine Umlagerung

ist notwendig, wenn bei einem doppeltiefen Regalfach die auszulagernde LE auf dem hinteren Lagerplatz von einer anderen LE auf dem vorderen Lagerplatz verdeckt ist. In diesem Fall wird die vordere LE in ein anderes Lagerfach umgelagert, um die hintere LE auslagern zu können. Bei der Umlagerung und bei der Einlagerung bei einem DSP muss für die ein- bzw. umzulagernde LE ein Lagerfach gewählt werden. Bei der ELOULO wird dieses Fach möglichst nahe am Auslagerplatz (A) gewählt, um eine möglichst kurze Strecke zurücklegen zu müssen. Mit der ELOULO wird die vom RBG zurückzulegende Strecke reduziert und somit der Zeit- und Energiebedarf.

Die für diese Dissertation relevanten Bewegungsstrategien sind:

- Einzelspielstrategie
- Doppelspielstrategie

Die *Einzelspielstrategie* wird dann angewandt, wenn entweder Ein- oder Auslagerungen Vorrang haben. Das kann vorkommen, wenn neue Ware angeliefert wird, die Pufferstrecken volllaufen und keine zeitkritischen Auslageraufträge vorliegen. In diesem Fall werden ausschließlich ESP-E durchgeführt, um die LE schnellstmöglich einzulagern.

Bei der *Doppelspielstrategie* wird möglichst immer ein Doppelspiel durchgeführt. Wenn mehrere Ein- und Auslagerungen anstehen, werden diese möglichst zeit- und streckeneffizient kombiniert.

In dieser Dissertation sollen die logistischen Prozesse des Lagerverwaltungssystems nicht beeinflusst, sondern ausschließlich die Teilaufträge verzögert werden. Das LVS sortiert kundenindividuell die Auslageraufträge im Voraus und legt die Auftragsreihenfolge fest. Innerhalb des Auftrags wendet es Regeln wie das FIFO-Prinzip und/oder schwere Artikel vor leichten Artikeln an. Einlagerfächer wählt es nach Kriterien wie ABC-Zonierung, Gleichverteilung von Artikeln auf mehrere Gassen, Zonen für Gefahrstoffe, Fachabmessungen und/oder Einlageroptimierung. Die Implementierung dieser erhöht die Komplexität des Lastmanagements unnötig stark. Damit diese Untersuchung systemunabhängig ist, werden für die Untersuchungsszenarien die Auftragslisten nach den gängigen Lagerbetriebsstrategien erzeugt. Während der Simulation wird die Reihenfolge der Auftragslisten nicht beeinflusst, ausschließlich der Ausführungszeitpunkt wird verzögert.

2.1.4 Materialflussleistung eines RBG

Bei einem Lagersystem ist neben der Anzahl der Stellplätze die Durchsatzleistung eine zentrale Kenngröße. „Der Durchsatz ist definiert als mittlerer Stückgutstrom in das Lager hinein und/oder aus dem Lager heraus“ [VDI-4480]. Um die Lagersysteme bei unterschiedlichen Ausprägungen und/oder unterschiedlichen Herstellern miteinander vergleichen zu können, wird entweder das Verfahren der VDI-Richtlinie 4480 „Durchsatz von automatischen Lagern mit gassengebundenen Regalbediensystemen“ [VDI-4480] oder das der FEM-Richtlinie 9.851 „Leistungsnachweis für Regalbediengeräte“ [FEM-9a] zur Ermittlung der Umschlagleistung bzw. der Durchsatzleistung (im Folgenden Durchsatzleistung genannt) angewandt. Beide Richtlinien beschreiben die Berechnung der Spielzeit bzw. der Durchsatzleistung eines Lagers, bei dem alle Lagerfächer mit einer gleichen Häufigkeit angefahren werden. Die FEM-Richtlinie beschreibt die Berechnung der mittleren Spielzeit. Diese repräsentiert den Durchschnitt der Zeitbedarfe für bspw. die Einlagerungen in jedes Lagerfach. Der Reziprok der mittleren Spielzeit ergibt die Durchsatzleistung dieses Lagerspiels, wenn alle Lagerfächer in der gleichen Häufigkeit angefahren werden. Die VDI-Richtlinie beschreibt, wie die mittlere Durchsatzleistung zu ermitteln ist, wenn alle Fächer gleichmäßig angefahren werden. Der Lagersystemdurchsatz ist der kombinierte Durchsatz aller im Lagersystem verbauten RBG. In realen Lagersystemen ist es sehr unwahrscheinlich, dass alle Fächer gleichverteilt angefahren werden. Es werden Strategien angewandt, das Regal hat unterschiedliche Fachhöhen oder die Einlagerfächer werden zumindest in einer bestimmten Reihenfolge priorisiert, womit eine Gleichverteilung verhindert wird. Um die zurückzulegenden Wege zu reduzieren und die Spielzeit zu verkürzen, wird, wenn kein anderes Sortier- oder Auswahlkriterium angewandt wird, nicht nach dem Zufallsprinzip, sondern nach der Distanz zum Einlager- bzw. Auslagerpunkt ein freies Lagerfach zur Einlagerung ausgewählt. Die mittleren Spielzeiten bzw. Durchsatzleistungen der beiden Richtlinien stellen ausschließlich eine Referenz zum Vergleich der Spielzeiten unterschiedlicher Hersteller dar und geben eine durchschnittliche Durchsatzleistung ohne Optimierung dieser wieder. Die Angaben zur Durchsatzleistung in dieser Arbeit sind die kumulierten Ein- und Auslagerungen des Simulationslaufs eines RBG hochgerechnet auf eine Stunde. Da der Einfluss des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung untersucht wird, dient der konkrete Wert für die Berechnung des relativen Unterschieds der Durchsatzleistung.

In beiden Richtlinien wird die Durchsatzleistung anhand von definierten Lagerspielen ermittelt – entweder rechnerisch oder am realen System gemessen, um daraus die Durchsatzleistung zu berechnen. Die Spielzeit ist die Zeit, die für die Durchführung aller Tätigkeiten dieses Lagerspiels benötigt wird. Die Durchsatzleistung ergibt sich aus der Division der durchgeführten Ein- und/oder Auslagerungen durch die Spielzeit. Die Referenzpunkte für die Spielzeitermittlung bei einem Regal mit EA am unteren

linken Eckpunkt werden anhand der Kubatur des Lagers bestimmt. Die Berechnung nach FEM 9.851 ist in Tabelle 2-1 dokumentiert und in Abbildung 2-14 symbolisch dargestellt:

Tabelle 2-1: Koordinaten der Referenzpunkte für die Spielzeitermittlung der RBG nach [FEM-9a]

Punkt	Koordinaten	
	x	y
E = A	0	0
P1/P1E	$1/5 L$	$2/3 H$
P2/P2A	$2/3 L$	$1/5 H$

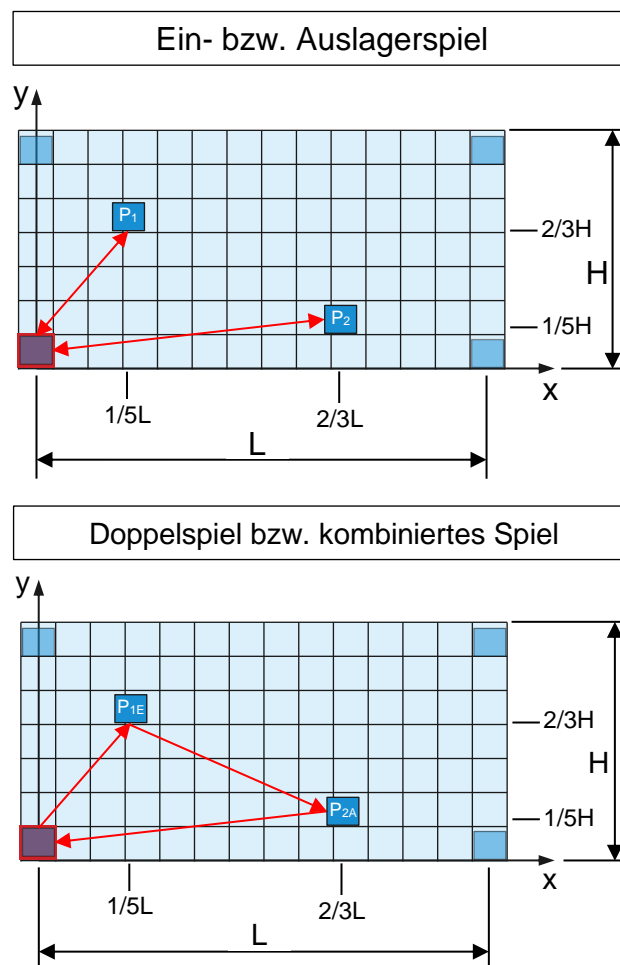


Abbildung 2-14: Referenzfahrten für die Spielzeitermittlung nach [FEM-9a]

Der Zeitbedarf für das mittlere Einzelspiel t_{m1} (Einlagern bzw. Auslagern) berechnet sich mit der Zeit für die Fahrt zwischen E und P1 t_{p1} , der Zeit für die Fahrt zwischen E und P2 t_{p2} und der Summe der Zeiten beim Einzelspiel t_{01} (Positionierung, Platzkontrolle, Schalt- und Kontrollvorgänge, Gabel- bzw. LAM-Spiel) folgenderweise ([FEM-9a]):

$$t_{m1} = \frac{1}{2} * (t_{p1} + t_{p2}) + t_{01} \quad (2-1)$$

Der Zeitbedarf für das mittlere Doppelspiel t_{m2} (Einlagern und Auslagern) berechnet sich mit dem Zeitbedarf für die Fahrt zwischen E, P_{1E}, P_{2A} und A $t_{p1E;P2A}$ und der Summe der Zeiten beim Doppelspiel t_{02} (Positionierung, Platzkontrolle, Schalt- und Kontrollvorgänge, Gabel- bzw. LAM-Spiel) folgenderweise ([FEM-9a]):

$$t_{m2} = t_{p1E;P2A} + t_{02} \quad (2-2)$$

Diese Berechnungen sind gültig, solange der Parameter a innerhalb der Grenzen $0,5 < a < 2$ liegt [FEM-9a]. Dieser berechnet sich aus dem maximalen Hubweg H , dem maximalen Fahrweg L , der Fahrgeschwindigkeit v_x und der Hubgeschwindigkeit v_y :

$$a = \frac{H}{L} * \frac{v_x}{v_y} \quad (2-3)$$

In dieser Dissertation wird die Durchsatzleistung als Summe der Ein- und Auslagerungen in der Stunde angegeben. Eine Unterscheidung zwischen Einzel- und Doppelspielen wird nicht vorgenommen, da dies für das Ergebnis nicht relevant ist und bereits bei der Erzeugung der Auftragslisten berücksichtigt wird.

2.1.5 Software und IT

In diesem Kapitel wird grob die IT-Infrastruktur beschrieben, die für die effiziente Steuerung des Materialflusses eines Lagersystems benötigt wird. Da das Lastmanagement die logistischen Prozesse des LVS nicht beeinflussen soll, ist für diese Dissertation ausschließlich die Steuerungsebene relevant. Für einen Überblick über die Systemarchitektur werden hier die Komponenten einer gängigen Systemlandschaft beschrieben. Das Ebenenmodell der Systemlandschaft aus Sicht des WMS [VDI-3601] ist in der Abbildung 2-15 dargestellt. Physikalische Systemkomponenten sind bspw. Lagerverwaltungsrechner, Server, Netzwerke, Steuerungsrechner und Materialflussrechner.

Auf der *Administrationsebene* befindet sich das Warenwirtschaftssystem (engl. *enterprise resource planing* (ERP) *system*). Dieses übernimmt u. a. die Aufgaben des Personalwesens, der Materialwirtschaft, der Produktionsplanung und des Rechnungswesens. An das LVS auf der Prozessebene schickt das ERP bspw. Artikelstammdaten, Kundenauftragsdaten bei Auslagerungen und Einlageravise bei einem Wareneingang.

Vom LVS empfängt es Informationen zu Bestandsveränderungen und Versandinformationen.

Auf der *Prozessebene* befinden sich das *Lagerverwaltungssystem (LVS)* und das *Materialflusssteuerungssystem (MFS)*. Das LVS ist eine „Anwendungssoftware, die alle Lagerprozesse steuert und verwaltet“ [Spr-2013, S. 87]. Typische Funktionalitäten des LVS sind die Lagerplatzverwaltung, Wareneingangsabwicklung, die Mengenverwaltung, die Transportverwaltung, die Kommissionierung, der Versand und die Inventur [Spr-2013, S. 87] [VDI-3601].

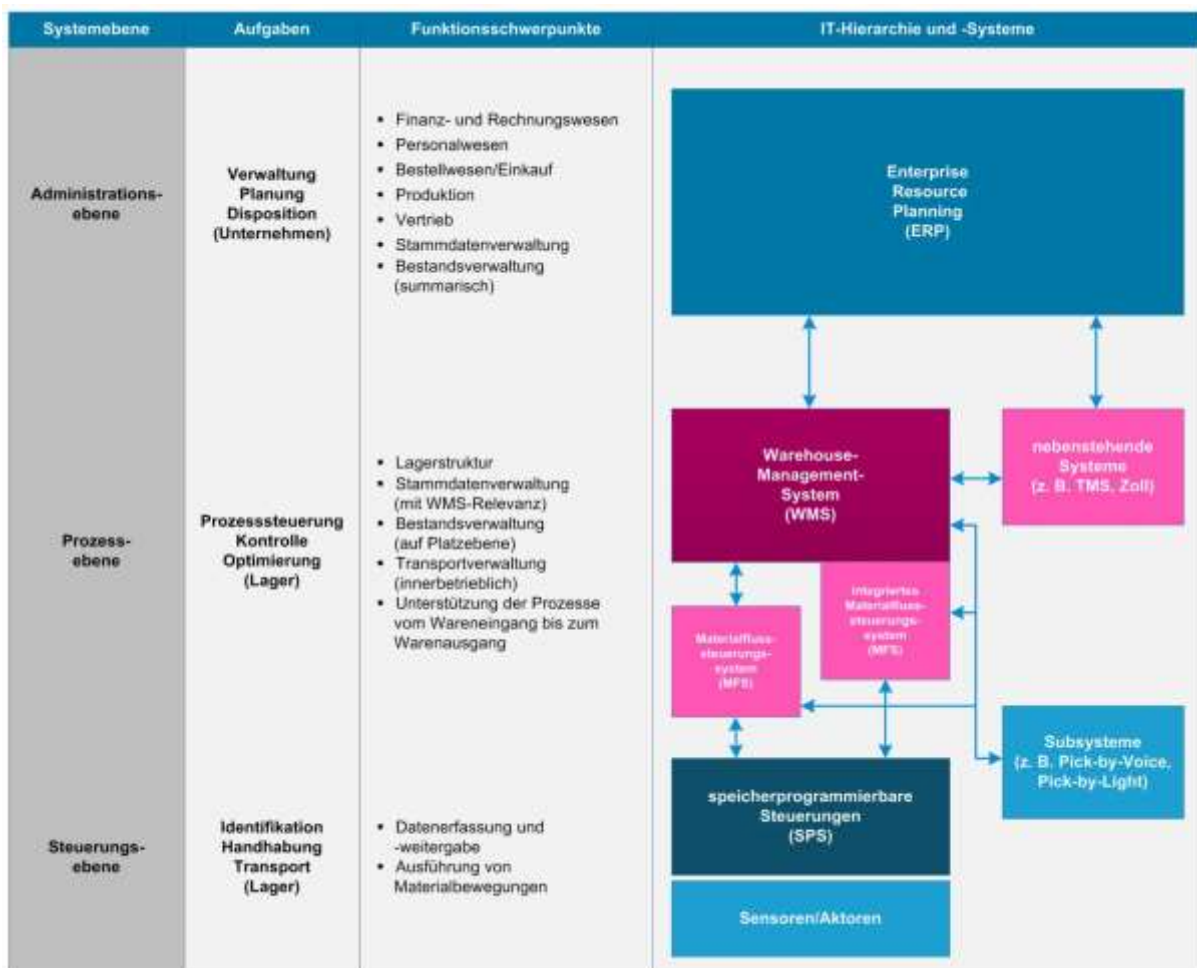


Abbildung 2-15: Ebenenmodell der Systemlandschaft (aus Sicht des WMS) [VDI-3601]

Das MFS ist das Bindeglied zwischen der Steuerung und dem LVS und „...koordiniert, gegebenenfalls auch optimiert, die Reihenfolge von durchzuführenden Aufgaben und kontrolliert die Quelle-Ziel-Beziehungen, in der einzelne (Transport-)Aufträge, Prozesse usw. abgearbeitet werden“ [VDI-3601]. Das MFS erhält vom LVS Transportaufträge. An das LVS schickt das MFS Quittierungen für die Transportaufträge und Status- und Fehlerinformationen.

Auf der *Steuerungsebene* befinden sich die Steuerungen der RBG bzw. der FT und in diesem Modell auch die Sensoren und Aktoren. Hier werden die einzelnen Bewegungen der Transportvorgänge gesteuert und überwacht. Von dem MFS erhalten die Steuerungen Teiltransportinformationen (bspw. Fahrt von Punkt $X_1|Y_1$ zu Punkt $X_2|Y_2$). An das MFS schicken die Steuerungen Transportquittierungen und Status- und Fehlerinformationen. Die RBG erhalten auf dieser Ebene die Informationen über die LE sowie den Start- und Zielpunkt für den Teilauftrag. Im Umrichter des RBG werden aus diesen Informationen die Bewegungen der Antriebe berechnet, durchgeführt und überwacht.

2.2 Energietechnische Grundlagen

2.2.1 Netzanschlussschreiben und Kabelquerschnittsberechnung

Dieses Kapitel beschreibt die Hintergründe zum Netzanschlussschreiben (NAS) von Lagersystemen. Dieses beinhaltet die elektrischen Angaben des Intralogistiksystems, die Kabelquerschnittsauslegung und die Sicherungsauswahl für die elektrische Leistungsversorgung der Anlage.

Die elektrischen Angaben des Intralogistiksystems bestehen aus den Daten für ein RBG sowie für alle im System verbauten RBG. Diese werden vom Anlagenbetreiber bspw. für die Auslegung des Transformators oder zum Antrag des Netzanschlusses benötigt. Zusätzlich wird die Stromverteilung mit den Stromunterverteilungen in den stationären Schaltschränken mit den Absicherungen grob beschrieben.

Die elektrischen Angaben für ein RBG umfassen im NAS:

- den Nennstrom,
- den Anlauf/-Anfahrstrom (im Folgenden Anfahrstrom genannt)
- die Nennleistung,
- die mittlere Leistung,
- den mittleren Strom und
- den mittleren Energiebedarf für das FEM-Spiel mit einfachtieferem LAM.

Die Nennleistung, der Nennstrom, der mittlere Leistungsbedarf, der mittlere Strombedarf und der mittlere Energiebedarf werden bei einem Intralogistiksystem mit mehreren Gassen mit der Anzahl der RBG multipliziert. Die Anfahrleistung und der Anfahrstrom für mehrere RBG werden mit Hilfe von sogenannten Gleichzeitigkeitsfaktoren (GZF)

berechnet. „Der Gleichzeitigkeitsfaktor ist das Verhältnis der maximal in einem Stromnetz abgeforderten elektrischen Leistung zur installierten elektrischen Leistung“ [Mül-2009]. Mit GZF wird, wie bereits in der Einleitung beschrieben, unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten die wahrscheinlich auftretende Leistung bzw. der wahrscheinlich auftretende Strom bei mehreren parallel arbeitenden RBG berechnet. Die Anfahrleistung berechnet sich mit der Anfahrleistung aller RBG P_A , der Anfahrleistung des einzelnen RBG P_{Ai} und dem Gleichzeitigkeitsfaktor GZF für die Anfahrleistung (Tabelle 2-2) folgendermaßen:

$$P_A = \sum P_{Ai} * GZF \quad (2-4)$$

Der Anlaufstrom berechnet sich mit dem Anlaufstrom aller RBG I_A , dem Anlaufstrom der einzelnen RBG I_{Ai} und dem Gleichzeitigkeitsfaktor GZF (Tabelle 2-2) analog:

$$I_A = \sum I_{Ai} * GZF \quad (2-5)$$

Tabelle 2-2: Gleichzeitigkeitsfaktoren für das Netzanschlussschreiben

Anzahl RBG	Anlaufstrom I_A
1	1
2	0,90
3	0,85
4	0,80
5-...	0,80

Da die GZF auf Erfahrungswerten basieren und keine aktive Begrenzung bzw. Kontrolle dieser Werte existiert, ist es im schlimmsten Fall möglich, dass diese Werte überschritten werden. Bei einem zu niedrigen GZF ist ein Ausfall der Anlage möglich.

Mit der Grundlage der Anschlussleistungen und Ströme werden die Niederspannung-Hochleistungs-Sicherungen (NH-Sicherungen) ausgelegt. Diese schützen Leitungen vor Beschädigungen durch thermische Überlastung. Bei einer Überlastung schmilzt der elektrische Leiter in der NH-Sicherung, und die Verbindung wird getrennt. Je nach Anwendungsfall gibt es unterschiedliche Auslösecharakteristika, die beschreiben, bei welcher Stromstärke und Belastungsdauer die Sicherung schmilzt. In der Abbildung 2-16 sind die Auslösecharakteristika einer NH-Sicherungsbaureihe des Herstellers Jean Müller GmbH abgebildet. Mit den blauen Linien ist dargestellt, dass die 400-A-

NH-Sicherung schmilzt, wenn eine Minute eine Stromstärke von ca. 1050 A anliegt, was das 2,6-fache des Nennstroms ist. Kurzzeitige Überlastungen sind für die NH-Sicherungen unkritisch.

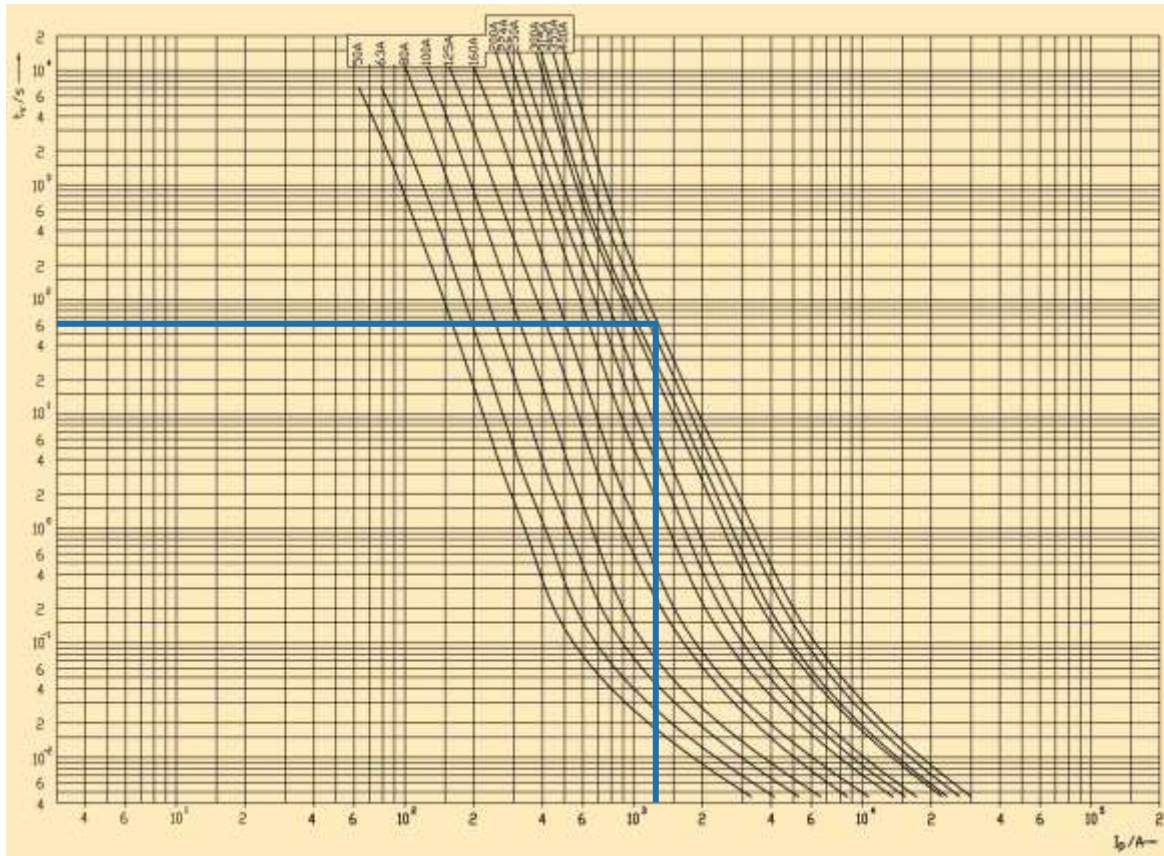


Abbildung 2-16: Auslösecharakteristika NH-Sicherungen [Jea -2015]

Neben der Auslegung der Sicherung bzw. der Schutzeinrichtungen mittels Nennbelastung muss eine Selektivitätsbetrachtung durchgeführt werden. „Unter Selektivität versteht man die Eigenschaft eines Schutzes, nach Möglichkeit nur die vom Fehler betroffenen Betriebsmittel abzuschalten“ [Mar-2013]. Durch die Selektivitätsbetrachtung wird sichergestellt, dass die Sicherung, die der Fehlerquelle am nächsten ist, als erstes auslöst. Andernfalls könnte durch einen vermeintlich kleinen Fehler im mitfahrenden Schaltschrank des RBG die gesamte Anlage ausfallen. Neben den hohen Ausfallkosten ist die Fehlersuche sehr aufwändig, da der Fehler schlecht eingegrenzt werden kann. Üblicherweise wird ein Selektivitätsfaktor von 1,6 verwendet. [Sch-2009, S. 554] Damit wird die Zuleitung eines stationären Schaltschranks, an dem zwei RBG, die mit jeweils einer 80-A-Sicherung abgesichert sind, mindestens mit einer 125-A-Sicherung abgesichert. Wenn aufgrund der Selektivität eine größere Sicherung verwendet wird, ist der Kabelquerschnitt der abgesicherten Leitung zu überprüfen.

Abschließend wird im Netzanschlussschreiben der Spannungsfall für die maximale Leistung bzw. den maximalen Strombedarf überprüft. Dabei wird untersucht, wie groß der Spannungsverlust aufgrund des elektrischen Widerstands der Leitung bei maximaler Stromstärke des Systems ist. Die Spannungsfalluntersuchung muss für die Zuleitung für den oder die stationären Schaltschränke, für die Leitung zwischen dem stationären Schaltschrank und, wie in diesem Fall, der Einspeisestelle der Schleifleitung und für die Schleifleitung selbst durchgeführt werden. „Der Spannungsfall von der Netzanschluss-Stelle bis zum Verbraucher darf unter üblichen Betriebsbedingungen 5 % der Nennspannung nicht überschreiten“ [DIN-60204-1, S. 64]. Wenn der Spannungsabfall größer als 5% ist, ist ein größerer Kabelquerschnitt zu wählen. Das LM begrenzt den maximalen Leistungsbedarf von mehreren parallel angeschlossenen RBG und beeinflusst damit die Zuleitung des stationären Schaltschranks. Deswegen interessiert in dieser Arbeit ausschließlich der Spannungsfall dieser Zuleitung. Der Spannungsabfall einer Leitung ΔU bei dem Anlaufstrom berechnet sich mit dem Anlaufstrom für alle RBG dieser Zuleitung I_A , der Länge der Zuleitung l , der Phasenverschiebung $\cos \varphi$, dem Leitwert κ und dem Leiterquerschnitt A wie folgt [Kas-2001, S. 181]:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} * I_A * l * \cos \varphi}{\kappa * A} \quad (2-6)$$

2.2.2 Lastmanagement

Wie in der Einleitung erwähnt, führt der Ausbau der EE und vor allem der fluktuierenden Energiequellen zu einer zunehmend volatilen und dezentraleren Stromerzeugung. Um den daraus entstehenden Stromschwankungen in der Erzeugung entgegenzuwirken, können u. a. Energiespeichertechnologien oder Lastmanagement (LM, auch „Demand Side Management“ genannt) eingesetzt werden. Lastmanagement ist die Veränderung des Energiebedarfs auf Grund zeitlich variabler Preise durch Lastverschiebung oder Lastreduktion [Dit-1989, S. 2]. Es werden mit dem Lastmanagement elektrische Prozesse verzögert, um Grenzen für die Stromnutzung einzuhalten. Dies ist auf der Verbraucherseite sinnvoll, um bspw. Leistungsspitzen zu vermeiden, die sich auf die Jahresleistungs- bzw. Monatsleistungskosten auswirken oder Pönalien wegen Mehrleistung nach sich ziehen [Mül-2009, S. 96]. Lastmanagement wird in der Industrie und in Haushalten schon sehr lange eingesetzt. Bspw. wird in Haushalten die überschüssige und günstige Energie im Nebentarif für Wärmepumpen und Nachspeicheröfen verwendet. Hierfür werden sie mittels Zeitschaltungen gesteuert oder durch ein Rundsteuersignal des Netzbetreibers aktiviert.

In Abbildung 2-17 ist die Arbeitsweise des Lastmanagements abgebildet. Dargestellt sind Lasten von drei parallelen Prozessen. Die Prozesse und die elektrischen Lasten der drei Prozesse überlagern sich zur abgebildeten Gesamtlast. Mit der Optimierung des Lastmanagements reduziert sich durch zeitliche Verschiebung von Last 1 die Gesamtlast um 40 %. Möglich ist diese Verschiebung, wenn die Lastprofile der einzelnen Lasten im Voraus bekannt sind. Somit kann das Lastmanagement die Lasten zueinander superpositionieren.

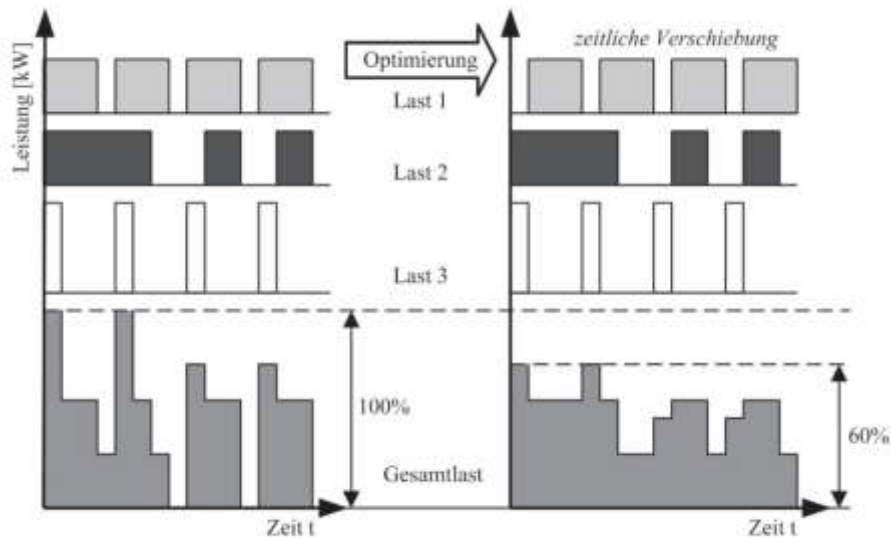


Abbildung 2-17: Arbeitsweise eines Lastmanagements [Mül-2009, S. 97]

Wie in Abbildung 2-17 und Abbildung 2-18 zu sehen ist, wird durch den Einsatz des Lastmanagements der Energiebedarf der Prozesse nicht reduziert, sondern geglättet. Ein Teil des Energiebedarfs der Lastspitzen wird durch die Verschiebung in Phasen mit niedrigerem Energiebedarf verschoben, der Energiebedarf für alle Prozesse bleibt gleich.



Abbildung 2-18: Lastlinien mit und ohne Lastmanagement [Sch-2009, S. 724]

Neben dem oben vorgestellten Lastmanagement gibt es Maximumwächter zur Begrenzung der Leistungsspitze der Anlage. Diese überwachen den Energiebedarf für eine Messperiode, indem die durchschnittliche Leistungsaufnahme überwacht wird. Wenn diese den erlaubten Grenzwert überschreitet, werden Lasten von Prozessen nach einer Prioritätenliste sukzessive abgeschaltet. Die Prozesse können entweder in der gleichen Periode, wenn die durchschnittliche Leistung unter einen Schwellwert sinkt, oder in der darauffolgenden Messperiode wieder aktiviert werden (vgl. [Pal-2011, S. 383f.])

Die Bedeutung von Lastmanagement steigt mit fortschreitendem Ausbau der EE. Lastmanagement kann einen Beitrag zur Erhöhung der Versorgungssicherheit leisten. Möglichkeiten sind nach *Klobasa et al.*[Klo-2013, S. 12]:

- Die Entlastung des Netzes und einzelner Netzelemente (*Redispatch*)
- Das Stromnetz ist darauf ausgelegt, elektrische Energie von den großen Kraftwerken zu den Endverbrauchern zu liefern. Durch den Ausbau der EE wird zunehmend Energie an vielen dezentralen Punkten im Stromnetz eingespeist. Infolgedessen kommt es teilweise zu hohen Belastungen in einzelnen Netzelementen. Um eine Überlastung und damit eine Beschädigung dieser zu vermeiden, wird die Netzkomponente bewusst entlastet, indem die Stromeinspeisung an einer Stelle des Stromnetzes reduziert und an einer anderen erhöht wird. Alternativ kann zur Entlastung mit Lastmanagement die Nachfrage an dem kritisch belasteten Netzelement reduziert werden.

- Ausgleich der Systembilanz zwischen Nachfrage und Erzeugung (Regelenergiebereitstellung)
- Die Nachfrage und die Erzeugung von elektrischer Energie müssen im Stromnetz ausgeglichen sein, ansonsten steigt bzw. fällt die Netzfrequenz. Damit die Netzbetreiber auf die Schwankungen reagieren können, vergüten sie Stromabnehmer, die Lasten zu- bzw. abschalten können, die Regelenergie. Mit einem Lastmanagement ist es möglich, an dem Regelenergiemarkt teilzunehmen. Zusätzlich ist konventionelle Regelenergie teuer und kann durch günstigeres Lastmanagement substituiert werden [Deu-2010, S. 407].
- Reduktion der Spitzenlastnachfrage im Gesamtsystem
- Lastmanagement bietet die Möglichkeit, die Spitzenlastnachfrage und damit den Strompreis zu senken. Mittels „Peak Shaving“ wird der Bedarf an teuren Spitzenlastkraftwerken reduziert, wodurch die Peak-Preise sinken [Deu-2010, S. 406].

In der Industrie wird das Lastmanagement für die Reduzierung der Stromkosten des Unternehmens verwendet. Dafür ist es notwendig, die Lastspitze abzusenken. Der Leistungsanteil der Stromabrechnung und damit der Grundpreis werden durch diese Maßnahme reduziert.

In dieser Arbeit wird das Lastmanagement für die Reduzierung der maximalen Leistung und die Begrenzung der Lastgangspitze der Anlage eingesetzt.

2.2.3 Stromkosten

In diesem Kapitel werden die Stromkosten für industrielle Stromabnehmer beschrieben. Die Allgemeinheit soll sicher, preisgünstig, verbraucherfreundlich, effizient und umweltverträglich mit Elektrizität über Leitungen versorgt werden [Bun-2005]. Die dabei anfallenden Kosten müssen verursachungsgerecht aufgeschlüsselt werden. Bei Stromkunden mit einem Jahresenergiebedarf von über 100.000 kWh werden die Kosten für den Strom abhängig von der maximal benötigten Leistung und von der abgenommenen Energie abgerechnet. Die Stromkosten bestehen aus einem leistungsabhängigen und einem arbeitsabhängigen Bestandteil. Der leistungsabhängige Bestandteil beinhaltet die fixen Kosten für die Bereitstellung der Leistung beim Kunden. Diese bestehen bspw. aus den Anschaffungskosten für die Leitungen, Transformatoren usw. Die arbeitsabhängigen Kosten werden in Abhängigkeit der abgenommenen elektrischen Energie verursacht und sind u. a. Kosten für die Stromproduktion und Kosten aufgrund von Leistungsverlusten in den Transformatoren. Beide Kostenbestandteile

beinhalten in Deutschland steuerliche Bestandteile. Zusätzlich entstehen teilweise Kosten für Blindleistung. Diese wird in dieser Arbeit nicht betrachtet, da die Antriebe der RBG mit Umrichtern betrieben werden und somit der Blindleistungsanteil sehr gering ist.

Zur Messung des elektrischen Leistungsbedarfs werden sogenannte Lastgangzähler verwendet. Diese zeichnen jede Viertelstunde den durchschnittlichen elektrischen Leistungsbedarf für diese Periode auf, welcher als Leistungsmittelwert bezeichnet wird. Den Verlauf dieser Messwerte nennt man Lastgang. Zur Berechnung der Kosten wird der Lastgang an das EVU übertragen. Anschließend wird von diesem die Lastgangspitze (teilweise auch als Leistungsspitze oder Jahreshöchstleistung bezeichnet) für die Berechnung der leistungsabhängigen Stromkosten ermittelt. Die Lastgangspitze ist entweder der höchste Leistungsmittelwert im Abrechnungszeitraum oder wird aus den höchsten Leistungsmittelwerten gemittelt. Die leistungsabhängigen Stromkosten K_P berechnen sich mit der Leistungsspitze $P_{MW,max}$ und dem Jahres- bzw. Monats-Leistungspreis e_p folgendermaßen [Heu-2010, S. 667]:

$$K_P = e_p * P_{MW,max} \quad (2-7)$$

Die arbeitsabhängigen Stromkosten K_A berechnen sich aus dem Arbeitspreis e_A und der bezogenen elektrischen Energie E_{bez} im Abrechnungszeitraum [Heu-2010, S. 667]:

$$K_A = e_A * E_{bez} \quad (2-8)$$

Die gesamten Stromkosten für den Abrechnungszeitraum $K_{P,A}$ sind damit:

$$K_{P,A} = K_P + K_A \quad (2-9)$$

Die Entgelte für die Nutzung des Stromverteilungsnetzes am Beispiel der Netze BW GmbH sind nachfolgend beschrieben. Die Entgelte für das Jahresleistungspreissystem der Entnahmestelle mit registrierender Lastgangmessung sind in der folgenden Tabelle 2-1 dargestellt:

Tabelle 2-3: Entgelte für Jahresleistungspreissystem der Entnahmestelle mit registrierender Lastgangmessung [Net-2018, S. 3]

Leistungspreissystem für Entnahmestellen mit registrierender Lastgangmessung	Jahresleistungspreissystem			
	Jahresbenutzungsdauer		Jahresbenutzungsdauer	
	$T_m < 2.500 \text{ h/a}$		$T_m \geq 2.500 \text{ h/a}$	
	Leistungspreis €/kWa	Arbeitspreis Cent/kWh	Leistungspreis €/kWa	Arbeitspreis Cent/kWh
Hochspannungsnetz	10,19	3,13	83,21	0,21
Umspannung Hoch-/Mittelspannung	10,20	3,28	88,45	0,15
Mittelspannungsnetz	15,90	4,52	111,49	0,7
Umspannung Mittel-/Niederspannung	16,02	4,64	111,96	0,8
Niederspannungsnetz	18,88	5,03	109,29	1,41

Die Jahresnutzungsdauer T_m berechnet sich aus dem Energiebedarf im Jahr sowie der Leistungsspitze und berechnet sich folgenderweise:

$$T_m = \frac{E_{bez}}{P_{MW,max}} \quad (2-10)$$

Neben den Entgelten für das Jahresleistungspreissystem werden die Aufschläge ermittelt. Hinzu kommen Entgelte für die Abrechnung, die Konzessionsabgabe, die Umsatzsteuer und die Entgelte für den Messstellenbetrieb und die Messung. Die Entgelte für die Messung sind abhängig von der Spannungsebene der Messstelle und der eingesetzten Technik. Dies wird hier nicht weiter detailliert.

Die Aufschläge und die Konzessionsabgabe sind in der folgenden Tabelle 2-4 zusammengefasst. Diese werden auf die leistungs- bzw. arbeitsabhängigen Stromkosten aufgeschlagen:

Tabelle 2-4: Ausschnitt der Aufschläge für die Netznutzung [Net-2018]

	Cent/kWh
EEG-Umlage	6,79
Aufschläge aufgrund individueller Netzentgelte nach § 19 Abs. 2 der Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (StromNEV) Letztverbrauchergruppe A' (Abnahme bis 1.000.000 kWh/a)	0,37
Aufschläge aufgrund des Gesetzes für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWKG) Letztverbrauchergruppe A' (Abnahme bis einschließlich 1.000.000 kWh/a)	0,345
Aufschläge aufgrund § 17f des Gesetzes für die Elektrizitäts- und Gasversorgung (EnWG) (Offshore-Haftungsumlage) Letztverbrauchergruppe A' (Abnahme bis einschließlich 1.000.000 kWh/a)	0,037
Aufschläge aufgrund §18 Abs. 1 der Verordnung über Vereinbarung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV) (Umlage für abschaltbare Lasten) Konzessionsabgabe (Gemeinden bis 500.000 Einwohner)	0,011
	1,99

Neben den Netzentgelten und den Aufschlägen werden die Stromkosten ohne das Netznutzungsentgelt (NNE; ca. 3,4-4 Cent/kWh; hier 3,5 Cent/kWh) abgerechnet. Die Stromsteuer liegt ohne einen Sondertarif bei 20,50 €/MWh [Bun-1999, S. 2]. Damit ergeben sich die in Abbildung 2-19 dargestellten Stromkostenanteile:

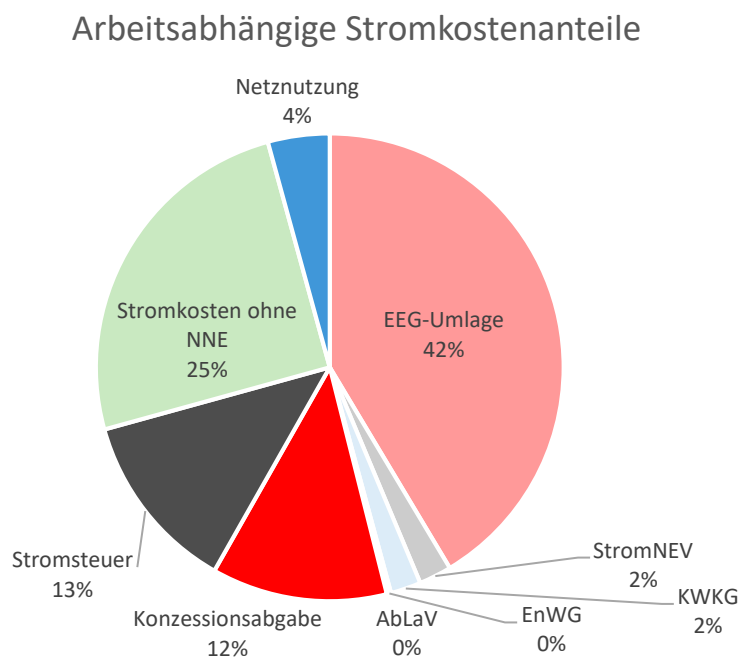


Abbildung 2-19: Stromkostenanteile der arbeitsabhängigen Stromkosten (Jahresnutzungsdauer 2500 h; Anschluss auf Mittelspannungsebene)

Für diese Arbeit interessieren die leistungsabhängigen Stromkosten und der Leistungspreis. Diese werden mit dem Lastmanagement direkt beeinflusst.

Ein weiterer einmaliger Kostenanteil beim Erstellen eines neuen Netzanschlusses sind die leistungsabhängigen Netzanschlusskosten (NAK; auch Baukostenzuschuss genannt). Diese werden analog zu den leistungsabhängigen Stromkosten berechnet und können auch vom Lastmanagement beeinflusst werden. Die leistungsabhängigen NAK K_{NA} berechnen sich mit dem Netzanschlussleistungspreis e_{NA} folgenderweise [Bes-2009, S. 1]:

$$K_{NA} = e_{NA} * P_{MW,max} \quad (2-11)$$

2.2.4 Auslegung von Transformatoren

„Transformatoren dienen zur Wandlung von Spannungen und Strömen auf höhere oder niedrigere Werte“ [Bög-2013, S. G36]. Ihr Verhalten ist mit Getrieben in der Mechanik zu vergleichen, welche die Drehzahl und den Moment wandeln. Der Wirkungsgrad eines Transformators hängt von verschiedenen Faktoren ab und liegt laut *Böge* [Bög-2013, S. G36] bei bis zu 95 %.

In der Energietechnik sind Transformatoren für die Übertragung der elektrischen Energie ein entscheidender Baustein. Für die Übertragung des Stroms sind verschiedene Spannungen bzw. Spannungsebenen erforderlich. Durch das Transformieren der Spannung auf eine höhere Spannungsebene wird der Leistungsverlust bei der Übertragung reduziert. Der Leitungswiderstand nimmt quadratisch mit der Stromstärke zu. Mittels Transformation auf eine höhere Spannungsebene sinkt die Stromstärke, wodurch die Verlustleistung reduziert wird. In Abbildung 2-20 sind Stromnetze und die Spannungsebenen dargestellt. Diese sind nach Siemens AG und *Busch* [Sie-2008, S. 26_58] [Bus-2011, S. 326]:

- Höchstspannungsebene über 380 kV
- Hochspannungsebene über 60 bis 380 kV
- Mittelspannungsebene über 1 bis 60 kV
- Niederspannungsebene bis 1000 V

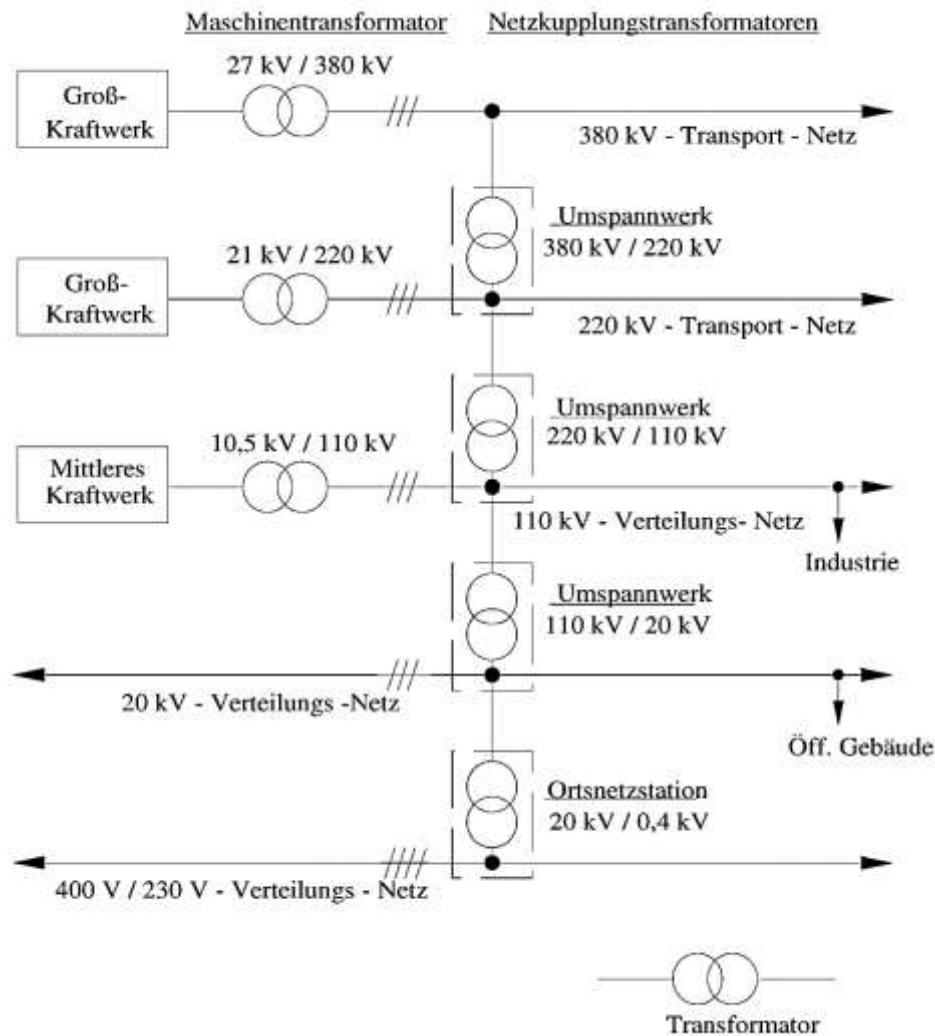


Abbildung 2-20: Grundsätzlicher Netzaufbau [Bus-2011, S. 327]

Die Verwendung der Spannungsebenen unterscheidet sich nach Schwab [Sch-2009, S. 33f.] folgendermaßen: Die Höchstspannungsnetze sind Transportnetze und verteilen den Strom über weite Strecken, bspw. von Nord- nach Süddeutschland. Die Hochspannungsnetze sind sogenannte Übertragungsnetze und übertragen den Strom regional von den Transportnetzen zu den Sondervertragskunden oder Verteilnetzen. Diese befinden sich auf der Mittelspannungsebene und verteilen den Strom lokal. An diese Ebene werden bspw. Ortsnetzstationen oder Industrieunternehmen angeschlossen. Die Niederspannungsebene wird zur Verteilung des Stroms an den Endabnehmer eingesetzt. Meistens wird der Strom auf 0,4 kV oder 0,6 kV transformiert. Intralogistikanlagen sind meist auf der Mittelspannungsebene mit dem Stromnetz verbunden. Zur Transformation von der Mittelspannungsebene auf die Niederspannungsebene werden Mittelspannungstransformatoren eingesetzt, welche die Spannung auf 0,4 kV transformieren.

Zusätzlich werden Transformatoren u. a. in Elektrogeräten, Spielzeugen und Signalübertragung eingesetzt. Darauf wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

In Intralogistikanlagen transformieren häufig Trockentransformatoren den Strom von der Mittelspannungsebene (10-20 kV) auf die Niederspannungsebene (0,4 kV). Trockentransformatoren sind wartungsarm und erfüllen im Gegensatz zu den ölisierten Transformatoren höhere Umwelt- und Brandschutzanforderungen [Sch-2009, S. 344]. Ausgelegt werden die Drehstromtransformatoren üblicherweise mittels Nenn-Scheinleistung. Die Scheinleistung der Transformatoren S_N wird in kVA angegeben [Kon-2007, S. 190] und berechnet sich mit der Spannung U und dem Nennstrom I_N folgenderweise:

$$S_N = U * I_N * \sqrt{3} \quad (2-12)$$

Der Leistungsbedarf von Regalbediengeräten ist volatil. Zusätzlich besteht teilweise kein direkter Zusammenhang zwischen der Nennleistung der Antriebe bzw. der Umrichter und der tatsächlich bezogenen mittleren Leistungen. Für eine exaktere Auslegung von Transformatoren ist es möglich, die Lastkollektive in die Berechnung der mittleren Scheinleistung S_M einzubeziehen. Diese berechnet sich mit der konstanten Last über einen Zeitraum S_i und der Zeitdauer der konstanten Last t_i :

$$S_M = \sqrt{\frac{\sum S_i^2 * t_i}{\sum t_i}} \quad (2-13)$$

Die Verlustleistung der Transformatoren P_V ist von der Belastung des Transformators abhängig und besteht aus einem konstanten Anteil und einem variablen Anteil. Sie berechnet sich mit den Leerlaufverlusten P_0 , den Kurzschlussverlusten P_K , der abgegebenen Scheinleistung S_{ab} und der Nennscheinleistung S_N :

$$P_V = P_0 + P_K * \left(\frac{S_{ab}}{S_N}\right)^2 \quad (2-14)$$

Bei vielen Herstellern steigt der Leerlaufverlust mit der Baugröße des Transformators an. Bei 1- und 2-Schicht-Betrieb befindet sich der Transformator den größten Zeitanteil im Leerlauf. Um Leistungsverluste zu reduzieren, ist ein kleinerer Transformator zu bevorzugen.

2.3 Stand der Forschung

Ein elektrisches Lastmanagement begrenzt die maximale Leistungsaufnahme und den Leistungsmittelwert eines mehrgassigen Lagersystems, indem es Teilaufträge der RBG zeitlich verzögert. Dies reduziert die Durchsatzleistung des Lagersystems. Wie stark sich das Lastmanagement auf die Durchsatzleistung auswirkt und welche Grenze den größeren Einfluss hat ist nicht bekannt. Der Stand der Forschung untersucht hauptsächlich Methoden zur Energiebedarfsermittlung von Regalbediengeräten und aktuelle Forschungen zu Lastmanagement bei Regalbediengeräten. Die Energiebedarfsermittlung konzentriert sich wegen der Wechselwirkungen mehrerer Gassen auf die Simulation. Die Analyse des Lastmanagements bei RBG untersucht die bereits bestehenden Methoden und Ansätze. Zusätzlich werden die Themen Spielzeitberechnung bzw. die Durchsatzermittlung von RBG und das Lastmanagement in der Gebäudetechnik und Produktionsplanung behandelt. Der Stand der Forschung behandelt die Themen:

- Energiebedarfsermittlung von RBG
- Spielzeitberechnung und Durchsatzermittlung von RBG
- Lastmanagement

In dieser Arbeit wird untersucht, wie sich ein Lastmanagement auf die Durchsatzleistung von mehrgassigen Lagersystemen auswirkt. Der Energiebedarf des einzelnen RBG ist abzubilden, um die Arbeitsweise des Lastmanagements nachzubilden. Dieses entscheidet auf Grund von Leistungsvoraussagen, ob der nächste Teilauftrag freigegeben werden kann. Hierfür ist der Leistungsbedarf für die RBG in allen Betriebszuständen genau genug nachzubilden. Die aktuellen Forschungen und Ansätze zur Nachbildung des Energiebedarfs werden auf deren Eignung für diese Arbeit untersucht. Nicht von Interesse ist, welche Geräteeigenschaften sich auf den Energiebedarf des RBG auswirken. Diese sind ausschließlich zur Beurteilung der Simulationsergebnisse von Interesse. Ähnlich ist das bei der Spielzeitberechnung, welche in dieser Arbeit ausschließlich zur Quantifizierung des Einflusses des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung ermittelt wird. Trotzdem werden die Ansätze zur Berechnung der Durchsatzleistung beschrieben, um einen Einblick in die aktuellen Forschungen zu geben.

Bei dem Themengebiet Lastmanagement wird ermittelt, welche Ansätze bereits im Themenumfeld der RBG untersucht und welche Ziele bei der Implementierung verfolgt wurden.

2.3.1 Energiebedarfsermittlung von Lagersystemen

Zur Energiebedarfsermittlung bei RBG gibt es unterschiedliche Ansätze. Hauptsächlich wird der Energiebedarf mit Simulationsmodellen oder analytischen Modellen ermittelt. Oft unterscheiden sich die Modelle geringfügig. Die in den Forschungen verwendeten Modelle werden im Folgenden kurz erläutert.

Am „Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme“ des Karlsruher Instituts für Technologie ist zur Ermittlung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik ein analytisches Energiebedarfsmodell entwickelt worden. Anhand dieses Modells werden die Energiesparpotentiale von aktuellen und zukünftigen Energieeffizienzmaßnahmen quantifiziert. Hierfür bildet das Modell den Energiebedarf beim Fahren, Heben und Teleskopieren von RBG inklusive aller Widerstände ab [Bra-2012, S. 4].

Der Energiebedarf der RBG berechnet sich in diesem Modell mittels Integration des Leistungsverlaufs. Dabei fährt das RBG mit konstanter Beschleunigung, was sich in den Leistungsbedarfen [Sch-2012a, S. 9] widerspiegelt. Untersucht werden kann damit der Einfluss von Zwischenkreiskopplung und Energierückspeisung auf den Energiebedarf der Zyklen eines RBG. In Abbildung 2-21 ist das Simulationsmodell abgebildet. Mit diesem werden einzelne Fahrten des RBG und Lastzyklen der LAM simuliert. Hierbei können unterschiedliche Bauformen (u. a. AKL, APL, Einmaster, Mehrmaster...) von RBG und verschiedene Komponenten (wie Planeten- oder Kegelradgetriebe, Asynchronantriebe oder Synchronantriebe) [Bru-2012, S. 177] simuliert werden.

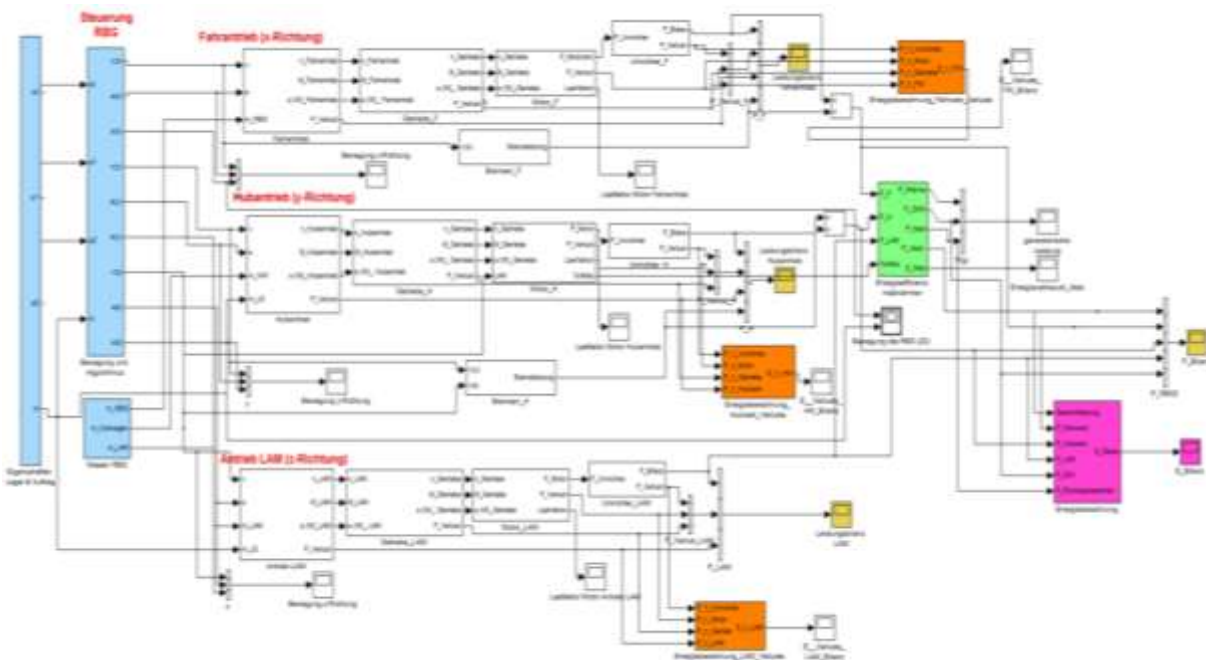


Abbildung 2-21: Simulationsmodell IFL [Bru-2012, S. 177]

Nicht erkenntlich ist, ob u. a. Auftragslisten abgearbeitet werden können, das Bremsenverhalten abgebildet ist, die verschiedenen Achssteuerungsstrategien simuliert werden können oder die Leistung für das Halten der Last gewichtsabhängig ist. Neben diesen Punkten wird zur Berechnung der Fahrkurve heutiger RBG meist der Ruck einbezogen. Aus diesem Grund ist der Detaillierungsgrad dieses Modells bei der Fahrkurvenberechnung nicht ausreichend. Diese Vereinfachung wirkt sich auf den Energie- und vor allem den Zeitbedarf für die Bewegungen der RBG aus.

Zusätzlich untersucht *Braun* in Ihrer Dissertation die Prognosegenauigkeit von verschiedenen Energiebedarfsberechnungsmodellen von RBG [Bra-2016]. Detailliert werden u.a. die Berechnungen der Bewegungen der RBG unter Berücksichtigung des Rucks, die Leistungsberechnung der Antriebe unter Berücksichtigung der Massenträgheitsmomente der Laufräder, Laufrollen oder der Seiltrommel des Hubwerks. Zusätzlich wird in der Untersuchung der Mast des RBG mit einem Schwingungsmodell nachgebildet und eine Regelung implementiert. Das Modell simuliert ein von einem vollautomatisierten RBG bedienten eingassiges Lagersystem. Daneben sind keine Achssteuerungsstrategien implementiert, die zum Stand der Technik zählen, und die Berechnung des Energiebedarfs bei verschiedenen Achskopplungen wird nicht detailliert.

Die TU Dresden hat im Rahmen des Projekts „Modellierung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten und verschiedener Lagerbetriebsstrategien zur Reduzierung des Energiebedarfs“ [Sie-2013, S. 1] ein Simulationsmodell entwickelt. Mit diesem wurde der Einfluss der Strategien „ABC-Zonierung auf energetischer Basis“, „Niedrigste-Energiebedarfs-Regel“, „Anpassung der Fahrgeschwindigkeit an die Hubzeit“ und „Anpassung der Fahrgeschwindigkeit an die geforderte Durchsatzleistung“ auf den Energiebedarf pro LE bzw. pro Stunde bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten bzw. geforderten Durchsatzleistungen untersucht.

Das Modell basiert auf einem siebenphasigen Bewegungsablauf, bei dem der Ruck, also die zeitliche Änderung der Beschleunigung, einbezogen wird. Für die Berechnung der Leistung für die horizontale Bewegung werden, neben der Masse des RBG, die rollende Reibung, die Lagerreibung, die Wirkungsgrade des Antriebs, des Getriebes und der Kraftübertragung sowie die Verlustleistung des Umrichters in Abhängigkeit der abgegebenen Leistung berücksichtigt. Für die Leistungsberechnung der vertikalen Bewegung werden zusätzlich die Erdanziehungskraft und die Bewegungsrichtung einbezogen. Der Fahrwiderstand der Laufrollen des Hubwagens wird vernachlässigt.

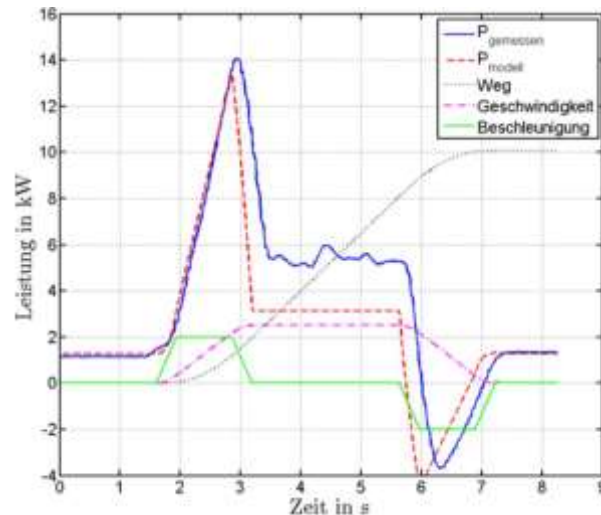


Abbildung 2-22: Vergleich des simulierten Leistungsbedarfs des Simulationsmodells der TU Dresden mit dem gemessenen Leistungsbedarf [Sie-2013, S. 5]

Im Vergleich des simulierten Leistungsbedarfs und der Messung des Leistungsbedarfs am realen RBG in Abbildung 2-22 ist vor der Anpassung der Modellparameter eine große Abweichung festzustellen. Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse wurden die Parameter des Simulationsmodells sukzessive angepasst, um eine bessere Übereinstimmung zu erhalten. Hierfür wurde zusätzlich ein vom Quadrat der Geschwindigkeit abhängiger Parameter aufgenommen [Sie-2013, S. 6] [Tur-2013, S. 21]. Der Wechsel vom Betriebs- in den Standby-Modus ist mit einer Reduzierung des Grundleistungsbedarfs nach einer Wartezeit abgebildet.

Ein weiteres Modell wurde im Zuge der Dissertation „Entwicklung und Bewertung von Lagerbetriebsstrategien zur Steigerung der Energieeffizienz in automatischen Hochregallagern unter Betrachtung des Umschlags“ [Som-2015; Som-2013] am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart entwickelt. Mit diesem Modell wird basierend auf einem mechanischen Modell der Energiebedarf eines RBG durch Integration des Leistungsverlaufs berechnet. Für die Berechnung der Fahrbewegungen wird eine konstante Beschleunigung angenommen und die Änderung der Beschleunigung vernachlässigt. Der Leistungsverlauf der horizontalen Bewegung berücksichtigt die Vollastbeharrungsleistung aufgrund des Fahrwiderstands sowie die Leistung, die zum Beschleunigen der Masse benötigt wird. Der Antriebswirkungsgrad wird dabei berücksichtigt.

Die vertikale Leistung setzt sich aus der Vollastbeharrungsleistung und der Beschleunigungsleistung zusammen. Berücksichtigt werden bei der Vollastbeharrungsleistung die Bewegungsrichtung, die Erdbeschleunigung, die Wirkungsgrade von Rollenzug,

Seiltrommel und Getriebe, die Hublasten, das Beschleunigungsmoment und der Antriebswirkungsgrad. Die Berechnung der Fahrbewegung vernachlässigt den Ruck, somit bildet sie die Bewegung des RBG ungenau nach.

Zusätzlich ist zur Umsetzung der Lagerbetriebsstrategien ein reduziertes Lagerverwaltungssystem implementiert. Die Aufgaben des LVS sind die Erzeugung der Ein- und Auslageraufträge, die Verwaltung der Lagerbelegung, die initiale Belegung des Lagers und die Anwendung der Lagerstrategien [Som-2015, S. 80ff.]. Neben dem LVS wurde eine Steuerung implementiert [Som-2015, S. 87], um die Nutzung des RBG als Energiespeicher zu untersuchen [Voß-2014]. Voß *et al.* [Voß-2014] untersuchen ein mehrgassiges Lagersystem. Die Leistungsberechnung basiert auf dem Simulationsmodell des IFT. Bei diesem Modell wird die Beschleunigung als konstant angenommen, zusätzlich wird mit dem Modell ausschließlich die Achskopplung „Zwischenkreiskopplung“ abgebildet.

Ein völlig anderer Ansatz zur Energiebedarfsermittlung wurde in einem Projekt des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg verfolgt. In der Veröffentlichung „Isoenergetic Shelves of Automatic Small Parts Warehouses“ [Sch-2012c, S. 1] wird der Energiebedarf für Fahrten des RBG mittels Kombination [Sch-2012c, S. 5] gemessener Energiebedarfe von Bewegungen des Fahr- bzw. des Hubantriebs ermittelt. Betrachtet wird bei einem RBG mit Energierückspeisung der Einfluss von Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Zuladungen und Startpositionen des RBG auf den Leistungsverlauf und Energiebedarf. Mit dieser Methode zur Energiebedarfsermittlung werden für das untersuchte RBG schnell neue Erkenntnisse über den Energiebedarf erlangt. Um andere RBG, bspw. APL, zu untersuchen, ist es notwendig, an diesen die Energiebedarfe zu messen. Im Projekt „Eneff Lager – Energieeffiziente Lagerstrategien und Lastverteilung“ hat das Institut für Logistik und Materialflusstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem sie die Durchsatzleistung und den Energiebedarf von verschiedenen Lagerbetriebsstrategien bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten für die Fahr- und die Hubbewegung ermittelt hat. Das Simulationsmodell wurde mit der Software Plant Simulation erstellt [Zad-2014, S. 15] [Sch-2014, S. 130]. Der Energiebedarf für die Lastspiele wird ebenfalls entsprechend der Strategie aus Tabellenwerten zusammengesetzt [Sch-2014, S. 87]. Der Ruck wird in diesem Modell für die Berechnung der Fahrkurve berücksichtigt [Sch-2014, S. 67]. Der Leistungsverlauf der RBG wird nicht nachgebildet. Die vorliegende Dissertation benötigt diesen zur Prüfung der Grenze für die maximale Leistungsaufnahme des Lagersystems.

Die Veröffentlichung „Der Einfluss kinematischer Parameter auf den Energiebedarf eines Regalbediengerätes“ [Sch-2012b, S. 1] des Magdeburger Instituts untersucht mittels Messungen den Energiebedarf. Sie stellt u. a. dar, dass das Herabsetzen der Fahrwerksgeschwindigkeit den Energiebedarf für die Fahrt senkt. Damit die Durchsatzleistung des Lagers nicht sinkt, soll die Geschwindigkeit für die Fahrbewegung ausschließlich bei Fahrten mit höherem Zeitbedarf für die Hubbewegung (auch „hubwerkskritische Fahrt“ genannt) reduziert werden. Dies wird in der Veröffentlichung an einem Beispiel gezeigt, da die Messung aller möglichen Kombinationen zu aufwändig ist.

Ein weiteres Simulationsmodell zur Energiebedarfsermittlung haben *Lerher et al.* entwickelt. In der Veröffentlichung „Energy efficiency model for the mini-load automated storage and retrieval systems“ [Ler-2014, S. 97] beschreiben sie genau die physikalischen Gleichungen zur Leistungs- und Energiebedarfsberechnung. Mit diesem Modell wird der durchschnittliche Leistungsbedarf durch die quadratischen Mittel verschiedener Regalgrößen und die unterschiedlichen Dynamikparameter berechnet. Zusätzlich zur elektrischen Leistung werden die Durchsatzleistung, der Energiebedarf und der CO₂-Ausstoß berechnet. Bei der Berechnung der Fahrkurve wird der Ruck vernachlässigt und es wird angenommen, dass bei allen Fahrten die maximale Geschwindigkeit erreicht wird. Neben diesen Vereinfachungen wird nicht dargestellt, ob oder wie die Leistungsberechnung validiert wurde.

Meneghetti et al. [Men-2015] verwenden ein Simulationsmodell, um den Einfluss der Regalabmessung und verschiedener Steuerungsstrategien auf die Durchsatzleistung und den Energiebedarf zu bestimmen. Das Simulationsmodell basiert auf einem Fahrprofil mit konstanter Beschleunigung. Die Geschwindigkeit von der jeweils schnelleren Bewegungsachse wird reduziert, damit beide Achsen die gleiche Zeit für die Fahrt benötigen [Men-2015, S. 7093]. Für die Berechnung des Energiebedarfs werden das Beschleunigungsmoment, der Rollwiderstand und die Gewichtskraft berücksichtigt. Zusätzlich kann mit dem Modell die Verwendung einer Energierückspeisung simuliert werden. Die Energiebedarfe für alle Kombinationen der zu untersuchenden Faktoren, den möglichen Fahrwegen und den unterschiedlichen Zuladungen werden im Voraus berechnet. Die Parameter zur Berechnung des Energiebedarfs werden in der Veröffentlichung „Multiple-weight unit load storage assignment strategies for energy-efficient automated warehouses“ [Men-2014] abgebildet. In dieser wird ein Ansatz vorgestellt, das Lager nach energetischen Kriterien zu zonieren. Die Formeln zur Berechnung des Energiebedarfs sind nicht beschrieben. Zusätzlich wird der Ruck bei der Berechnung der Fahrkurve vernachlässigt und die Leistungsberechnung wird nicht verifiziert.

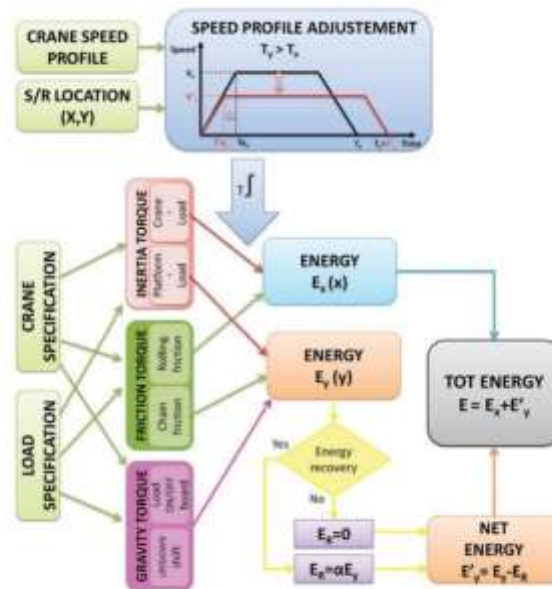


Abbildung 2-23: Grafische Darstellung der Energiebedarfsermittlung für ein RBG nach Meneghetti et al. [Men-2015, S. 7094]

Ein weiteres Simulationsmodell zur Energiebedarfsermittlung bei RBG ist in der Dissertation „Energiebedarfsermittlung und Energieeffizienzbewertung von Regalbediengeräten in automatischen Kleinteilelagern“ [Ert-2016] beschrieben. In dieser wird ein numerisches Simulationsmodell erstellt, das auf einem mathematisch-physikalischen Modell basiert. Damit wird der mittlere Energiebedarf für beliebig gestaltete automatische Kleinteilelager ermittelt. Neben konstruktiven werden strategische Systemparameter und deren Einfluss auf den mittleren Energiebedarf untersucht. Abschließend werden analytische und empirische Lösungsansätze vorgestellt, um den Energiebedarf auch ohne Simulation zu ermitteln. Bei der Berechnung der Bewegungen des RBG wird neben der Geschwindigkeit und der Beschleunigung der Ruck einbezogen. Dieses 7-Phasen-Bewegungsprofil bildet die Bewegung der RBG sehr gut nach. Die Berechnung des Leistungs- und Energiebedarfs erfolgt nach dem Teilmodell für die Antriebsstränge (Abbildung 2-24). Bei der Antriebsmomentberechnung werden neben den translatorischen und rotatorischen Momenten ein Moment zur Überwindung des Fahrwiderstandes und im Hubwerk ein Moment aufgrund der Gewichtskraft angesetzt. Dabei werden die dargestellten Parameter Gesamtwirkungsgrad η , Gesamtträgheitsmoment J , Getriebeübersetzung i und der Reibbeiwert μ berücksichtigt. Das Simulationsmodell ist zusätzlich mit Messungen an einem RBG evaluiert worden, während im Simulationsmodell die Antriebskonfigurationen Zwischenkreiskopplung und Energierückspeisung abgebildet sind. Das Simulationsmodell ist für die Energiebedarfsermittlung eines einzelnen RBG und nicht von einem mehrgassigen Lagersystem konzipiert worden. Es bildet mit dem 7-Phasen-Bewegungsprofil, der exakten Leistungsberechnung und den Antriebskonfigurationen eine gute Basis für die Untersuchung in dieser Arbeit.

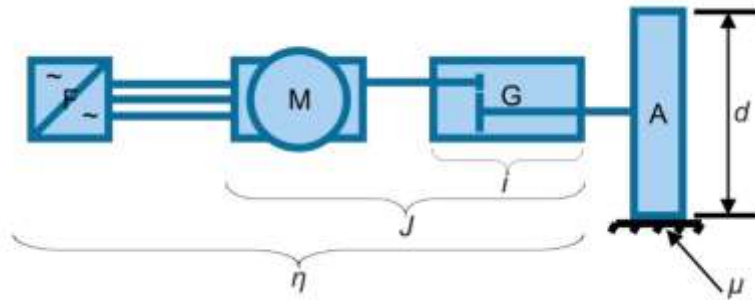


Abbildung 2-24: Teilmodell für die Antriebsstränge mit Komponenten und Parametern [Ert-2016, S. 52]

Cardenas *et al.* reduzieren mittels Superpositionierung der Achs-Bewegungen die Stromspitzen eines zweigassigen Lagersystems mit RBG [Car-2009]. Die Strombedarfsprofile der Fahrten für Fahr- und Hubwerk werden mit vier bis fünf Eckpunkten definiert. In Abbildung 2-25 ist das Strombedarfsprofil einer Fahrbewegung dargestellt. Die Verzögerungsphase scheint bei diesem Fahrprofil zu fehlen. Bei diesem Modellierungsansatz wird weder eine Zwischenkreiskopplung noch eine Energierückspeisung abgebildet. Dieser Ansatz vereinfacht die Berechnung der Leistungskurve stark und bildet somit die Realität nur unpräzise nach. Aus diesem Grund eignet er sich nicht für die Untersuchung in dieser Arbeit.

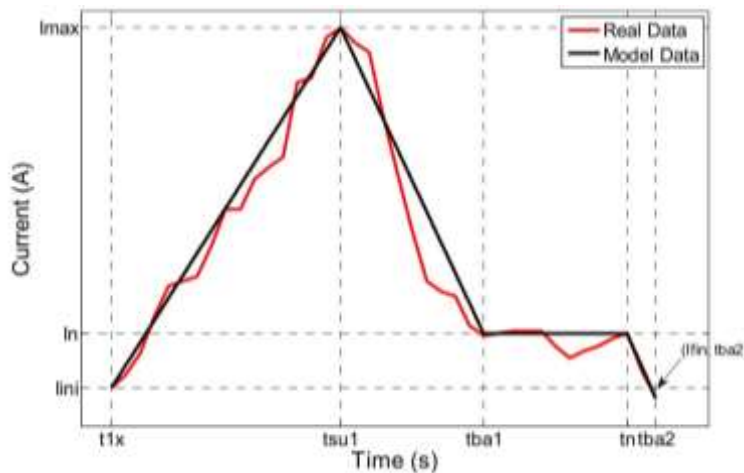


Abbildung 2-25: Vergleich von einem gemessenen und einem modellierten Strombedarfsprofil einer Fahrbewegung [Car-2009, S. 3298]

Tappia *et al.* stellen in Ihrer Veröffentlichung einen Ansatz vor, die Umweltauswirkungen von AKL in den Auswahlprozess der Systemlösungen einzubeziehen [Tap-2015]. Die Umweltauswirkungen von RBG-basiertem AKL und Shuttle-AKL werden mit Hilfe eines analytischen Berechnungsmodells verglichen. Die Umweltauswirkungen berechnen sich in diesem Modell aus dem thermischen Energiebedarf, um das Lager auf der benötigten Temperatur zu halten, und dem Energiebedarf für den Materialfluss. Der

Energiebedarf für den Materialfluss berechnet sich aus dem durchschnittlichen Energiebedarf für ein Lagerspiel und der Anzahl der Spiele. Der durchschnittliche Energiebedarf für ein Lagerspiel ist die Summe der Energiebedarfe für die Einzelspiele zu jeder Regalposition unter Berücksichtigung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung. Der Energiebedarf für die Einzelspiele ist die Summe der Energiebedarfe für die Fahrbewegungen dieses Spiels. Bei der Berechnung der Fahrkurve wird von einer konstanten Beschleunigung ausgegangen, die generatorisch gewonnene Bremsenergie beider Antriebe wird vernachlässigt. Folglich werden weder Zwischenkreis Kopplung noch Energierückspeisung abgebildet. Der Energiebedarf des Hubwerks berechnet sich aus der potentiellen Energie und dem Antriebswirkungsgrad. Der Energiebedarf für das Fahrwerk berechnet sich aus der kinetischen Energie der maximalen Geschwindigkeit, der Reibarbeit aufgrund des Rollwiderstands und dem Antriebswirkungsgrad. Insgesamt beinhaltet das Energiebedarfsmodell zu viele Vereinfachungen, um für die Untersuchung in dieser Arbeit geeignet zu sein.

2.3.2 Spielzeit- und Durchsatzleistungsberechnung

Bei der Spielzeit- und Durchsatzleistungsermittlung werden häufig analytische Modelle eingesetzt. *Hwang und Lee* stellen ein analytisches Modell vor, mit dem die Fahrzeit von Einzel- und Doppelspielen bei chaotischer Lagerung unter Berücksichtigung der Beschleunigung und Verzögerung berechnet werden kann [Hwa-1990]. Bei diesem Modell wird die Beschleunigung als konstant angenommen. *Lerher et al.* stellen ein analytisches Modell zur Fahrzeitberechnung vor, das sie für die Ermittlung von RBG-Spielzeiten bei chaotischer Lagerung mit doppeltiefem Regal einsetzen [Ler-2010]. Mit diesem Modell wird der Ruck bei der Fahrzeitberechnung nicht berücksichtigt. Weitere Veröffentlichungen untersuchen mit analytischen Modellen den Einfluss der Position des Ein- und Auslagerplatzes, der Verweilpunktstrategie, der Lagerkubatur, der Zonierung des Lagers und das Bilden von Vierfachspielen [Boz-1984; Gu-2007; Xu-2015; Zae-2013]. Die meisten Modelle vernachlässigen die Beschleunigung und die Verzögerung oder nehmen diese als konstant an [Gag-2012]. Einige Untersuchungen verwenden Simulationsmodelle, um die Fahr- bzw. Spielzeit zu ermitteln [Ler-2011; Mel-2005; Gag-2015; Gag-2014]. *Gagliardi et al.* erarbeiten ein Grundgerüst für die Simulation von mehrgassigen Lagersystemen mit RBG, um mit diesem neue Sequenzierungsmethoden zu bewerten [Gag-2015]. Bei ihren Simulationen vernachlässigen sie die Beschleunigung und Verzögerung. Zusätzlich greifen sie in die logistischen Prozesse ein, was in der vorliegenden Dissertation zu vermeiden ist.

Der Umrichter eines RBG berechnet die Fahrbewegung in sieben Phasen unter der Berücksichtigung von Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck. Die elektrische Leistungsberechnung der RBG in den meisten Simulationsmodellen basiert auf der Fahrbewegung. Das im Zuge dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell bildet die

Fahrbewegung und den Zeitbedarf sehr genau nach, um eine möglichst gute Übereinstimmung mit der Realität zu erreichen. Aus diesem Grund werden Berechnungsverfahren, die den Ruck und die Beschleunigung berücksichtigen, für diese Untersuchung herangezogen [Sch-2014; Ert-2016]. Die Durchsatzleistung ergibt sich aus den durchgeführten Ein- und Auslagerungen und ist abhängig von den erzeugten Auftragslisten für die Simulation. Sie dient zur Vergleichbarkeit der Simulationen untereinander.

2.3.3 Lastmanagement

In der Forschung existieren wenige Untersuchungen zum Einsatz von Lastmanagement in automatisierten Lagersystemen. Zum jetzigen Zeitpunkt sind die Veröffentlichungen von *Cardenas et al.* und *Voß et al.* bekannt [Car-2009; Voß-2014]. Beide Ansätze reduzieren den maximalen elektrischen Leistungsbedarf von mehrgassigen automatischen Lagersystemen mit RBG. Das Lastmanagement reduziert somit die Kosten, indem die Hardware kleiner dimensioniert wird oder geringere Stromkosten anfallen. In der Praxis bieten Hersteller von automatisierten Lagersystemen Steuerungen an, die das gleichzeitige Anfahren von mehreren RBG vermeiden und somit den maximalen Leistungsbedarf reduzieren. Der Leistungsmittelwert wird dabei nicht begrenzt. Dieses ist mit Hilfe von Maximumwächtern möglich, welche bei Überschreitung des mittleren Leistungsbedarfs für diese Periode einzelne Prozesse nach einer Prioritätenliste abschalten. *Schmidt und Schulze* untersuchen, wie sich das Verschieben der Bewegungen von mehreren Verteilwagen in Abhängigkeit des Status des jeweils anderen auf den Energiebedarf und die Durchsatzleistung der Verteilwagen auswirkt [Sch-2011].

Cardenas et al. beschreiben das Lastmanagement zur Reduzierung von Stromspitzen. Diese reduzieren sie mit einem genetischen Algorithmus, der die Bewegungen von Fahr- und Hubachse superpositioniert. Sie optimieren damit den Strombedarf eines Lagersystems mit zwei RBG. Diese Methodik begrenzt nicht den Leistungsbedarf, sondern sucht nach den optimalen Startzeitpunkten beider Achsen, die den niedrigsten Strombedarf erzeugen. Die Stromkurven für jede Achse werden aus vier bis sechs Stützpunkten erzeugt, welche aus Messergebnissen ermittelt werden. Diese Methode ist, für den Vergleich vieler Systemkonfigurationen sehr aufwändig. Die RBG führen in dem beschriebenen Beispiel jeweils ein Lagerspiel aus. Der Algorithmus reduziert die Stromspitze um 21 % und erhöht den Zeitbedarf um 17 %. Die Ergebnisse sind ausschließlich für die beiden Lagerspiele dargestellt, jedoch nicht für den Einsatz in einer realen Anlage.

Ein Lastmanagement für ein mehrgassiges Lagersystem mit RBG untersuchen *Voß et al.* In diesem Ansatz wird das Lagersystem als Energiespeicher verwendet. Abhängig

vom aktuellen Strompreis werden die Lagerfächer für Ein- und Auslagerungen ausgewählt. Für diesen Ansatz muss das RBG mit einer Energierückspeisung ausgestattet sein. Bei einer Höhendifferenz der Lagereinheiten zu dem EAP haben diese potentielle Energie. Ist die Höhendifferenz positiv, kann beim Auslagern das Energieniveau des Lagers reduziert werden. Ist sie negativ, wird das Energieniveau erhöht. Somit ist das Lager ein Energiespeicher. Bei einem hohen Energiepreis werden Einlagerfächer auf einer niedrigen Ebene ausgewählt, um wenig potentielle Energie in das Lager einzubringen. Gleichzeitig werden bei Auslagerungen LE mit hoher potentieller Energie ausgewählt. Bei einem niedrigen Strompreis werden bei der Einlagerung Lagerfächer mit möglichst hoher potentieller Energie ausgewählt. D. h., LE mit hoher Zuladung bzw. hohem Gewicht werden in eine der oberen Ebenen im Lager eingelagert. Gleichzeitig werden LE mit niedriger potentieller Energie ausgelagert. Die potentielle Energie im Lager wird dadurch verändert, und das Lastmanagement steuert die Betriebskosten des Lagersystems. Neben dem Speichern der Energie glättet die Leistungsplanung den elektrischen Leistungsbezug des Lagers. Abbildung 2-26 vergleicht einen konventionellen Bahnverlauf mit möglichen Bahnverläufen nach der Leistungsplanung. Um den Leistungsbedarf aller RBG auszugleichen, können die Bahnverläufe willkürlich ausgeführt werden. Für die Untersuchung werden Auftragslisten simuliert, welche das Energiemanagementsystem nach energetischen Kriterien umsortiert. Der Ansatz von *Voß et al.* kommt der vorliegenden Untersuchung sehr nahe. Der Leistungsbedarf und der Lastgang werden vom Energiemanagementsystem aktiv gesteuert. Dieser Ansatz ist sehr interessant und kombiniert das Lastmanagement mit energetischen Lagerstrategien. Nicht dargestellt in der Veröffentlichung ist, wie der Energiebedarf berechnet wird sowie die Auswirkung des Energiemanagementsystems auf die Durchsatzleistung des Lagers.

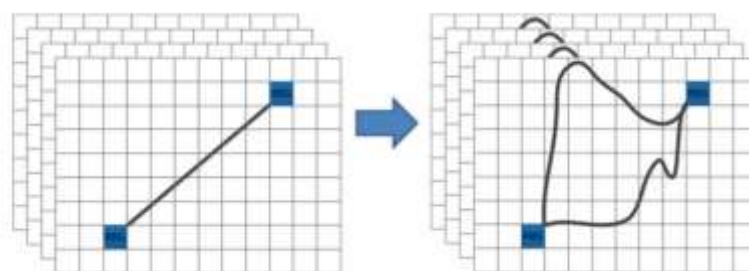


Abbildung 2-26: Freiheiten der Bahnplanung unter Berücksichtigung eines gleichmäßigen Leistungsbedarfs [Voß-2014, S. 184]

Abseits von der Logistik beschreibt *Jungwirth* die Entwicklung einer modellprädiktiven Gebäuderegulierung [Jun-2014]. Diese Regulierung kann als Lastmanagement für den Leistungsbedarf des Gebäudes gesehen werden. Mit dieser Regulierung werden Lasten der Gebäudetechnik zur Reduzierung der Stromkosten verschoben. Angenommen wird ein zeitlich variabler Stromtarif, der in stündlicher Auflösung für mehrere Jahre

vorliegt. Die Gebäuderegulierung reduziert die Stromkosten bei gleichzeitigem Einhalten der thermischen Behaglichkeit im Gebäude. Mit Hilfe einer Simulationsumgebung ermittelt Jungwirth durch einen genetischen Algorithmus einen kostenoptimalen Fahrplan für die untersuchte Gebäudetechnik. Die Gebäuderegulierung bzw. das Lastmanagement reduziert die Energiekosten für das Untersuchungsszenario um ca. 25 % im Jahr 2010 und um bis zu 63 % im Jahr 2030 [Jun-2014].

Hu et al. optimieren mit einem Lastmanagement den Energie- und Leistungsbedarf von einer Produktionsanlage, um die Stromkosten zu reduzieren [Hu-2014]. Verschiedene evolutionäre Algorithmen superpositionieren die Lasten der Produktionsanlage so, dass daraus möglichst geringe Stromkosten resultieren. Mit dieser Methode werden die Stromkosten bei allen evolutionären Algorithmen um mehr als die Hälfte reduziert.

Bosen und Haepf haben ein Lastmanagement für Haushaltsgeräte patentiert [Bos-2010]. Dieses Lastmanagement empfängt von diesen den Leistungs- und Zeitbedarf für die anstehende Tätigkeit des Geräts und entscheidet, zu welchem Zeitpunkt diese Tätigkeit ausgeführt wird. Mit diesem System soll eine Überlastung der Stromversorgung vermieden und evtl. zusätzlich die Hardware kleiner dimensioniert werden.

2.4 Forschungslücke und Aufgabenstellung

Im Kapitel „Stand der Forschung“ zeigt sich, dass zahlreiche Untersuchungen zum Energiebedarf von RBG und Shuttle-Systemen existieren. Diese Entwicklung ist dem erhöhten Interesse der Betreiber am Energiebedarf der Lagersysteme und dem noch immer vorhandenen Energiesparpotential geschuldet. Neben dem Reduzieren des Energiebedarfs der RBG steigt das Interesse an einer intelligenteren Nutzung der Energie, indem der volatile Leistungsbedarf von Lagersystemen geglättet wird. Mit dem Voranschreiten der Energiewende erhöht sich die Anzahl an Untersuchungen zum aktiven Steuern des Leistungsbedarfs oder elektrischen Lastmanagements, bspw. von Produktionsanlagen und in der Gebäudetechnik. Aus dem Stand der Forschung ergibt sich, dass die Auswirkung des Lastmanagements auf den Energiebedarf und die Durchsatzleistung eines mehrgassigen Lagersystems bisher nicht untersucht wurden und eine **Forschungslücke** besteht, die im Folgenden beschrieben wird. Die Untersuchungen zur Spielzeit- und Durchsatzleistungsermittlung werden zur Darstellung der Methoden und zur Fahrkurven- bzw. Fahrzeitberechnung erwähnt. Die Untersuchungen zur Energiebedarfsermittlung der RBG [Sie-2013; Tur-2013; Ler-2014; Ertl-2016] dienen als Grundlage für die Energiebedarfsberechnung dieser Dissertation. *Ertl* untersucht umfassend den Energiebedarf der gängigsten Systemkonfigurationen von

AKL [Ert-2016]. Die Arbeit ist eine am Institut fml verfügbare Vorarbeit die Teilaspekte, wie das 7-Phasen-Bewegungsprofil, die Zwischenkreiskopplung und die Energierückspeisung abdeckt.

Voß et al. und *Cardenas et al.* untersuchen die intelligentere Nutzung der elektrischen Energie von mehrgassigen Lagersystemen mit Hilfe eines Lastmanagements [Voß-2014; Car-2009]. Beide glätten den elektrischen Leistungsbedarf des Lagersystems. *Voß et al.* nutzen ein Energiemanagementsystem, das abhängig vom aktuellen Energiepreis die Lagerplätze auswählt [Voß-2014] und den Leistungsbedarf mit einer unkonventionellen Bahnplanung glättet. Die Untersuchung ist ein Funktionsnachweis und vernachlässigt die Durchsatzleistung des Lagersystems. Diese ist für die Anlagenbetreiber jedoch von zentraler Bedeutung, da es die Kernaufgabe des Lagersystems ist. Zusätzlich werden andere Auswahl- und Sortierkriterien des LVS wie bspw. Gleichverteilungsstrategien vernachlässigt. Diese haben möglicherweise eine höhere Priorität und können nicht überschrieben werden. Die Fahrbewegungsplanung erhöht die mechanische Belastung des Tragwerks der RBG, da sie mehrere Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge und Richtungswechsel einer Achse bei der Fahrt von Punkt A nach B zulässt. Die Lagerfach- und Fahrbewegungsplanung setzt voraus, dass die Vorgänge in einem Lager zeitdiskret planbar sind. Teilweise werden Aufträge zustandsabhängig ausgelöst, was die Planung kurzfristig ändert. Zusätzlich stellt die Synchronisierung der Gassen bei dieser Methodik eine Herausforderung dar. Die Ergebnisse der Arbeit von *Voß et al.* sind aufgrund der neuartigen Lagerfach- und Fahrbewegungsplanung nicht mit gängigen Lagersystemen zu vergleichen [Voß-2014]. Die Untersuchung stellt ein visionäres Konzept vor und untersucht nicht den Einfluss auf die Durchsatzleistung des Lagersystems. Die Ergebnisse geben nicht den Einfluss des Energiemanagementsystems auf die Durchsatzleistung des Lagersystems wieder, sondern betrachten ausschließlich eine Systemkonfiguration. Für eine vollständige Betrachtung fehlen weitere Ausprägungen an Lagersystemen und RBG-Parametern.

Cardenas et al. vermeiden in ihrer Untersuchung die Überlagerung der Stromspitzen der Antriebe zweier RBG und reduzieren den maximalen Leistungsbedarf [Car-2009]. Ein evolutionärer Algorithmus superpositioniert die Startzeitpunkte der Achsbewegungen, bis ein möglichst geringer Leistungsbedarf der RBG entsteht. Der Artikel beschreibt ausschließlich die Optimierung von zwei Fahrten zweier RBG, lässt aber die Abarbeitung von Auftragslisten aus. Die Optimierung mehrerer Teilaufträge ist nicht beschrieben. Zur Optimierung müssen mehrere Aufträge im Voraus bekannt sein. Die RBG verfügen über keine Zwischenkreiskopplung, welche Stand der Technik bei RBG ist.

Die beiden Ansätze untersuchen die intelligenter Nutzung des Stroms bzw. der elektrischen Leistung in einem mehrgassigen Lagersystem. Beide glätten den elektrischen Leistungsbedarf des Lagers, indem sie die Fahrkurven mehrerer RBG im Voraus planen. Dabei begrenzen sie den Leistungsbedarf nicht, sondern ermitteln unter den vorgegebenen Randbedingungen die optimale Lösung. Komponenten der Stromversorgung werden aber teilweise anhand der maximalen Leistung ausgelegt. Ohne diese zu begrenzen, verändert sich die Dimensionierung nicht. Beide Ansätze betrachten eine einzige Systemkonfiguration. Die Ergebnisse sind systemspezifisch, somit haben sie keine Allgemeingültigkeit. Um eine Aussage über die Auswirkungen der Energiemanagementsysteme zu treffen, ist die Untersuchung weiterer Systemkonfigurationen notwendig. Daneben werden die Auswirkungen der Methoden auf die Durchsatzleistung des Lagersystems nicht dargestellt. Der Betreiber investiert aber in ein Lagersystem, weil dies die benötigte Durchsatzleistung gewährleistet. Das Energiemanagementsystem beeinflusst die Durchsatzleistung, und der Betreiber wird es nicht akzeptieren, wenn seine Auswirkung auf die Durchsatzleistung nicht bekannt ist. Sind dem Betreiber die Auswirkungen bekannt, kann er entscheiden, ob er die Durchsatzleistung reduziert, um die strombedarfsabhängigen Kosten des Lagersystems zu verringern.

Aus den dargestellten Defiziten ergibt sich ein Bedarf nach einer systematischen Untersuchung des Einflusses des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung von automatisierten Lagersystemen in den derzeit am Markt verbreiteten Ausprägungen. Das Lastmanagement begrenzt den maximalen Leistungsbedarf und den Leistungsmittelwert des Lagersystems. Dabei soll der Zusammenhang zwischen diesen Grenzen und der Durchsatzleistung bei unterschiedlichen Systemausprägungen herausgearbeitet werden. Die logistischen Prozesse werden hierbei nicht beeinflusst, um eine Aussage zu Systemen mit gängigen und nicht laborartigen Lagerstrategien treffen zu können. Mit den Ergebnissen dieser Arbeit bekommen Betreiber von Lagersystemen die Auswirkung des Lastmanagements auf ihre Durchsatzleistung aufgezeigt. Sie können darauf basierend eine Entscheidung treffen, welche Einbußen der Durchsatzleistung sie in Kauf nehmen, um ihren Energie- und Leistungsbedarf anzupassen und gegebenenfalls zu optimieren.

2.4.1 Forschungsfragen

Auf Basis der dargestellten Ausgangssituation und Problemstellung sowie der offengelegten Forschungslücke ist es das Ziel dieser Arbeit, den Einfluss des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung von automatisierten Lagersystemen mit mehreren parallelen RBG zu identifizieren und zu quantifizieren. Für eine Optimierung der Kosten soll das Lastmanagement die einstellbaren Grenzen für die Leistungsspitze und den

Leistungsmittelwert überwachen. Der Zusammenhang zwischen der Leistungsaufnahme der RBG, den Grenzen sowie der Durchsatzleistung soll dargestellt werden. Daher lautet die

1. *Forschungsleitende Fragestellung:*

Wie wirken sich die Grenzen für den Leistungsmittelwert und die Leistungsspitze des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung von automatisierten Lagersystemen mit zwei oder mehr parallel angeschlossenen RBG aus?

Aus dieser Fragestellung leiten sich weitere Fragen ab. Diese unterstützen die Beantwortung der forschungsleitenden Frage.

Um die forschungsleitende Frage zu beantworten, wird der detaillierte Energiebedarf eines RBG analysiert. Es muss Klarheit bezüglich der relevanten Einflussfaktoren und Verhaltensweisen auf den Energiebedarf sowie die Durchsatzleistung des Lagersystems bestehen. Dazu gehören die mechanischen und elektrischen Komponenten zur Wandlung und Skalierung von mechanischen Kräften bzw. mechanischen und elektrischen Leistungen und Energien. Zusätzlich sind die Verhaltensweisen und Programmierungen von Interesse. Für alle ermittelten Komponenten und Verhaltensweisen werden Regeln und Formeln definiert.

2. *Forschungsfrage:*

Welche Einflussfaktoren und Verhaltensweisen wirken sich auf den Energiebedarf und die Durchsatzleistung des RBG aus und wie lassen sie sich beschreiben?

Neben der Anzahl der RBG hat möglicherweise die Geräteart bzw. Gerätekategorie einen Einfluss auf das Ergebnis. Mit der Geräteart bzw. -klasse wird unterschieden, ob es sich um ein APL für die Lagerung von LE in Größe von Paletten oder um ein AKL für die Lagerung von kleineren Kisten, Kartons oder KLT handelt. Je nach Geräteart unterscheiden sich zusätzlich die möglichen Zuladungen, die Parameter für die Fahrgeschwindigkeit und -beschleunigung, die Hubgeschwindigkeit und -beschleunigung (im Folgenden Dynamikparameter genannt) und die Lagerstrategien. Die zu untersuchenden Lagerstrategien sind chaotische Lagerung und ABC-Lagerung.

3. *Forschungsfrage:*

Welchen Einfluss haben die Geräteart, die Zuladung, die Dynamikparameter und die Lagerstrategien bei der Verwendung des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung des automatischen Lagers?

Ein Anlagenbetreiber benötigt schnell Informationen über den Einfluss des elektrischen Lastmanagements auf die Durchsatzleistung seines Lagersystems. Hierfür ist es wichtig, diesen schnell anhand einer einfachen Formel ermitteln zu können, damit er eine Entscheidung treffen kann. Deshalb stellt sich die

4. *Forschungsfrage:*

Wie lässt sich der Einfluss des elektrischen Lastmanagements auf die Durchsatzleistung des Lagersystems mit Hilfe einer Berechnungsformel ohne eine aufwändige Untersuchung berechnen?

Die oben genannten Forschungsfragen sollen im Zuge der Dissertation beantwortet werden.

2.4.2 Methodischer Ansatz

In diesem Kapitel wird der methodische Ansatz zur Beantwortung der im vorherigen Kapitel aufgestellten Forschungsfragen beschrieben. Um die Einflussfaktoren auf die Änderung der Durchsatzleistung zu ermitteln, wäre der experimentelle Versuchsumfang zu umfangreich. Mit einem Simulationsmodell wird der Versuchsumfang für die Ermittlung aller Einflussfaktoren stark reduziert. Benötigt wird ein parametrierbares Simulationsmodell, das den Energiebedarf mehrgassiger Lagersysteme mit RBG unter Verwendung unterschiedlicher realer Auftragslisten und die Funktion eines Lastmanagements für das Lagersystem nachbildet. Das Simulationsmodell arbeitet für die Untersuchung sequenziell die Auftragslisten der RBG ab und holt sich für die Teilaufträge die Freigaben vom Lastmanagement ein. Die beschriebenen Simulationsmodelle bilden ausschließlich den Energie- und Leistungsbedarf von RBG während der Fahrt bzw. dem Betrieb ab. Um zusätzlich den Energiebedarf der RBG in den Stillstandzeiten nachzubilden, werden die vorhandenen Simulationsmodelle um benötigte Steuerungsfunktionen erweitert, bspw. der Bremsen und der Auftragsabwicklung für mehrere RBG. Die Durchführung der Simulationsstudie erfolgt analog der VDI Richtlinie 3633 – Blatt 1 [VDI-3633b]. Die Vorgehensweise beschreibt schrittweise die zielgerichtete Erstellung und Durchführung einer Simulationsstudie. Die Phasen dabei sind:

- Aufgabendefinition
- Systemanalyse
- Datenbeschaffung
- Modellformalisierung
- Datenaufbereitung
- Implementierung
- Experimente und die Analyse

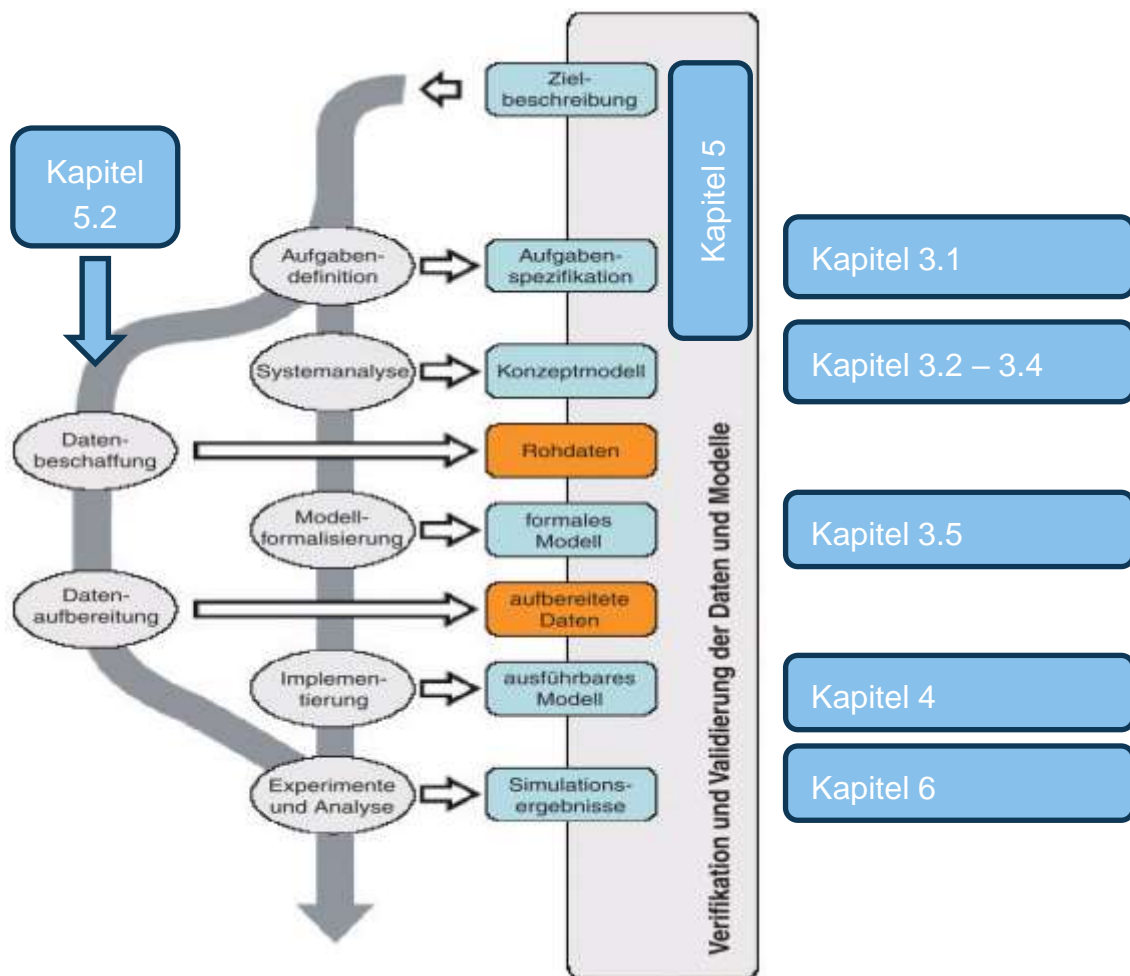


Abbildung 2-27: Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie [VDI-3633]

Wie in Abbildung 2-27 dargestellt, wird ein großer Teil der Phasen nacheinander durchlaufen. Die Datenbeschaffung und -analyse können parallel zu den anderen Phasen verlaufen. Die rechteckigen Kästen repräsentieren die jeweiligen Phasenergebnisse, welche, wie abgebildet, permanent verifiziert und validiert werden.

Die Vorgehensweise für die Simulationsstudie in der vorliegenden Dissertation ist wie folgt: Die „Aufgabendefinition“, die „Systemanalyse“ und die „Modellformalisierung“

werden im Kapitel „Systemanalyse und Planung des Simulationsmodells“ beschrieben. Zur Beantwortung der 2. Forschungsfrage wird vorerst eine Systemanalyse nach einem Top-Down-Ansatz durchgeführt, bei dem das System vom Ganzen ausgehend durch wiederholende Differenzierung immer weiter detailliert wird. Anschließend werden die Systemkomponenten auf das Wesentliche abstrahiert, um die ausschließlich für die Untersuchung relevanten Funktionen, Komponenten und Prozesse abzubilden. Anhand der „Modellierungsmethode auf der Basis des Strukturierungsmodells der Fabrik“ [VDI-3633b, S. 25] wird das Konzept für das Simulationsmodell erstellt. Abschließend werden für die Systemanalyse und die Planung des Simulationsmodells die Ablaufstruktur definiert und Teile des Modells formalisiert.

Im darauffolgenden Kapitel wird die „Implementierung des Simulationsmodells“ dargestellt. Hierbei wird beschrieben, wie die in Kapitel 3 beschriebenen Systemkomponenten und deren Funktionen in der Simulationsumgebung Matlab Simulink umgesetzt werden. Dem folgt die „Verifikation und Validierung“ des Simulationsmodells, das zusätzlich die Kalibrierung des Simulationsmodells beinhaltet. Bei der Verifizierung wird das Simulationsmodell auf die Richtigkeit des Programmcodes bzw. des Modells überprüft und ebenso, ob das Richtige abgebildet ist und die Untersuchung mit dem Modell durchgeführt werden kann. Die Simulationsumgebung überprüft das Simulationsmodell auf syntaktische Fehler, und mit Hilfe von Debuggern wird ermittelt, ob die Teilmodelle die Funktionen richtig nachbilden. Während der Kalibrierung werden die Simulationsparameter der RBG anhand von Messdaten eingestellt. Die anschließende Validierung zeigt anhand von weiteren Messdaten, wie exakt das Simulationsmodell das reale System nachbildet. Hierbei werden die Simulationsergebnisse per Bottom-up-Ansatz komplett verglichen – von den einzelnen Teilmodellen bis zum gesamten Simulationsmodell mit Messwerten von realen Systemen.

Die Phase „Experimente und Analyse“ wird im Kapitel „Simulation und Ergebnisse“ beschrieben. Hier werden zur Beantwortung der 3. Forschungsfrage in einem ersten Schritt die Faktoren und die Wertebereiche für die Versuche ermittelt. Diese werden anschließend unter Verwendung von Screening-Versuchsplänen auf ihren Effekt auf die relative Durchsatzleistung bewertet. Die signifikanten Faktoren mit den größten Effekten auf das Ergebnis werden in der Hauptuntersuchung weiter untersucht. Mit diesen Faktoren wird ein vollfaktorieller Versuchsplan aufgestellt und simuliert. Die Ergebnisse der Hauptuntersuchung werden mittels Regressionsanalyse ausgewertet und grafisch aufbereitet. Zur Beantwortung der 4. Forschungsfrage werden anhand von schrittweisen Regressionsanalysen Regressionsgleichungen für die Berechnung der relativen Durchsatzleistung ermittelt.

Die „Datenbeschaffung“ und die „Datenaufbereitung“ verlaufen parallel und werden in den Phasen „Verifikation und Validierung des Simulationsmodells“ und „Simulation und Ergebnisse“ durchgeführt. In Kapitel „Verifikation und Validierung des Simulationsmodells“ werden die für die Simulation benötigten Systemlastdaten und technischen Daten sowie deren Ermittlung beschrieben. Diese teilen sich in Systemlastdaten, technische Daten und Messdaten auf. Im Kapitel „Simulation und Ergebnisse“ werden die erzeugten Simulationsdaten für die Simulationsexperimente dargestellt.

3 Systemanalyse und Konzipierung des Lastmanagements und des Simulationsmodells

3.1 Aufgabendefinition

In diesem Kapitel wird die Aufgabe der Simulationsstudie beschrieben und geklärt, welche Fragen mit Hilfe der Simulation beantwortet werden sollen.

Wie eingangs beschrieben, begrenzt das Lastmanagement die elektrische Leistungsspitze und die Lastgangspitze eines automatisierten Lagers. Hierfür verschiebt das Lastmanagement bei Bedarf Teilprozesse des Lagers. Diese Verschiebung wirkt sich auf die Materialflussleistung des Lagers aus. Da die Materialflussleistung eines Lagers für den Betreiber von großer Bedeutung ist, wird in dieser Dissertation die Auswirkung des Lastmanagements auf die Materialflussleistung ermittelt. Demnach beantwortet diese Arbeit die Frage: Wie beeinflussen die Begrenzungen der Leistungsspitze und der Lastgangspitze durch das Lastmanagement die Materialflussleistung eines automatisierten Lagers?

Die Untersuchung beschränkt sich auf automatisierte Lager mit mehreren parallel arbeitenden Regalbediengeräten. Damit diese Frage beantwortet werden kann, bildet das Simulationsmodell den Zusammenhang zwischen dem Energiebedarf und der Materialflussleistung von RBG nach. Zusätzlich wird die Funktion des Lastmanagements implementiert. Mit Hilfe des Simulationsmodells wird der Zusammenhang zwischen der Materialflussleistung und den Grenzen des Lastmanagements dargestellt. Hierfür werden diese in den Simulationsläufen variiert. Um herauszufinden, welchen Einfluss die Anzahl der parallelen RBG auf das Ergebnis hat, werden unterschiedliche Mengen von parallelen RBG und unterschiedliche RBG-Typen (AKL oder APL) untersucht. Zusätzlich wird der Einfluss der Geräteparameter wie die Achskopplungen und Dynamikparametersätze (Fahr- und Hubgeschwindigkeiten und -beschleunigungen) bestimmt. Neben den Geräteparametern wird der Einfluss der Eigenschaften der Auftragslisten wie die Lagerstrategien, ABC-Zonierung und chaotische Lagerung oder das Verhältnis zwischen Einlagerungen und Auslagerungen auf die Durchsatzleistung mit unterschiedlich generierten Auftragslisten ermittelt.

Aus den Anforderungen an die Untersuchung und die Ergebnisse wird das Simulationsmodell mit den Eingängen und Ausgängen definiert. Das Simulationsmodell bestimmt die Materialflussleistung und den Energie- und Leistungsbedarf in Abhängigkeit

von den Eingangsparametern. Das Simulationsmodell mit den Eingängen und Ausgängen ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Welche Informationen für die jeweiligen Eingangsparameter benötigt werden, wird in den folgenden Kapiteln geklärt.

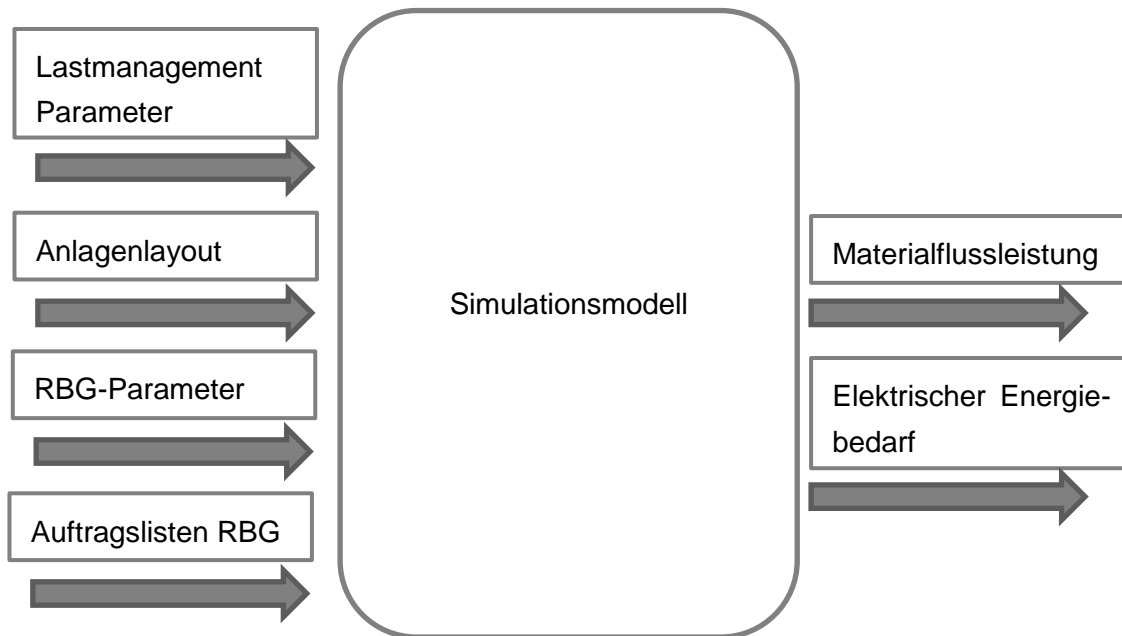


Abbildung 3-1: Simulationsmodell

Die Eingangsparameter für das Simulationsmodell sind:

- Parameter Lastmanagement
 - Grenze für die Leistungsspitze
 - Grenze für die Lastgangspitze
- Anlagenlayout
 - Anzahl paralleler RBG
 - RBG-Typen
- RBG-Parameter
 - Mit Zwischenkreiskopplung
 - Mit Energierückspeisung
 - Dynamikparametersätze
- Auftragslisten für die RBG
 - ABC-Zonierung
 - Chaotische Lagerung
 - Verhältnis zwischen Ein- und Auslagerungen
 - Zuladungen

Die Ausgangsparameter des Simulationsmodells sind:

- Materialflussleistung
 - Anzahl Einlagerungen
 - Anzahl Auslagerungen
- Elektrischer Energiebedarf

3.2 Systemanalyse

Die Systemanalyse dient dem Systemverständnis. Hierfür wird ein symbolisches, nicht experimentierbares Modell erstellt. In dieser Phase wird das System analysiert und abstrahiert. Dazu wird in dieser Arbeit ein Top-down-Ansatz verwendet. Dabei wird das System ausgehend vom Ganzen immer weiter detailliert und in seine Elemente aufgelöst.

Die Frage für die Systemanalyse ist: Welche Zusammenhänge gibt es zwischen der Materialflussleistung und der elektrische Energiebedarf eines automatischen Lagersystems?

Im ersten Schritt wird das System mit den Systemgrenzen und dem Austausch von Materie, Information, Geldmittel und Energie mit der Umwelt festgelegt. Das Lagersystem besteht, wie bereits in Kapitel 2.1.1 beschrieben, aus mehreren parallel arbeitenden RBG, deren Versorgung mit elektrischer Energie und pro RBG einer Quelle und einer Senke für LE. Die Systemgrenze ist zwischen den RBG und der Fördertechnik der Vorzone der RBG. Die Systemgrenze der Energieversorgung ist die Zuleitung des stationären Schaltschranks bzw. die Zuleitungen der stationären Schaltschränke, welche die RBG mit elektrischer Energie versorgen. Mit der Umwelt werden Lagereinheiten, elektrische Energie und Informationen in Form von Auftragslisten ausgetauscht. Das System ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

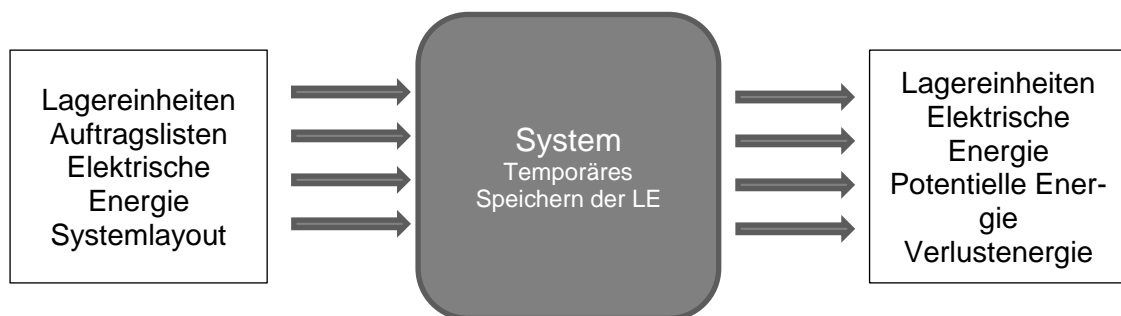


Abbildung 3-2: Systembeschreibung mit Ein- und Ausgabeparametern

Die Funktion des Systems ist das temporäre Speichern von LE, bis sie für die Weiterverarbeitung benötigt werden. Die für das Speichern (im Folgenden „Einlagern“ genannt) und Entnehmen (im Folgenden „Auslagern“ genannt) der LE benötigten Informationen werden in Form von Auftragslisten vom MFS bzw. LVS bereitgestellt. Neben den Informationen benötigt das System elektrische Energie zum Ein- und Auslagern der LE. Für das Einlagern nimmt das RBG die LE am Ein- und Auslagerplatz auf, transportiert diese zum Lagerfach und stellt sie dort ab. Eine Auslagerung ist der umgekehrte Prozess.

Nachfolgend werden die RBG-Auftragseinlastung, die RBG-Steuerungsfunktionen, die RBG-Energieversorgung und das Lastmanagement beschrieben. Mit der RBG-Auftragseinlastung wird die Verarbeitung der Auftragslisten untersucht. Die RBG-Steuerungsfunktionen beinhalten die Analyse, wie die Bewegungen der beiden Achsen durchgeführt werden sowie das Verhalten der mechanischen Bremsen. Der Absatz „RBG-Energieversorgung“ analysiert die Versorgung der Antriebe der RBG mit elektrischer Energie. Im Kapitel „Lastmanagement“ werden die Funktionsweise eines Lastmanagements untersucht und beschrieben.

3.2.1 RBG-Auftragseinlastung

Ein RBG erhält die Informationen über die durchzuführende Tätigkeit in Form von Aufträgen. In den untersuchten Systemen erhält ein RBG jeweils einen Auftrag vom Materialflusssystem (MFS), welches die Schnittstelle zwischen dem Lagerverwaltungssystem (LVS) und der Steuerungsebene bildet. Das MFS hat u. a. die Aufgaben, die Transporte im Lagerbereich zu koordinieren, die Aufträge in Teilaufträge zu unterteilen, die Auftragsbestände zu priorisieren und zu überwachen sowie die Wechselspiele der Ein- und Auslagerungen der RBG zu steuern [Gün-2013]. Das LVS verwaltet u. a. die Bestände des Lagers, bestimmt, abhängig von der Lagerstrategie, die Ein- und Auslagerplätze und terminiert und optimiert die Auftragseinlastung [Kre-2011]. Auf der Steuerungsebene werden die Aufträge vom MFS in Maschinenbefehle umgesetzt und die Motoren geregelt.

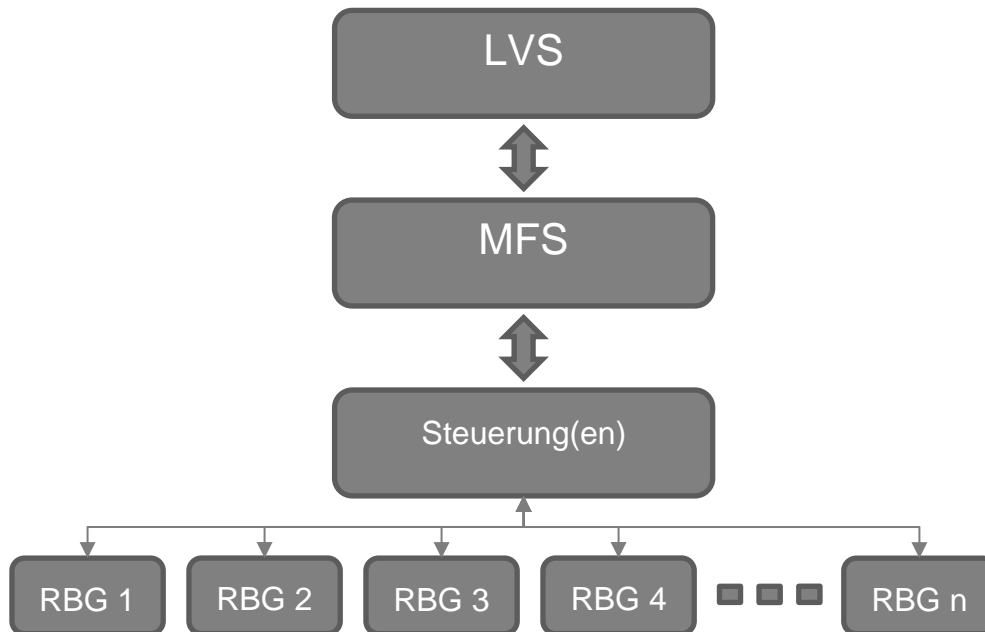


Abbildung 3-3: Übergeordnete Ebenen der RGB-Steuerung

Das MFS überträgt an die Steuerung der RBG die Anzahl an Aufträgen, die in einem Fahrzyklus abgearbeitet werden können. Eine Ausnahme sind Mehrfachzyklen an den Übergabepätzen, bei denen gleichzeitig LE vom RBG abgegeben und aufgenommen werden. In diesem Fall werden in den untersuchten Anlagen die Aufnahmefträge vor den Abgabefträgen gesendet. Ein Auftrag besteht aus den Informationen:

- LE-Identifikationsnummer
- Aufnahmeadresse
- Abgabeadresse
- RBG-Nummer
- LE-Größe
- Priorität
- Teilweise LE-Gewicht

Für die Simulation sind die Aufnahme- und die Abgabeadresse, die RBG-Nummer und das LE-Gewicht entscheidend. Das Gewicht der LE wird bei vielen Anlagen ausschließlich auf Überlast geprüft, weshalb diese Information nicht verlässlich ist und nicht übertragen wird.

Die Steuerung der RBG teilt Aufträge des MFS in die folgenden Teilaufträge:

- Fahren zur Aufnahmekoordinate der LE
- Aufnehmen der LE
- Fahren zur Abgabekoordinate der LE
- Abgeben der LE

Die Aufnahmekoordinate und die Abgabekoordinate können Regalfächer oder der Einlager- und/oder der Auslagerplatz sein.

3.2.2 RBG-Steuerungsfunktionen

Die Steuerungsebene des RBG beinhaltet u. a. zwei für die Simulation relevante Funktionen. Diese sind

- die Bahnplanung und
- die Bremsensteuerung.

Die Bahnplanung berechnet die Fahrkurven und Startzeitpunkte beider Achsen. Die Bremsensteuerung bildet das Verhalten der Bremsen nach. Diese Steuerungsfunktionen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Bahnplanung

Die Fahrt eines RBG besteht meist aus einer Kombination aus einer Bewegung in die X-Richtung (Fahrachse) und einer Bewegung in die Y-Richtung (Hubachse). Die Bahnplanung berechnet die Startzeitpunkte und die Fahrkurve für beide Achsen. Daraus ergibt sich die überlagerte Bewegung entlang der beiden Achsen. Selten ist der Zeitbedarf für beide Bewegungen gleich, wodurch die Bewegung der schnelleren Achse zeitlich verschoben werden kann, ohne den Zeitbedarf für die gesamte Fahrt zu erhöhen. Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, bremsen die Antriebe, indem sie mechanische in elektrische Energie umwandeln – eine sogenannte generatorische Bremsung. Bei einem RBG mit Zwischenkreiskopplung oder Rückspeiseeinheit kann mit einer intelligenten Verschiebung der Startzeiten der einzelnen Achse Energie eingespart werden. Die Fahrten werden in fahrzeit- und hubzeitkritisch unterschieden. Bei fahrzeitkritischen Fahrten benötigt das Fahrwerk mehr Zeit, um die Fahrstrecke zurückzulegen, als das Hubwerk für die Hubstrecke. Bei einer hubzeitkritischen Fahrt benötigt das Hubwerk mehr Zeit als das Fahrwerk. Die Regeln zur Verschiebung der Startzeitpunkte und Veränderung der Geschwindigkeiten werden Achssteuerungsstrategien genannt. In dieser Arbeit werden die folgenden zwei untersucht:

- Einfache Achssteuerung
- Erweiterte Achssteuerung

Einfache Achssteuerung

Die einfache Achssteuerung ist zur Energieeffizienzsteigerung bei RBG mit Zwischenkreiskopplung entwickelt worden. Bei dieser Strategie werden die folgenden Optimierungsfälle unterschieden:

1. Optimierungsfall: Fahrzeitkritische Hubfahrt
2. Optimierungsfall: Fahrzeitkritische Senkfahrt
3. Optimierungsfall: Hubzeitkritische Senkfahrt

Beim **1. Optimierungsfall** wird die Bremsenergie der Fahrachse für das Heben der Hubachse verwendet. Hierfür startet die Bewegung des Hubwerks zum spätestmöglichen Zeitpunkt. Dadurch wird weniger Energie für die Fahrt benötigt als bei einem gleichzeitigen Starten beider Achsen.

Beim **2. Optimierungsfall** wird die rekuperierte Energie des Hubwerks für die Beschleunigung des Fahrwerks verwendet. Beide Achsen starten hierfür zum gleichen Zeitpunkt.

Die Energieeffizienz beim **3. Optimierungsfall** wird durch ein verzögertes Starten des Fahrtriebs erhöht. Beim Senken der Hubachse müssen der Hubwagen und die zu beschleunigenden Komponenten vorerst beschleunigt werden. Auf Grund der Massenträgheit der Komponenten wird während der Beschleunigungsphase des HW nicht die maximale Leistung in den Zwischenkreis einspeist. Um für den energieintensiven Beschleunigungsvorgang des FW über die maximale Leistung des HW verfügen zu können, wird das FW zum spätestmöglichen Zeitpunkt gestartet.

Bei allen anderen Fahrten werden Fahr- und Hubachse gleichzeitig gestartet. Die Formalisierung der Optimierungsfälle der vereinfachten Achssteuerungen ist in Kapitel 3.5.1 dokumentiert.

Erweiterte Achssteuerung

Bei der erweiterten Achssteuerung werden die Steuerungsfunktionen des SEW-Applikationsmoduls „Energiespar-RBG“ verwendet [SEW-2012]. Dabei werden neben den Startzeitpunkten der einzelnen Achsen die Geschwindigkeiten beeinflusst, um Energie zu sparen. Laut Handbuch werden vier Optimierungsfälle unterschieden. Diese sind:

1. Optimierungsfall: Fahrwerkskritische Hubfahrt
2. Optimierungsfall: Fahrwerkskritische Senkfahrt
3. Optimierungsfall: Hubwerkskritische Hubfahrt
4. Optimierungsfall: Hubwerkskritische Senkfahrt

Beim **Optimierungsfall 1** handelt es sich um eine fahrzeitkritische Hubbewegung, welche dem 1. Optimierungsfall der einfachen Achssteuerung entspricht (Abbildung 3-4). Dabei wird das Heben zum spätesten Zeitpunkt ausgeführt – ohne einen Zeitverlust der kombinierten Bewegung der X- und Y-Achsen (Abbildung 3-4).

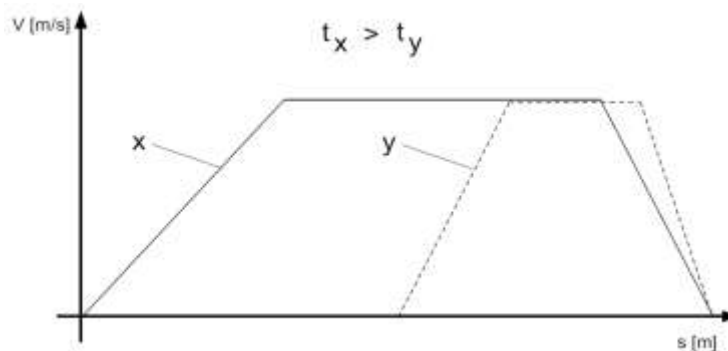


Abbildung 3-4: Geschwindigkeitsverläufe der X- und Y-Achse für den Optimierungsfall 1 [SEW-2012, S. 12]

Beim **Optimierungsfall 2** handelt es sich um eine fahrzeitkritische Senkbewegung (Abbildung 3-5). Bei dieser Optimierung wird verhindert, dass HW und FW gleichzeitig Energie in den Zwischenkreis speisen. Diese Energie muss entweder bei einer Zwischenkreiskopplung im Bremswiderstand in Wärme umgewandelt oder bei einer Energierückspeisung mit Verlusten in Wechselstrom des Hausnetzes gewandelt werden. Gleichzeitig wird während der Beschleunigungs- und Konstantfahrtphase des FW konstant Energie vom HW in den Zwischenkreis und damit ins FW eingespeist. Diese Energie kann mit geringen Wirkungsgradverlusten vom Fahrwerk für die Fahrbewegung verwendet werden. Hierfür reduziert das Applikationsmodul die Senkgeschwindigkeit, sodass die Senkbewegung abgeschlossen ist, sobald die Verzögerung im Fahrwerk beginnt. Ein Beispiel der Geschwindigkeitsverläufe ist in Abbildung 3-5 dargestellt.

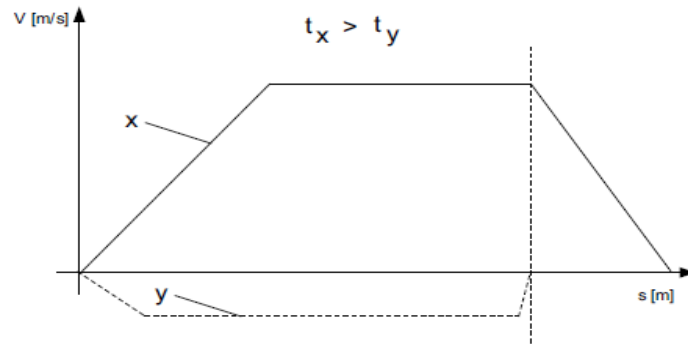


Abbildung 3-5: Geschwindigkeitsverläufe der X- und Y-Achse für den Optimierungsfall 2 [SEW-2012, S. 13]

Beim **Optimierungsfall 3** handelt es sich um eine hubzeitkritische Hubbewegung (Abbildung 3-6). Bei dieser Optimierung benötigt das HW für die Hubbewegung permanent Energie. Das FW benötigt bis auf die Verzögerungsphase auch Energie. Um den Energiebedarf des Fahrwerks zu reduzieren, wird die Fahrgeschwindigkeit reduziert. Hierdurch wird der Gesamtenergiebedarf verringert. Das Applikationsmodul reduziert in diesem Fall die Fahrgeschwindigkeit so weit, dass die Hub- und die Fahrbewegung den gleichen Zeitbedarf haben und gleichzeitig starten und anhalten.

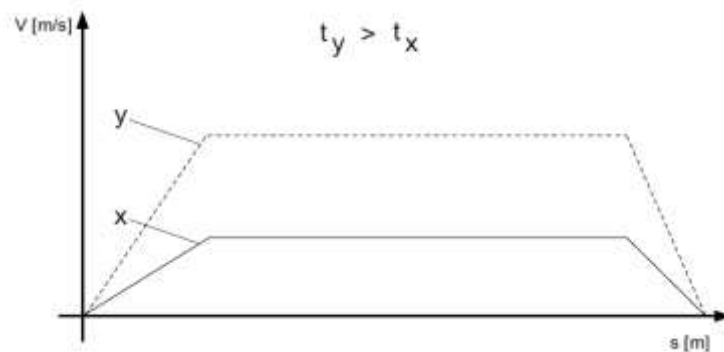


Abbildung 3-6: Geschwindigkeitsverläufe der X- und Y-Achse für den Optimierungsfall 3 [SEW-2012, S. 14]

Beim **Optimierungsfall 4** handelt es sich um eine hubzeitkritische Senkbewegung (Abbildung 3-7). Das Hubwerk speist während der Senkbewegung Energie in den Zwischenkreis ein. Das Fahrwerk benötigt für alle Phasen – bis auf die Verzögerungsphase – Energie. Durch die Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit entsteht beim Beschleunigen des FW eine kleinere Leistungsspitze. Zusätzlich wird die gesamte oder ein Teil der vom HW eingespeisten Energie vom Fahrwerk verwendet. Um das zeitgleiche Einspeisen von Energie durch den Verzögerungsvorgang des FW und das Senken des HW zu verhindern, muss die Fahrbewegung des FW abgeschlossen sein, bevor die Verzögerung des HW einsetzt. Die Geschwindigkeit der Fahrbewegung wird

vom Applikationsmodul so reduziert, dass die Fahrbewegung abgeschlossen ist, sobald bei der Senkbewegung die Verzögerungsphase beginnt.

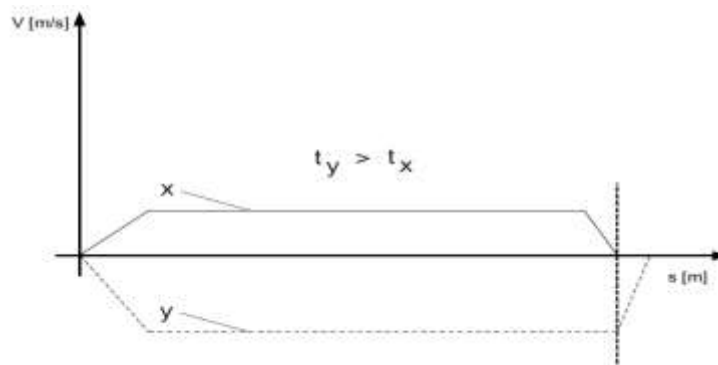


Abbildung 3-7: Geschwindigkeitsverläufe der X- und Y-Achse im Optimierungsfall 4 [SEW-2012, S. 15]

Die Berechnungen zu den Optimierungsfällen werden in Kapitel 3.5.2 beschrieben.

Bremsensteuerung

Das RBG verfügt in der Fahr- und der Hubachse jeweils über eine mechanische Bremse. Damit werden die Achsen arretiert oder im Notfall abgebremst. Die Bremsen müssen aktiv geöffnet werden. Bei einem Stromausfall oder einer Notabschaltung fallen sie sofort ein.

Der elektrische Energiebedarf für das Entlüften und Halten der Bremsen ist konstant und verhältnismäßig klein. Für die Simulation ist der Bremszustand dennoch von Bedeutung, da die Antriebe bei geöffneter Bremse grundmagnetisiert werden. Bei der Hubachse hält bzw. regelt der Hubantrieb die Position des Hubwagens. Das hierfür benötigte Antriebsmoment erhöht den Strombedarf des Antriebs, was zu einer erhöhten Verlustleistung des RBG führt.

Die Bremsen sind ereignisgesteuert und können im Zustand „Offen“ oder „Geschlossen“ sein. Sie öffnen und schließen abhängig von den vorliegenden Fahraufträgen. Wenn die Bremse geschlossen ist, öffnet sie, sobald ein neuer Fahrbefehl vorliegt. Nachdem die Fahrt absolviert ist, schließt die Bremse nach einer in der Steuerung definierten Wartezeit. Bei der einfachen Achssteuerung öffnet und schließt die jeweilige Bremse abhängig von den Fahrbefehlen für diese Achse. Bei der erweiterten Achssteuerung öffnen und schließen beide Bremsen unabhängig von der Bewegungsachse bei jeder Fahrt. Die Hubwerksbremse ist, unabhängig von der Achssteuerung, während des LAM-Zyklus geöffnet.

3.2.3 RBG-Energieversorgung

In diesem Kapitel wird die Energieversorgung von RBG dargestellt. Ein RBG wird normalerweise von einem stationären Schaltschrank mit elektrischer Energie versorgt (Abbildung 3-8). Ein stationärer Schaltschrank versorgt mehrere RBG (RBG1, RBG2, RBGx) mit elektrischer Energie. Vom Schaltschrank wird die elektrische Energie mittels Leitungen bzw. Schleifleitungen an den mitfahrenden Schaltschrank des RBG übertragen.

Im mitfahrenden Schaltschrank wird die Energie an die Umrichter der Fahr- und Hubachse und des LAM verteilt. Die Umrichter versorgen die Motoren (M) mit elektrischer Energie, welche diese in mechanische Energie wandeln. Die Motoren treiben meistens ein Getriebe (G) an. Der Abtrieb des Fahrwerkgetriebes treibt eine Zahnriemenscheibe bei einem Riementrieb, ein Laufrad (LR) bei einem Reibradantrieb und ein Zahnrad bei einem Zahnstangenantrieb an. Hiermit wird jeweils der Vortrieb entlang der Fahrachse erzeugt. Der Abtrieb des Hubwerkgetriebes treibt eine Zahnriemenscheibe bei einem Hubriementrieb (HR) und eine Seiltrommel bei einem Seiltrieb an. Dadurch wird die Hubbewegung erzeugt. Die Seiltriebe für die Hubbewegung sind teilweise übersetzt, was im Simulationsmodell berücksichtigt wird.

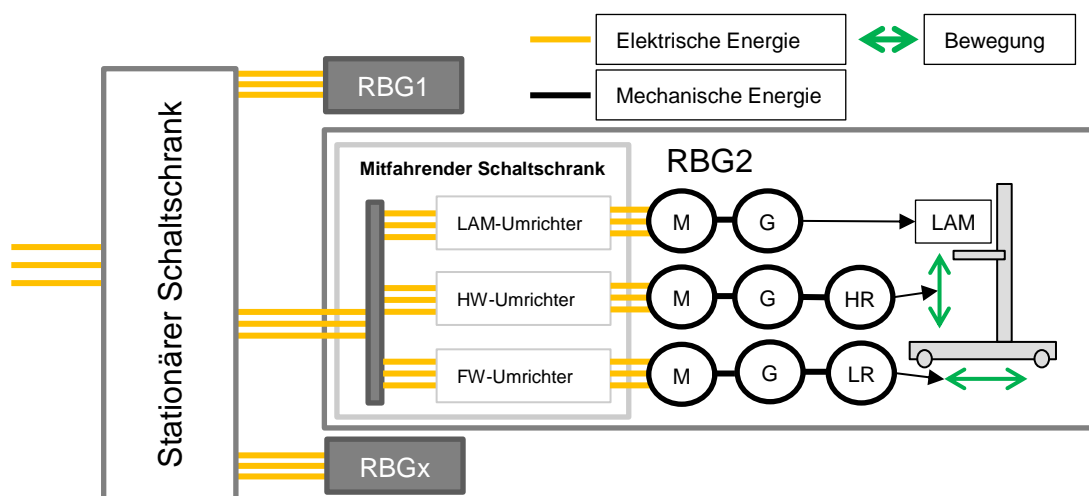


Abbildung 3-8: Energieversorgung RBG

Stationärer Schaltschrank

Im stationären Schaltschrank sind bei den untersuchten Anlagen ein Industrie-PC mit grafischer Bedienoberfläche zur RBG-Steuerung sowie Komponenten für die Steuerung und für die Stromversorgung der RBG verbaut. Teilweise sind Leistungsmessgeräte zur Messung des Energiebedarfs des stationären Schaltschranks verbaut. Von Interesse sind für diese Simulationsstudie die Energieverbräuche der Komponenten im stationären Schaltschrank und die Stromversorgung der RBG. Für die Validierung

sind die Auftragslisten und die Messwerte der Leistungsmessgeräte relevant. Die Energieverbräuche der Komponenten im stationären Schaltschrank sind im Verhältnis zu den Verbräuchen der RBG um ein Vielfaches kleiner. Aus diesem Grund sind diese Verbräuche in der Studie konstant. Die RBG werden über eine Parallelschaltung versorgt. Jede Versorgung ist abgesichert und mit einem Trennschalter versehen. Die Anzahl an RBG, die von einem stationären Schaltschrank mit Energie versorgt wird, ist abhängig vom maximalen Leistungsbedarf der RBG. Bei den untersuchten Anlagen werden bis zu fünf RBG mit einem stationären Schaltschrank versorgt.

Mitfahrender Schaltschrank

Von den stationären Schaltschränken wird die elektrische Energie über Leitungen zu den RBG geleitet und dort im mitfahrenden Schaltschrank an die Verbraucher verteilt. Die Verbraucher sind Umrichter für die Antriebe des RBG, Sicherheitskomponenten, Signalübertragungskomponenten, Signalverarbeitungskomponenten und Bedienungskomponenten. Für die Energiebedarfsberechnung der RBG liegt der Fokus auf den Umrichtern und den angeschlossenen Antrieben. Die heutigen Umrichter übernehmen zentrale Funktionen von RBG. Diese sind:

- Sicherheits- und Überwachungsfunktionen
- Signalverarbeitung
- Energieversorgung der Antriebe
- Datenverarbeitung
- Berechnung des Bewegungsprofils
- Regelung der Antriebe
- Steuerung der Feststellbremsen der Antriebsachsen

Zur Berechnung des Energiebedarfs sind das Bewegungsprofil, die Energieversorgung der Antriebe und die Steuerung der Feststellbremsen der Antriebsachsen relevant. Die Berechnung des Bewegungsprofils ist im Simulationsmodell von *Ertl* [Ert-2016] implementiert.

Antriebskonfigurationen und LAM Energiebedarf

Als Antriebskonfiguration wird der unterschiedliche elektrische Aufbau der Energieversorgung der Motoren für die Fahr- und die Hubachse bezeichnet. Diese sind in Kapitel 2.1.2 dargestellt.

Das Aufnehmen und Abgeben der LE aus dem bzw. in das Regal erfolgt durch das LAM. Der Vorgang wird Lastzyklus genannt. Auf dessen Komponenten und Funktionen wird hier nicht weiter eingegangen. Für die Berechnung des Energiebedarfs beim Lastzyklus ist es wichtig, dass neben den LAM-Antrieben zusätzlich der Hubantrieb verwendet wird. Der Hubantrieb regelt die Lage des Hubwagens und hebt und senkt ihn während des Anhebens und Absetzens der LE im Regalfach. Bei einer Bewegung des Hubwagens wird mechanische und elektrische Energie benötigt. Bei der Lageregelung wird ausschließlich elektrische Energie benötigt. Deren Berechnung wird in Kapitel 3.5.4 beschrieben.

3.2.4 Lastmanagement

Dieser Abschnitt widmet sich der Funktionsweise des untersuchten Lastmanagements. Das Lastmanagement begrenzt die elektrische Leistungsspitze und den Leistungsmittelwert des gesamten automatischen Lagers. Hierfür werden die Grenzwerte „Leistungsgrenze“ für die Leistungsspitze und „Lastganggrenze“ für den Leistungsmittelwert eingestellt. Die Leistungsgrenze begrenzt den maximalen elektrischen Wirkleistungsbedarf des Lagersystems. Die Lastganggrenze begrenzt den Leistungsmittelwert und somit den mittleren Wirkleistungsbedarf in der Messperiode (hier 15 Minuten). Um diese Grenzen einzuhalten, verzögert das Lastmanagement die Teilaufträge der RBG. In Abbildung 3-9 ist der Leistungsbedarf des Lagersystems ohne den Einsatz des Lastmanagements zu sehen. Die Leistungsspitze des Leistungsbedarfs des Lagersystems liegt ohne Lastmanagement bei ca. 155 kW. Der Leistungsbedarf des Teilauftrags des RBG3 überlagert sich mit der Leistungsvoraussage des Lagersystems zu dessen Leistungsbedarf. In Abbildung 3-10 ist der Leistungsbedarf des Lagersystems mit dem verzögertem Teilauftrag RBG3 dargestellt. Das Lastmanagement hat den Teilauftrag verzögert, um die Leistungsgrenze einzuhalten. Das Lastmanagement reduziert in diesem Beispiel den maximalen Leistungsbedarf der Anlage um 20 %.

Leistungsbedarf des Lagersystems ohne Lastmanagement

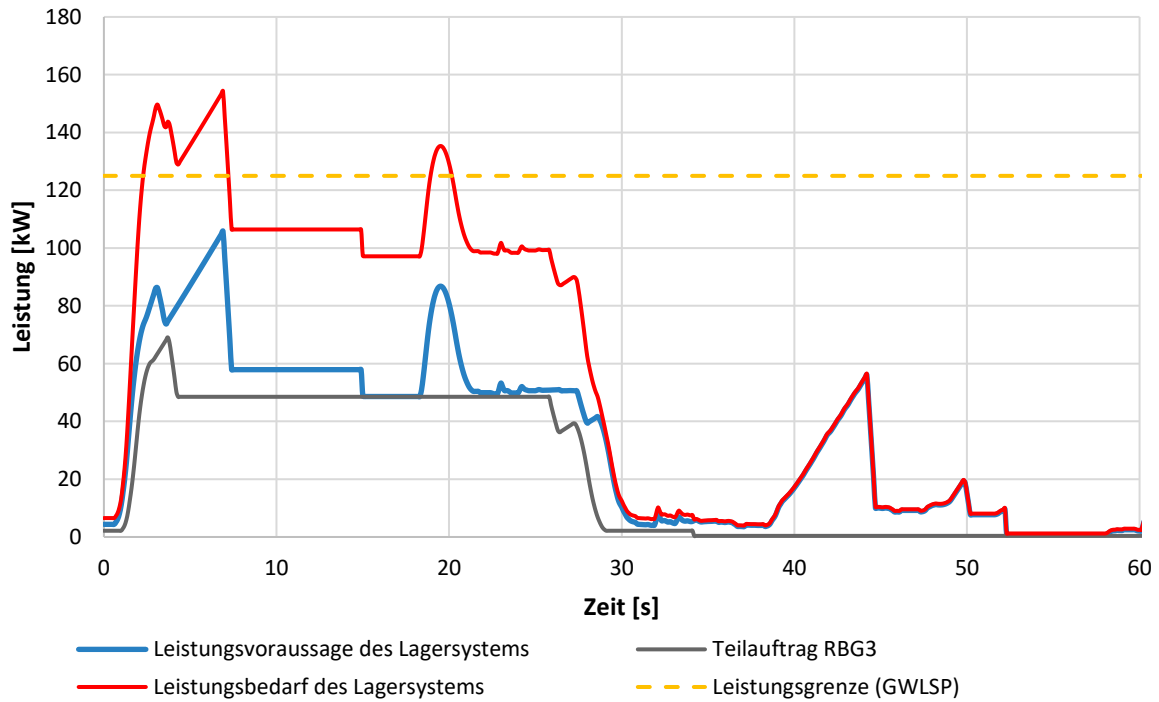


Abbildung 3-9: Leistungsbedarf ohne Lastmanagement

Leistungsbedarf des Lagersystems mit Lastmanagement

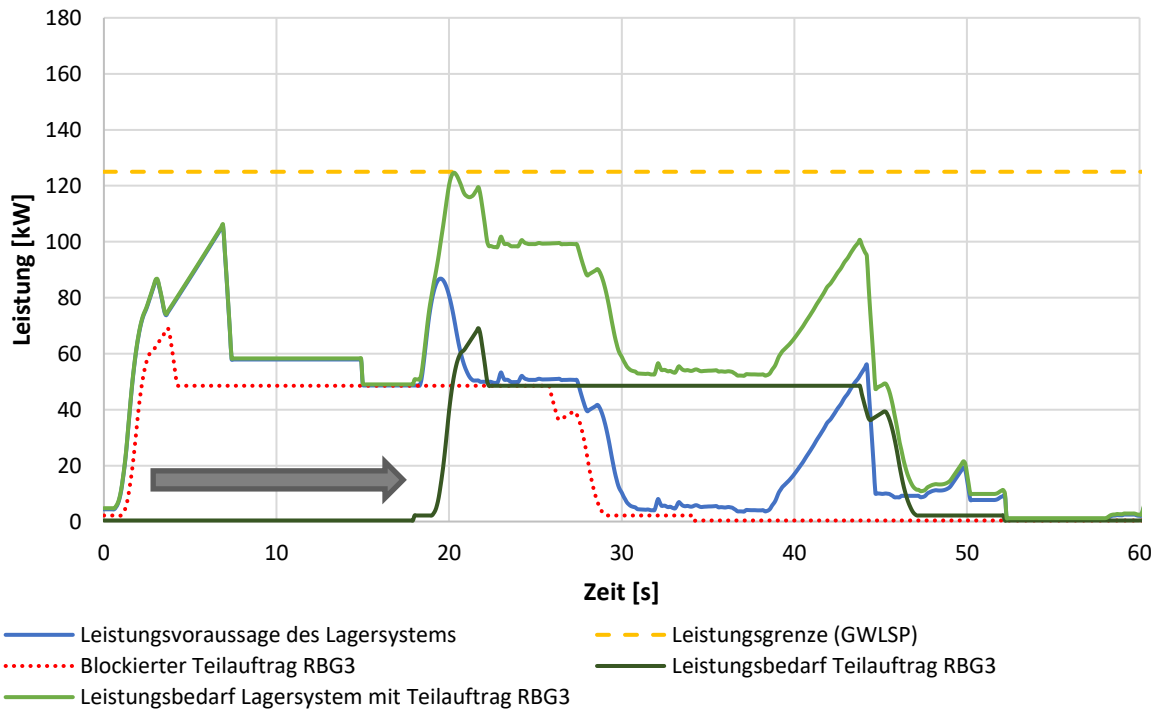


Abbildung 3-10: Leistungsbedarf mit Lastmanagement

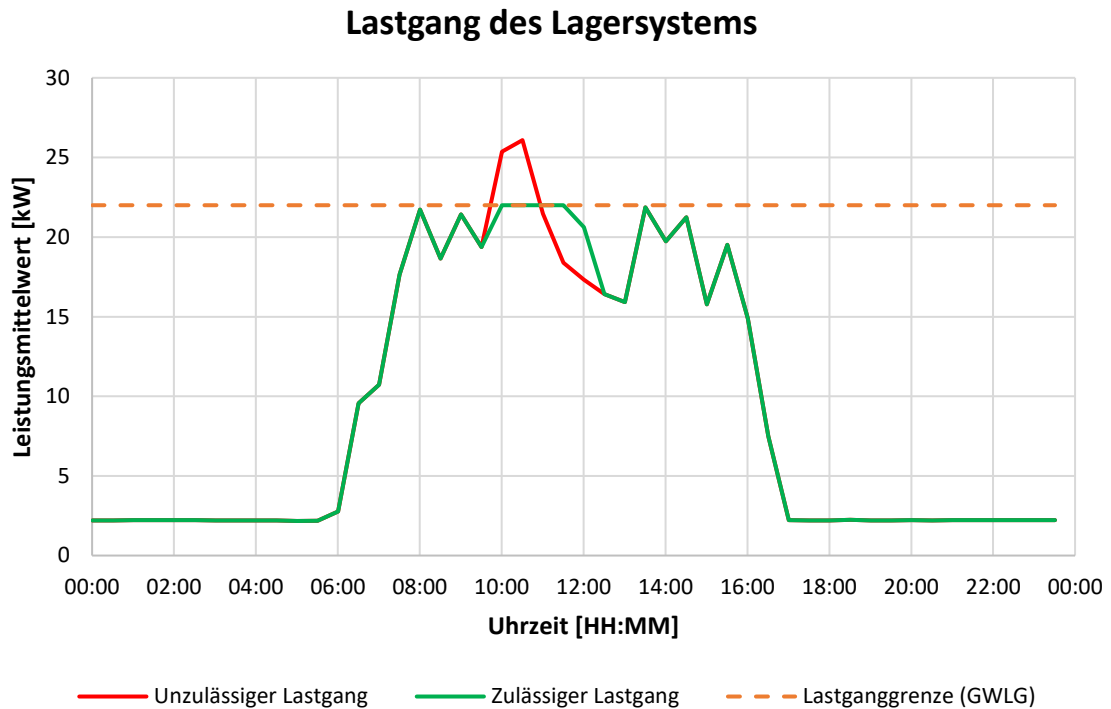


Abbildung 3-11: Lastgang des Lagersystems mit Eingriff des Lastmanagements

In Abbildung 3-11 ist der Lastgang eines Lagersystems dargestellt. Zwischen 10 und 12 Uhr ist eine Lastgangspitze zu sehen. Nach dieser Lastgangspitze senkt sich der Lastgang ab, um anschließend wieder anzusteigen. Die Lastgangspitze liegt ohne das Lastmanagement bei ca. 26 kW. Wird das Lastmanagement aktiviert und eine Grenze eingestellt, begrenzt das Lastmanagement die mittlere Leistungsaufnahme auf die Lastganggrenze, indem es die Teilaufträge verzögert, sobald die Lastganggrenze für diese Messperiode erreicht wird. In Abbildung 3-11 wird dies durch die grünen Linie dargestellt. Die Lastganggrenze beträgt in diesem Fall 22 kW. Da diese zwischen 10 Uhr und 10:30 Uhr verletzt wird, werden Teilaufträge der RBG verzögert und zu einem späteren Zeitpunkt ausgeführt. Die Leistungsmittelwerte von 11 Uhr bis 11:30 Uhr erhöhen sich, da Teilaufträge verzögert wurden und damit mehr Teilaufträge zu einem späteren Zeitpunkt abgearbeitet werden.

Das Lastmanagement ist eine zentrale Freigabeeinheit. Jedes RBG muss bei dieser vor der Ausführung eines jeden Teilauftrags die Freigabe erfragen. Hierfür sendet das RBG eine Freigabeanfrage mit dem vorberechneten zeitlichen Verlauf des Energiebedarfs an das Lastmanagement. Das Lastmanagement prüft mit dem vorberechneten Energiebedarf, ob die Ausführung dieses Auftrags eine der Grenzen verletzt. Bei einer Überschreitung gibt das Lastmanagement den Teilauftrag nicht frei, und die Prüfung wird für den nächsten Zeitschritt wiederholt. Sobald keine der Grenzen verletzt wird, gibt das Lastmanagement den Teilauftrag frei, und das RBG führt den freigegebenen

Teilauftrag aus. Für die Prüfung der Freigabe wird der Leistungsbedarf aller bereits freigegebenen Teilaufträge benötigt.

3.3 Konzeptmodell

In diesem Kapitel wird das Konzeptmodell für das Simulationsvorhaben bzw. das Simulationsmodell erarbeitet. Nach [VDI-3633b] wird der Aufbau in Anlehnung an das Strukturierungsmodell einer Fabrik mit den folgenden Ebenen beschrieben:

- Administration
- Disposition
- Steuerung
- Operation

Das Strukturierungsmodell einer Fabrik ist in Abbildung 3-12 abgebildet.

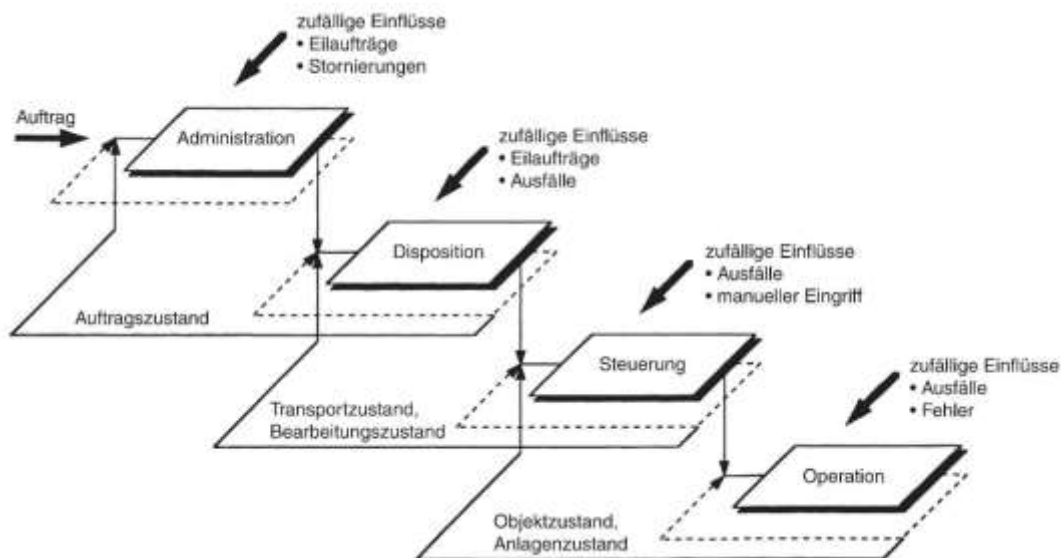


Abbildung 3-12: Strukturierungsmodell der Fabrik [VDI-3633b]

Auf der **Administrationsebene** wird die Systemlast für das Simulationsmodell erzeugt, das System eingestellt sowie Daten, Energie und Materie mit der Systemumwelt ausgetauscht. Zusätzlich werden die Simulationsdaten verdichtet und analysiert.

Die **Dispositionsebene** beinhaltet die Auftragsverwaltung und -abarbeitung. Hier werden Optimierungen vorgenommen, die Zustandsinformationen der Geräte und der Fortschritt bei der Abarbeitung der Auftragsliste gesammelt und die Materialflussdaten

berechnet. Zusätzlich findet auf dieser Ebene die Kommunikation mit dem Lastmanagement statt, außerdem wird die Materialflussleistung berechnet.

Auf der **Steuerungsebene** werden die maschineninternen Steuerungen umgesetzt, die Maschinenzustände verwaltet sowie der Fortschritt bei der Bearbeitung der Teilaufträge gesammelt. Des Weiteren werden die Informationen zum Energiebedarf des RBG selektiert und verdichtet.

Auf der **Operationsebene** befinden sich die Bausteine zur Abbildung des Maschinenverhaltens und des Energiebedarfs. Hier werden alle notwendigen Systemzustände berechnet und an die übergeordnete Ebene weitergeleitet.

In den folgenden Kapiteln werden die Ebenen des Simulationsmodells definiert und die beinhalteten Elemente beschrieben.

3.3.1 Administrationsebene des Simulationsmodells

Die Administrationsebene ist die oberste Ebene des Simulationsmodells. Hier werden die Daten mit der Systemumwelt ausgetauscht. Diese sind (siehe Abbildung 3-1):

- Eingangsparemeter:
 - Lastmanagement-Parameter
 - Anlagenlayout
 - RBG-Parameter
 - Auftragslisten für die RBG
- Ausgangsparemeter:
 - Materialflussleistung
 - Elektrischer Energiebedarf

Wie in Abbildung 3-13 dargestellt, befinden sich auf der Administrationsebene des Simulationsmodells die RBG-Gassen-Modelle, das Lastmanagement-Modell und das Modell des stationären Schaltschrank. Jeder dargestellte und beschriebene Energiebedarf gliedert sich in den zeitlichen Verlauf des elektrischen Energiebedarfs und der elektrischen Wirkleistung.

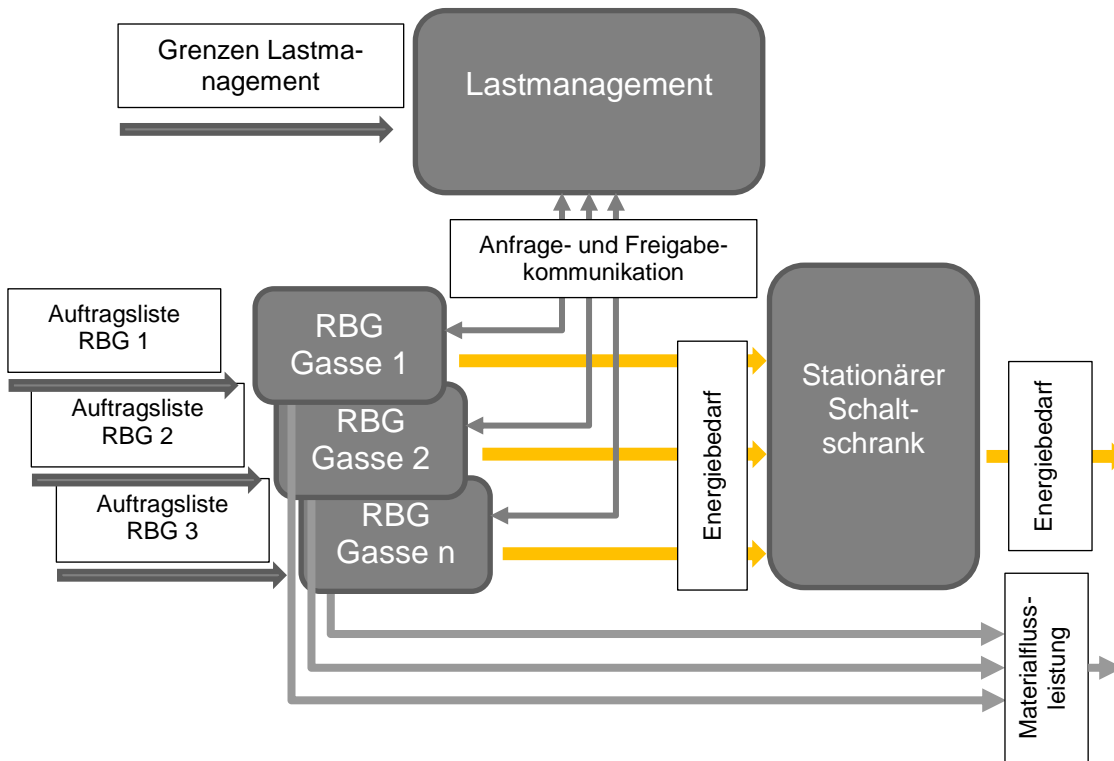


Abbildung 3-13: Systemkomponenten administrative Ebene

Die **RBG-Gassen-Modelle (RBG Gasse n)** benötigen als Eingänge die Auftragslisten und die Freigabekommunikation vom Lastmanagement. Die RBG-Parameter sind größtenteils technische Daten und werden deswegen in der Abbildung nicht dargestellt. Die Auftragslisten beinhalten die Information, welcher Teilauftrag zu welchem Zeitpunkt vom RBG ausgeführt wird. Als Ausgänge hat ein RBG-Gassen-Modell die Anfragekommunikation, den Energiebedarf und die Informationen zur Materialflussleistung. Das RBG-Gassen-Modell hat die Aufgabe, für die zugeordnete Auftragsliste mit den eingestellten RBG-Parametern den Energiebedarf und die Materialflussleistung zu berechnen. Vor der Ausführung fragt das RBG für jeden Teilauftrag die Freigabe an und führt diesen nach der Freigabe aus.

Die Eingänge des **Lastmanagement-Modells** sind die Grenzen für das Lastmanagement und die Anfragekommunikation von allen RBG-Gassen-Modellen. Der Ausgang ist die Freigabekommunikation zu den RBG-Gassen-Modellen. Die Anfragekommunikation beinhaltet die Informationen, dass eine Anfrage vorhanden ist, sowie den zeitli-

chen Verlauf des Energiebedarfs für den angefragten Teilauftrag. Die Freigabekommunikation beinhaltet die Freigabe. Das Lastmanagement-Modell prüft den angefragten Teilauftrag und gibt diesen bei Einhaltung der Grenzen frei.

Das **Modell des stationären Schaltschranks** hat einen Energiebedarfseingang je RBG-Gassen-Modell und einen Energiebedarfsausgang. Das Modell fasst die Energiebedarfe der RBG zusammen und bildet den eingestellten, zusätzlichen Energiebedarf des Schaltschranks mit dessen Inhalt ab.

3.3.2 Dispositionsebene

Auf der Dispositionsebene des Simulationsmodells befinden sich die Auftragssteuerung der RBG und das RBG-Modell. Jedes RBG-Modell hat eine Auftragssteuerung. Die Dispositionsebene einer RBG ist in der Abbildung 3-14 abgebildet.

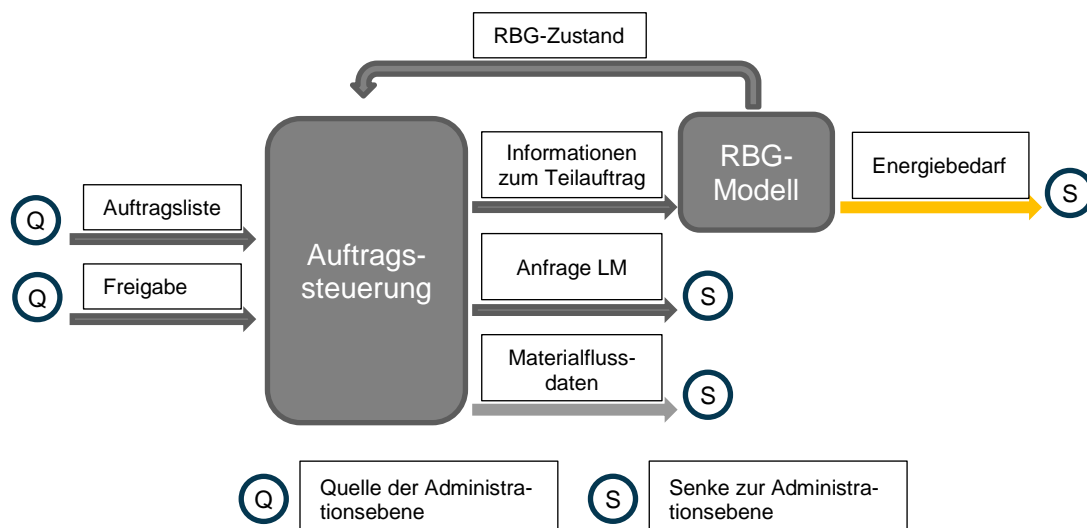


Abbildung 3-14: Systemkomponenten und Informationsfluss Dispositionsebene

Auftragssteuerung

Die Auftragssteuerung bearbeitet die Teilaufträge sequenziell, erstellt und sendet Freigabeanfragen und verarbeitet die Freigaben. Die Eingänge der Auftragssteuerung sind die Auftragsliste, die Freigabe des Lastmanagements und der RBG-Zustand (siehe Abbildung 3-15).

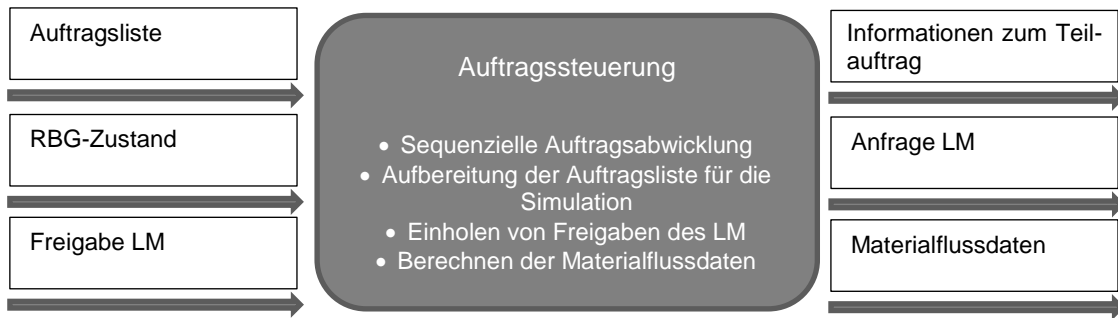


Abbildung 3-15: Auftragssteuerungselement RBG

Die Ausgänge der Auftragssteuerung sind die Informationen zum Teilauftrag, die Anfrage an das Lastmanagement mit der Energievoraussage und die Materialflussdaten.

Das **Auftragssteuerungselement** liest sequenziell die Teilaufträge aus der Auftragsliste und bereitet diese für die Simulation auf. Dabei liest sie den Teilauftrag aus der Auftragsliste, berechnet bei Fahraufträgen die Fahrstrecken pro Achse, berechnet für den Teilauftrag eine Energievoraussage mit den RBG-Zustandsinformationen und sendet eine Anfrage auf Freigabe an die „Anfrage LM“-Ausgänge. Nach Freigabe des Teilauftrags werden die Informationen zum Teilauftrag an die Ausgänge für die Simulation gesendet. Daraufhin wartet die Auftragsabwicklung, bis der Teilauftrag vom RBG-Modell als abgeschlossen gemeldet ist. Anschließend liest die Auftragsliste den nächsten Teilauftrag aus der Auftragsliste ein und bearbeitet diesen. Die Materialflussdaten werden aktualisiert, sobald eine Ein- oder Auslagerung abgeschlossen wurde.

3.3.3 Steuerungsebene

Die Steuerungsebene beinhaltet die internen Steuerungsfunktionen der RBG-Modelle. Diese sind wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben die Bremsensteuerung und die Bahnplanung. Die Systemkomponenten der Steuerungsebene und die Informationsflüsse sind in Abbildung 3-16 dargestellt.

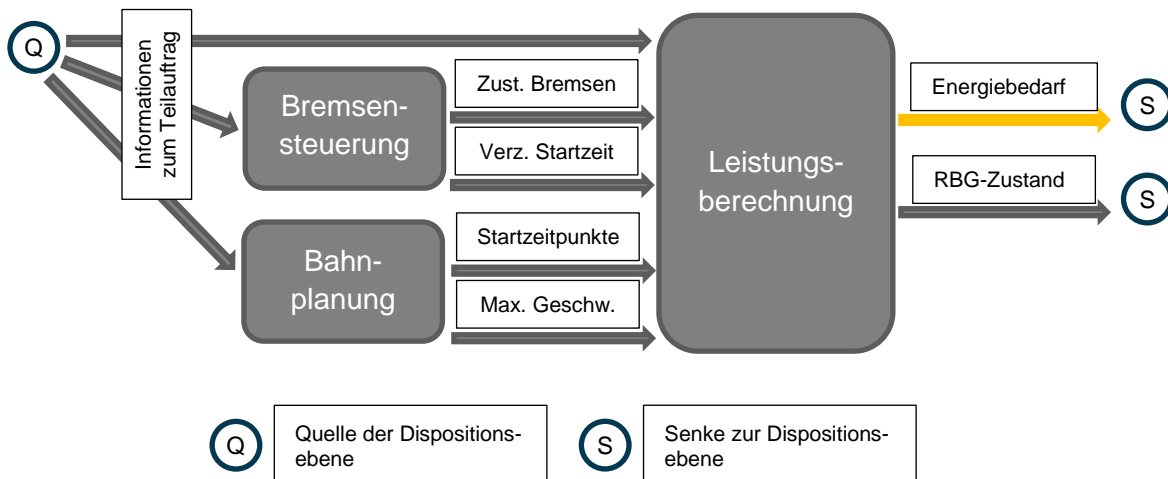


Abbildung 3-16: Systemkomponenten der Steuerungsebene

Bremssteuerung

Die Bremsensteuerung bildet das Verhalten der Bremsen ab. Die Eingänge der Bremsensteuerung sind die Informationen zum Teilauftrag und die Achssteuerungsstrategie als RBG-Parameter. Die Ausgänge sind die Zustände der Bremsen von FW und HW und die Verzögerung der Startzeit von FW und HW.

Die Bremsensteuerung berechnet abhängig von der Achssteuerungsstrategie und der Information über den Teilauftrag die eventuelle Startzeitverzögerung. Basis dafür ist der Zeitbedarf für das Öffnen der Bremse für beide Achsen. Die Bremsensteuerung gibt die aktuellen Zustände der beiden Bremsen wieder.

Bahnplanung

Die Eingänge der Bahnplanung sind die RBG-Parameter (nicht dargestellt), die Achssteuerungsstrategie und die Dynamikparameter für das Fahr- und Hubwerk sowie die Informationen zum Teilauftrag. Die Ausgänge sind die Startzeitpunkte für Fahr- und Hubwerk und die maximalen Geschwindigkeiten für beide Achsen. Die Bahnplanung berechnet abhängig von der Achssteuerungsstrategie die Startzeitpunkte und die maximalen Geschwindigkeiten für beide Achsen. Dabei werden die in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Strategien angewendet. Das Bahnplanungsmodell ist in Abbildung 3-17 dargestellt.

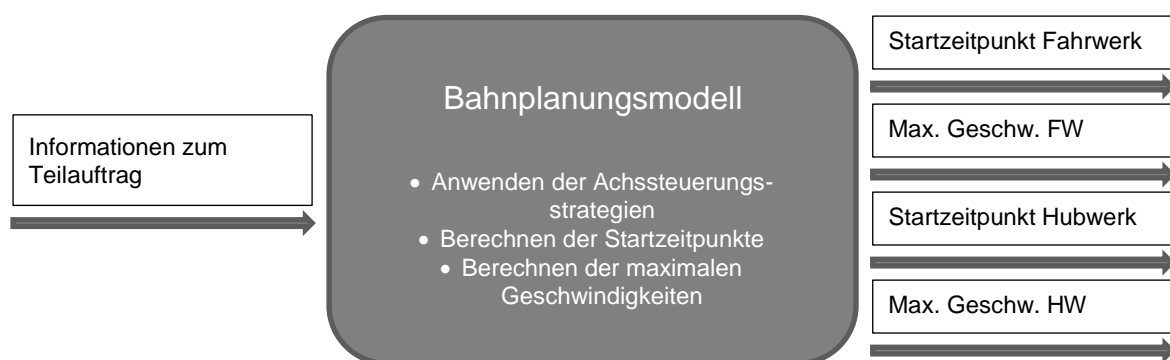


Abbildung 3-17: Bahnplanungsmodell RBG

3.3.4 Operationsebene

Auf der Operationsebene des Simulationsmodells befinden sich die Berechnungselemente für den Leistungs- und Energiebedarf des RBG. Diese sind:

- Mitfahrendes Schaltschrank-Modell mit Antriebskonfigurationen
- LAM-Leistungsbedarfsmodell
- Fahrwerk-Leistungsbedarfsmodell
- Hubwerk-Leistungsbedarfsmodell

Die Operationsebene ist in Abbildung 3-18 dargestellt.

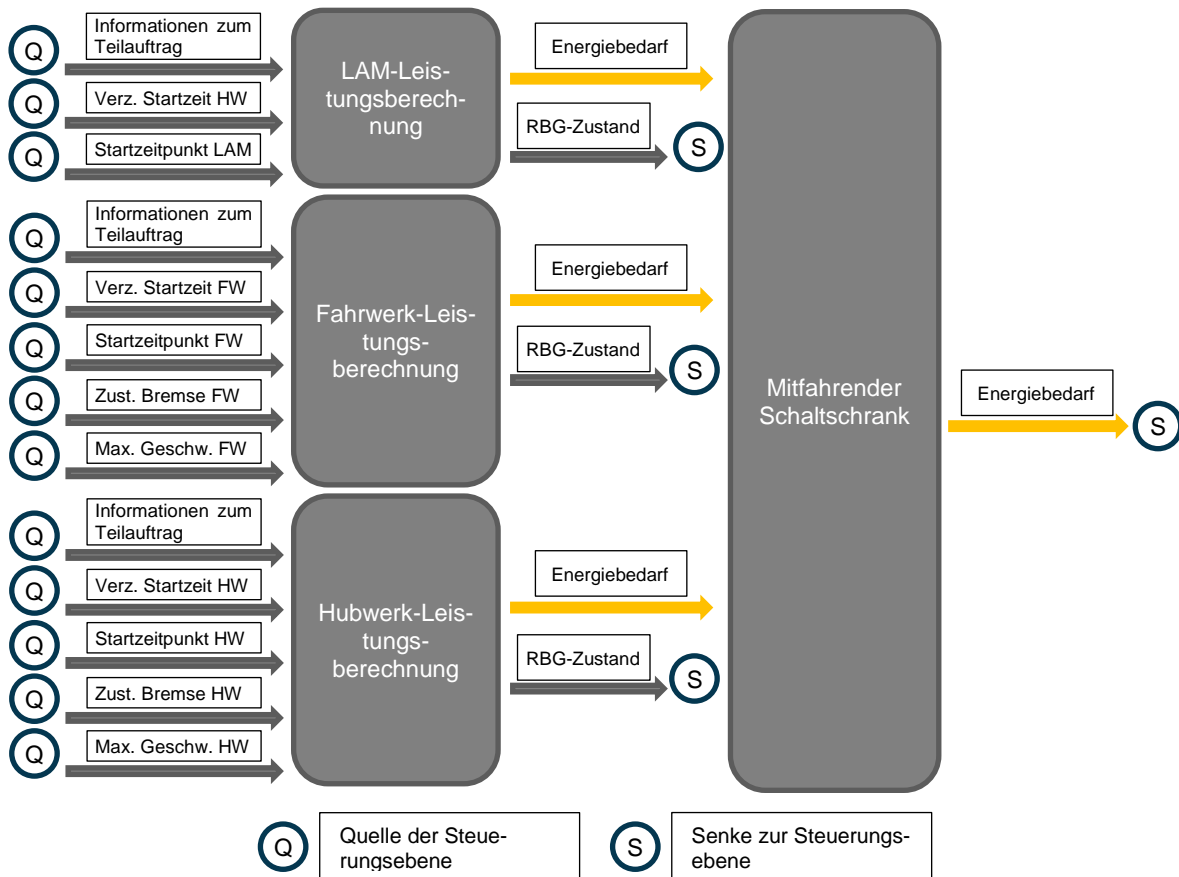


Abbildung 3-18: Systemkomponenten der Operationsebene

Das **mitfahrende Schaltschrank-Modell** hat als Eingänge die Leistungen der Achsen sowie des LAM und als Ausgänge den zeitlichen Verlauf des elektrischen Wirkleistungsbedarfs, den Energiebedarf und den Strombedarf. Die Aufgabe des mitfahrenden Schaltschrank-Modells ist es, die Leistungsbedarfe der Eingänge nach Regeln der Antriebskonfiguration zusammenzufassen und den Leistungsbedarf der im Schaltschrank verbauten elektrischen Komponenten zu addieren.

Das **LAM-Leistungsbedarfsmodell** hat die Eingänge Informationen zum Teilauftrag, Verzögerung der Startzeit des Hubwerks und Startzeitpunkt des LAM. Die Ausgänge

des Modells sind der LAM-Leistungsbedarf und der RBG-Zustand. Das LAM-Leistungsbedarfsmodell wählt den Leistungsbedarf für den aktuellen Lastwechsel aus einer hinterlegten Matrix aus und gibt diesen ab dem Startzeitpunkt des Lastwechsels wieder. Der aktuelle Lastwechsel ist dabei abhängig von der Auftragsart und der Tiefe auszuwählen.

Das **Fahrwerk-Leistungsbedarfsmodell** und das **Hubwerk-Leistungsbedarfsmodell** haben die gleichen Ein- und Ausgänge. Die Eingänge sind die Informationen zum Teilauftrag für die jeweilige Achse, die Verzögerung der Startzeit, der Startzeitpunkt der Achse, der Zustand der jeweiligen Bremse und die von der Steuerungsebene für diese Achse und Fahrt berechnete maximale Geschwindigkeit. Die Modelle haben als Ausgang alle Prozessdaten der Leistungsberechnung. Die für die übergeordneten Ebenen relevanten Prozessdaten sind der aktuelle Leistungsbedarf und die zum Zeitpunkt zurückgelegten Fahrstrecken der jeweiligen Achsen. Die Leistungsbedarfsmodelle berechnen für die Eingänge und die eingestellten Modellparameter den Leistungsbedarf sowie die aktuell zurückgelegten Fahrstrecken.

3.4 Ablaufstruktur des Simulationsmodells

Mit der Ablaufstruktur werden die externe Ablauflogik der Simulationsdurchführung und die interne Ablauflogik des Simulationsmodells beschrieben.

3.4.1 Externe Ablauflogik des Simulationsmodells

Die externe Ablauflogik beschreibt die schrittweise Vorgehensweise bei der Durchführung der Simulationen. Die externe Ablauflogik ist in die folgenden Phasen eingeteilt und in Abbildung 3-19 schematisch dargestellt:

1. Simulationsvorbereitung
2. Implementierung des Simulationsmodells
3. Durchführung der Simulation
4. Verarbeitung der Simulationsergebnisse

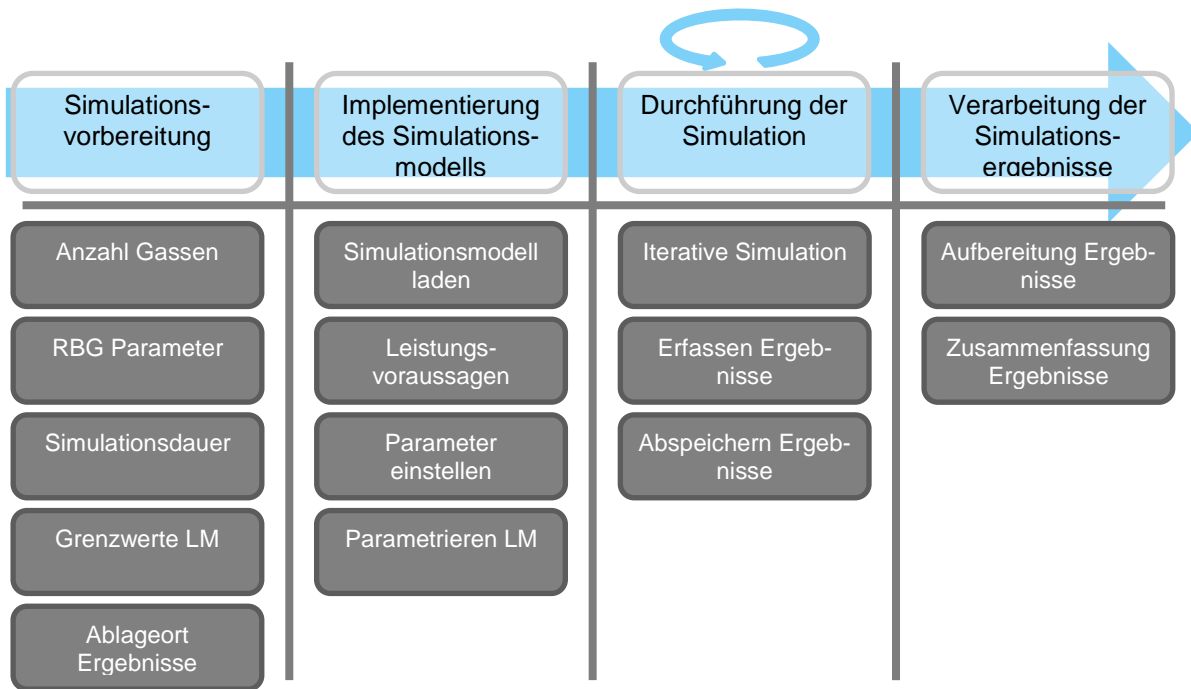


Abbildung 3-19: Externe Ablauflogik des Simulationsmodells

In der Phase **Simulationsvorbereitung** werden die Anzahl der Gassen und somit das Simulationsmodell, die RBG Parameter, die Auftragslisten, die Simulationsdauer, die Grenzwertwerte für das Lastmanagement und der Ablageort für die Simulationsergebnisse definiert.

Die **Implementierung des Simulationsmodells** beinhaltet das Laden des Simulationsmodells, die Vorausberechnung der Leistungsvoraussagen für die Lastwechsel und die Fahrvorgänge, das Einstellen der Parameter im Simulationsmodell und das Parametrieren des Lastmanagements.

In der Phase **Durchführung der Simulation** wird für jede eingestellte Lastmanagement-Grenze eine Simulation über die eingestellte Simulationsdauer durchgeführt. Die jeweiligen Simulationsergebnisse werden nach der Simulation erfasst und abgespeichert.

In der Phase **Verarbeitung der Simulationsergebnisse** werden die in der vorherigen Phase erfassten Simulationsergebnisse aufbereitet und zusammengefasst.

3.4.2 Interne Ablauflogik des Simulationsmodells

Die interne Ablauflogik beschreibt die internen Vorgänge des Simulationsmodells, die Verknüpfungen und den Informationsfluss zwischen den Modellebenen. Auf der Administrationsebene werden die Eingabedaten an die RBG-Gassen-Modelle verteilt, die Materialflussdaten der RBG gesammelt und deren Leistungsdaten im stationären Schaltschrank zur Gesamtleistung summiert.

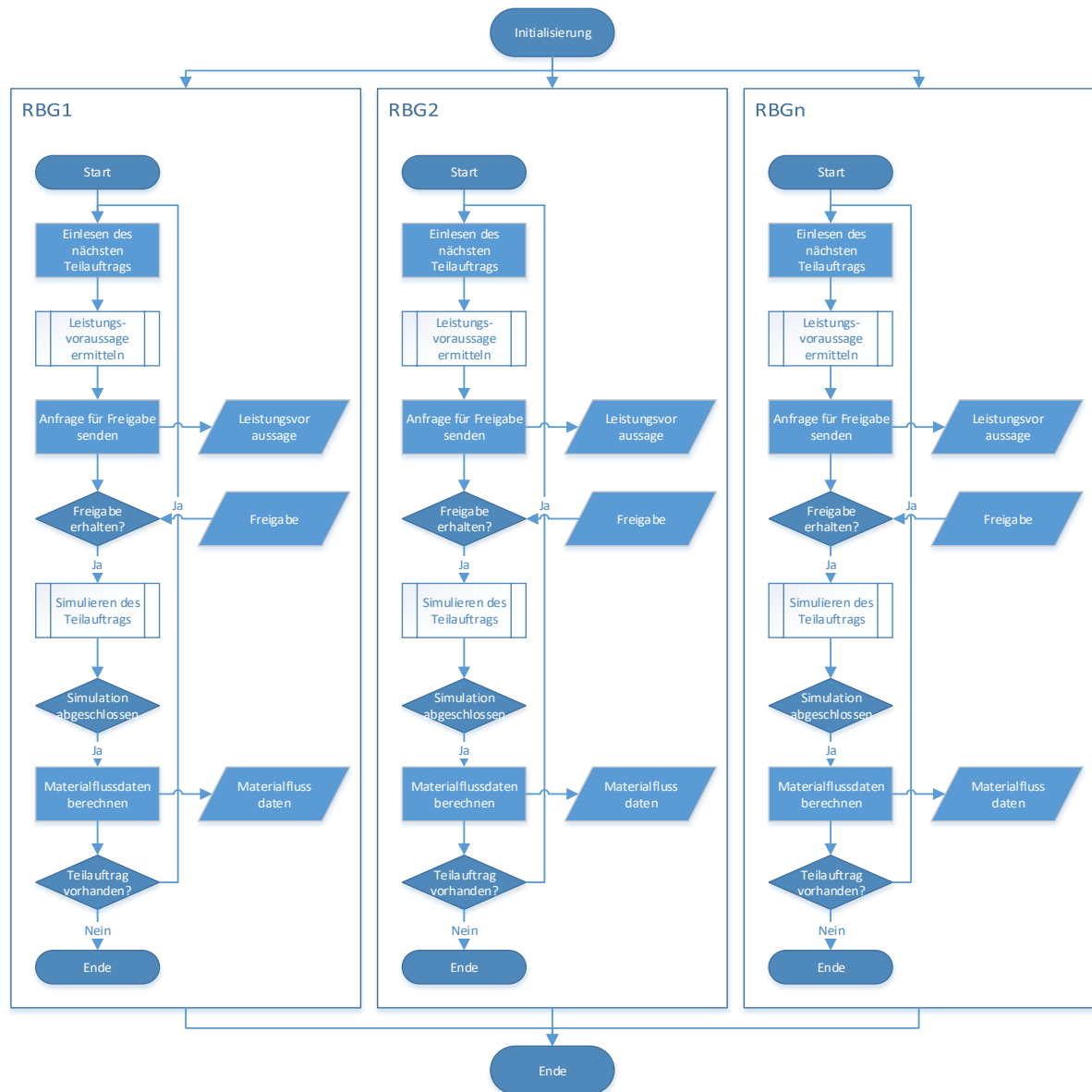


Abbildung 3-20: Ablaufprozess der Auftragssteuerung RBG

Auf der Dispositionsebene bildet der zentrale Steuerungsprozess die Auftragssteuerung der RBG. Diese liest die Teilaufträge aus den Auftragslisten, berechnet die Leis-

tungsvoraussage, sendet die Anfrage auf Freigabe für die Teilaufträge an das Lastmanagement, startet die Simulation der Bewegung und damit die Berechnung der Leistungsbedarfe der RBG, sobald die Freigabe erteilt ist. Abschließend wird die Materialflussleistung für das RBG berechnet. Die Ablauflogik der Auftragssteuerung ist in Abbildung 3-20 dargestellt. Die Auftragssteuerung aktiviert die Vorgänge „Leistungsvoraussage ermitteln“ und „Simulieren des Teilauftrags“, welche nachfolgend beschrieben werden.

Im Teilprozess „Leistungsvoraussage ermitteln“ wird der Energiebedarf für den aktuellen Teilauftrag berechnet bzw. ermittelt. Hierfür werden der Zustand des RBG und der Teilauftrag an eine externe Funktion übergeben. Diese wählt aus der Leistungsvoraussagematrix den Leistungsbedarf für den Teilauftrag aus und meldet diesen zurück. Falls der Leistungsbedarf nicht in der Leistungsvoraussagematrix enthalten ist, wird die Leistungsvoraussage in einem externen Simulationsmodell berechnet. Die Leistungsvoraussagematrix ist eine Tabelle, in der Leistungsbedarfe für die Bewegungen der RBG abgelegt sind. Diese Leistungsbedarfe werden während der Implementierung des Simulationsmodells vorausberechnet, um den Zeitbedarf der Simulation zu reduzieren. Der Prozess für die Ermittlung ist in Abbildung 3-21 dargestellt.

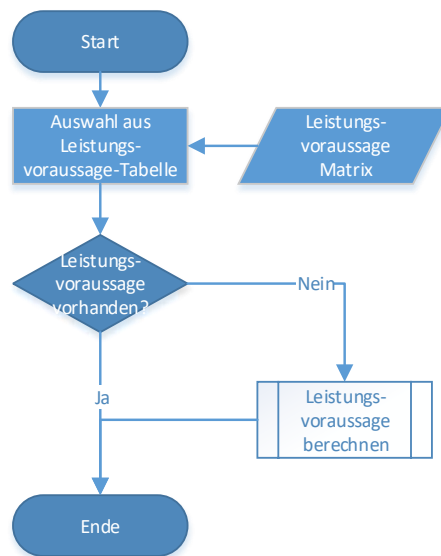


Abbildung 3-21: Ablaufdiagramm Leistungsbedarf ermitteln

Auf Basis der Leistungsvoraussage für den Teilauftrag fragt die Auftragssteuerung die Freigabe für diesen an. Das Lastmanagement bearbeitet die Anfragen auf Freigabe sequenziell. Sobald eine Anfrage auf Freigabe eines RBG vorhanden ist, wird die Leistungsvoraussage für den Teilauftrag zur Leistungsvoraussage für die Anlage summiert. Die Leistungsvoraussage der Anlage beinhaltet die Leistungsvoraussagen aller bereits freigegebenen Teilaufträge. Anschließend prüft das Lastmanagement, ob der resultierende Leistungsbedarf eine der Grenzen für das Lastmanagement verletzt. Bei

einer Verletzung der Grenze wird die Freigabe nicht erteilt und die Leistungsvoraussagen zum folgenden Simulations- bzw. Zeitschritt erneut summiert und geprüft. Sobald keine der Grenzen verletzt wird, erteilt das Lastmanagement die Freigabe für diesen Teilauftrag und legt die Summe der Leistungsvoraussagen als Leistungsvoraussage der Anlage ab. Die Ablauflogik des Lastmanagements ist in Abbildung 3-22 dargestellt.

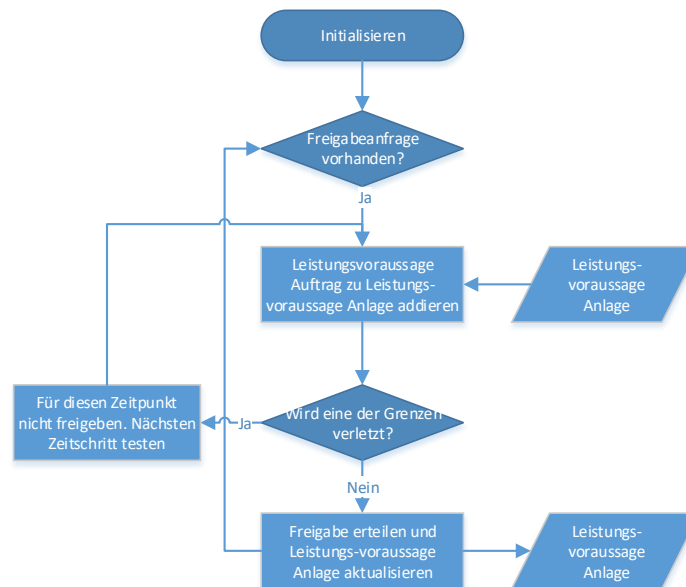


Abbildung 3-22: Ablauflogik Lastmanagement

Die Ablauflogik für das Simulieren des Teilauftrags ist in Abbildung 3-23 dargestellt. Nach dem Start wird ermittelt, ob ein Fahrauftrag oder ein Lastwechsel simuliert wird. Bei einem Fahrauftrag berechnet die Bahnplanung die Startzeitpunkte, abhängig von der Achssteuerung berechnet sie zudem die Geschwindigkeiten. Die Leistungsberechnungselemente für FW und HW der Operationsebene ermitteln damit den Leistungsbedarf für die Fahrt. Beim Erreichen der Zielposition wird der Fahrauftrag als abgeschlossen zurückgemeldet, die Leistungsberechnung ist somit abgeschlossen. Bei einem Lastwechsel wählt das Simulationsmodell abhängig von der Tiefe und dem LAM die abgelegte Leistungsbedarfsinformation für diesen Lastwechsel aus und gibt ihn wieder. Sobald die Wiedergabe des Leistungsbedarfs abgeschlossen ist, wird der Lastwechsel als abgeschlossen gemeldet.

Die Leistungsberechnung für Fahraufträge wird im folgenden Kapitel 3.5 beschrieben. Die Berechnung erfolgt schrittweise von der Bewegung bis zum elektrischen Leistungsbedarf des mitfahrenden Schaltschranks (siehe Abbildung 3-8 von rechts nach links).

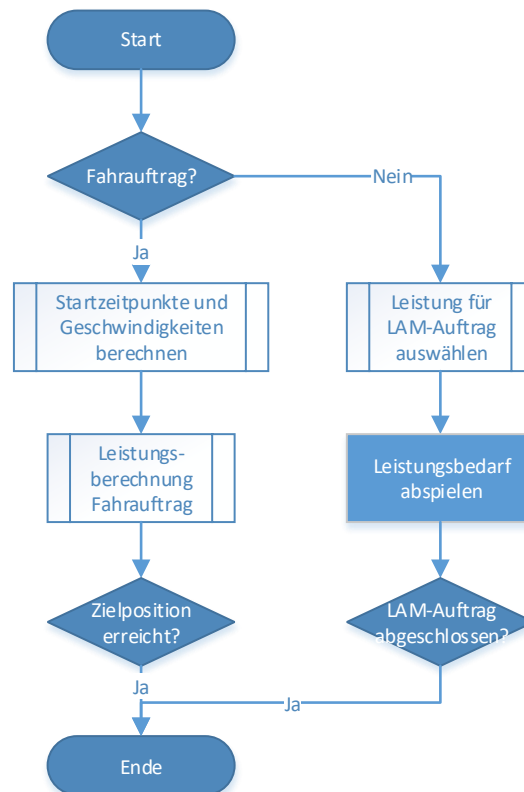


Abbildung 3-23: Ablauflogik Simulieren des Teilauftrags

3.5 Modellformalisierung

In der Phase „Modellformalisierung“ werden die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Verhaltensweisen formal beschrieben. Diese sind:

- Bahnplanung
 - Einfache Achssteuerung
 - Erweiterte Achssteuerung
- Lastmanagement-Freigabepfung

Die Fahrkurvenberechnung basiert auf den Arbeiten von *Ertl* und *Schulz*. Hinzu kommen Erweiterungen für die Leistungsberechnung der Fahrten bzw. des Energiebedarfs der RBG:

- Leistungsabhängige Verlustleistungen der Schaltschrankkomponenten
- Strombedarf des Asynchronantriebs
- Geschwindigkeitsabhängiger Fahrwiderstand

Abschließend werden die Formeln für die Leistungsberechnung für Fahrten des RBG zusammengefasst. Teilaspekte dieses Kapitels wurden bereits in [Hah-2017] veröffentlicht.

3.5.1 Einfache Achssteuerung

Bei der einfachen Achssteuerung werden die Startzeitpunkte der Achsen (Hubwerk: $t_{StartHW}$; Fahrwerk: $t_{StartFW}$) zueinander verschoben, um die Energieeffizienz des RBG zu erhöhen. Die Berechnungen für die in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Fällen lauten mit der Fahrzeit für das Hubwerk t_{FahrHW} und das Fahrwerk t_{FahrFW} und dem Hubweg s_{HW} wie folgt:

1. Optimierungsfall: Fahrzeitkritisches Heben

$$t_{FahrHW} < t_{FahrFW} \wedge s_{HW} > 0 \quad (3-1)$$

$$t_{StartHW} = t_{FahrFW} - t_{FahrHW} \wedge t_{StartFW} = 0$$

2. Optimierungsfall: Fahrzeitkritisches Senken

$$t_{FahrHW} < t_{FahrFW} \wedge s_{HW} < 0 \quad (3-2)$$

$$t_{StartHW} = t_{StartFW} = 0$$

3. Optimierungsfall: Hubzeitkritisches Senken

- $t_{FahrHW} > t_{FahrFW} \wedge s_{HW} < 0 \quad (3-3)$

$$t_{StartFW} = t_{FahrHW} - t_{FahrFW} \wedge t_{StartHW} = 0$$

3.5.2 Erweiterte Achssteuerung

In diesem Kapitel werden die Formeln für die Optimierungsfälle der erweiterten Achssteuerung aus Kapitel 3.2.2 hergeleitet. Es werden die folgenden vier Optimierungsfälle unterschieden:

1. Optimierungsfall: Fahrwerkskritische Hubfahrt
2. Optimierungsfall: Fahrwerkskritische Senkfahrt
3. Optimierungsfall: Hubwerkskritische Hubfahrt
4. Optimierungsfall: Hubwerkskritische Senkfahrt

Der 1. Optimierungsfall gleicht dem 2. Optimierungsfall bei der einfachen Achssteuerung und wird nicht nochmals beschrieben.

Bei den Optimierungsfällen 2 und 4 sollte die Achse mit dem kürzeren Zeitbedarf die Fahrbewegung abgeschlossen haben, bevor die Verzögerungsphase der zeitgebenden Achse einsetzt. Beim Optimierungsfall 3 soll die Achse mit dem kürzeren Zeitbedarf gleichzeitig mit der zeitgebenden Achse starten und ankommen. Hierfür wird ihre Geschwindigkeit reduziert. Bei den Optimierungsfällen 2 und 4 ist die Berechnung für den vorgegebenen Zeitbedarf gleich. Hier muss vorerst die Zeit berechnet werden, die die zeitgebende Achse benötigt, bis der Verzögerungsvorgang einsetzt. In dieser Zeit muss die zweite Achse mit der Bewegung fertig sein. Für die Bewegung der zweiten Achse wird die maximale Geschwindigkeit berechnet. Die Geschwindigkeit soll so niedrig sein, dass die Fahrt in der vorgegebenen Zeit durchgeführt wird. Beim Optimierungsfall 3 sollen beide Achsen gleichzeitig ankommen. Für die Achse mit dem geringeren Zeitbedarf wird auch die maximale Geschwindigkeit gesucht. Für die Berechnung bei den Optimierungsfällen 2 bis 4 sind somit die Strecke und die Zeit gegeben und die maximale Geschwindigkeit gesucht.

Die Berechnungen sind somit folgendermaßen unterteilt:

- Berechnung des Zeitbedarfs einer Fahrt, bis die Verzögerung einsetzt
- Berechnung der maximalen Geschwindigkeit bei gegebener Strecke und Zeit

Berechnung des Zeitbedarfs einer Fahrt, bis die Verzögerung einsetzt

Die Fahrkurve bei einem RBG teilt sich normalerweise in sieben Phasen. Die Phasen 1, 3, 5 und 7 sind Ruck-Phasen, die Phasen 2 und 6 sind Phasen mit konstanter Beschleunigung und die Phase 4 ist eine Phase mit konstanter Geschwindigkeit. Der Zeitbedarf für alle Ruck-Phasen ist gleich. Die Zeitbedarfe für Phasen mit konstanter Beschleunigung (Phase 2) bzw. Verzögerung (Phase 6) sind auch gleich. Je nach Fahrweg entfällt die Phase 4 oder es entfallen die Phasen 2, 4 und 6. Die Strecke, ab der die Phase 4 entfällt, ist die Strecke der Spitzbogenfahrt auf die maximale Geschwindigkeit. Diese Strecke wird benötigt, um auf die maximale Geschwindigkeit zu beschleunigen und von dieser wieder abzubremesen. Die Strecke, ab der die Phasen 2, 4 und 6 entfallen, ist die Strecke einer Spitzbogenfahrt auf die maximale Beschleunigung. Bei dieser Strecke wird die Phase mit einer konstanten Beschleunigung bzw. Verzögerung nie erreicht.

In den Phasen 1 bis 3 beschleunigt das RBG und in den Phasen 5 bis 7 verzögert es. Um den Zeitbedarf t_{p1-4} bis zum Einsetzen der Verzögerung zu berechnen, wird der

Zeitbedarf der Phasen 1 bis 4 berechnet. Da verschiedene Phasen entfallen können, wird die Berechnung in die folgenden Fälle unterschieden:

1. Fall: Fahrt ohne Phase mit konstanter Beschleunigung (nur Phasen 1, 3, 5, 7)
2. Fall: Fahrt ohne Phase mit konstanter Geschwindigkeit (nur Phasen 1, 2, 3, 5, 6, 7)
3. Fall: Fahrt mit allen Phasen

Der 1. Fall liegt bei der Fahrstrecke vor, die gleich lang oder kürzer als die Strecke der Spitzbogenfahrt auf die maximale Beschleunigung ist. Die Strecke s_{SBa} der Spitzbogenfahrt wird aus der effektiven Beschleunigung a_{eff} und dem Ruck r wie folgt berechnet. Die Herleitung ist in Anhang B.1 dokumentiert:

$$s_{SBa} = 2 * \frac{a_{eff}^3}{r^2} \quad (3-4)$$

Der 2. Fall liegt vor, wenn die Strecke größer als der Spitzbogen auf die maximale Beschleunigung und gleich oder kleiner als die Strecke für den Spitzbogen auf die maximale Geschwindigkeit ist. Die Strecke für den Spitzbogen s_{SBv} auf die maximale Geschwindigkeit berechnet sich aus der Geschwindigkeit v , der Beschleunigung a und dem Ruck r wie folgt. Die Herleitung ist in Anhang B.2 dokumentiert:

$$s_{SBv} = \frac{v^2}{a} + \frac{av}{r} \quad (3-5)$$

Alle Strecken, die länger sind als die Strecke s_{SBv} für den Spitzbogen auf die maximale Geschwindigkeit, werden nach dem 3. Fall berechnet.

Berechnen des gesuchten Zeitbedarfs t_{overz} der Fahrt für den 1. Fall, bis die Verzögerung einsetzt

Beim 1. Fall setzt die Verzögerung nach der Hälfte der Strecke und des dafür benötigten Zeitbedarfs ein. Die Fahrt besteht aus den Phasen 1, 3, 5 und 7. Der Zeitbedarf ohne die Verzögerungsphase (5, 6, 7) t_{overz} berechnet sich mit der gesamten Strecke s_{ges} folgenderweise. Die Herleitung ist in Anhang B.3 dokumentiert:

$$t_{oVerz} = \sqrt[3]{\frac{4 * s_{ges}}{r}} \quad (3-6)$$

Berechnen des gesuchten Zeitbedarfs t_{oVerz} der Fahrt für den 2. Fall, bis die Verzögerung einsetzt

Beim 2. Fall setzt die Verzögerung, wie bei dem 1. Fall, nach der Hälfte der Strecke und des dafür erforderlichen Zeitbedarfs ein. Die Fahrt besteht beim 2. Fall aus den Phasen 1, 2, 3, 5, 6 und 7. Der Zeitbedarf t_{oVerz} berechnet sich folgendermaßen. Die Herleitung ist in Anhang B.4 dokumentiert:

$$t_{oVerz} = \frac{1}{2} * \frac{a}{r} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{a^2}{r^2} + \frac{4s_{ges}}{a}} \quad (3-7)$$

Berechnen des gesuchten Zeitbedarfs t_{oVerz} der Fahrt für den 3. Fall, bis die Verzögerung einsetzt

Beim 3. Fall setzt die Verzögerung nach der 4. Phase ein. Die Fahrt besteht beim 3. Fall aus allen Phasen. Der Zeitbedarf t_{oVerz} berechnet sich wie folgt. Die Herleitung ist in Anhang B.5 dokumentiert:

$$t_{oVerz} = \frac{s_{ges}}{v} \quad (3-8)$$

Berechnung der optimierten Geschwindigkeit bei gegebener Strecke und Zeit

In diesem Abschnitt wird die optimierte Geschwindigkeit für eine Fahrt mit gegebenem Zeitbedarf und gegebener Strecke berechnet. Als erstes muss untersucht werden, ob die Geschwindigkeit überhaupt reduziert werden kann. Wenn die Geschwindigkeit reduziert, also optimiert werden kann, wird anschließend unterschieden, ob die Fahrkurve aus allen 7 Phasen oder aus den Phasen 1, 3, 4, 5 und 7 besteht. Abhängig davon wird die optimierte Geschwindigkeit berechnet. Die zeitgebende Achse ist im Folgenden die 1. Achse. Die andere ist die 2. Achse.

Um zu bestimmen, ob die Geschwindigkeit optimiert werden kann, wird der Zeitbedarf für das Fahren der 2. Achse t_{gesA2} mit maximaler Geschwindigkeit mit dem Zeitbedarf t_{oVerz} der 1. Achse verglichen. Wenn der Zeitbedarf t_{gesA2} größer als oder gleich ist

wie der Zeitbedarf t_{oVerz} , kann die Geschwindigkeit der 2. Achse nicht optimiert werden.

Wenn die Geschwindigkeit reduziert werden kann, wird unterschieden, ob die Phasen mit konstanter Beschleunigung und Verzögerung entfallen. Dies ist der Fall, wenn die Strecke kürzer ist als die Strecke der Spitzbogenfahrt auf die maximale Beschleunigung und wenn die Geschwindigkeit so weit reduziert wird, dass die Phase mit konstanter Beschleunigung nicht erreicht werden kann.

Um festzustellen, ob es eine Fahrkurve mit 7 Phasen ist, wird vorerst die Fahrstrecke s_{A2} mit der Strecke für eine Spitzbogenfahrt auf die maximale Beschleunigung verglichen. Ist die Fahrstrecke kleiner als die Strecke s_{SBa} der Spitzbogenfahrt auf die maximale Beschleunigung, entfallen die Beschleunigungs- und die Verzögerungsphase. Bei einer größeren Fahrstrecke wird die Teststrecke s_{testA2} berechnet, die mit der Grenzgeschwindigkeit v_{Gr} in der vorgegebenen Zeit t_{geg} zurückgelegt werden kann. Ist die Strecke kleiner als die vorgegebene Strecke s_{A2} für die 2. Achse, dann handelt es sich um eine Fahrkurve mit 7 Phasen, da die Geschwindigkeit für das Erreichen der Strecke in der vorgegebenen Zeit erhöht werden muss. Wenn die Strecke s_{testA2} größer ist als die vorgegebene Strecke, handelt es sich um eine Fahrt mit 5 Phasen, da die Geschwindigkeit reduziert werden muss, um die vorgegebene Strecke in der vorgegebenen Zeit zu erreichen.

Die Grenzgeschwindigkeit v_{Gr} wird bei einer Spitzbogenfahrt auf die maximale Beschleunigung erreicht. Sie berechnet sich aus den Geschwindigkeitsänderungen der Phasen Δv_{Pi} :

$$v_{Gr} = \Delta v_{P1} + \Delta v_{P3} = \frac{1}{2} * r * t_{P1}^2 + a * t_{P3} - \frac{1}{2} * r * t_{P3}^2 = \frac{a^2}{r} \quad (3-9)$$

Die Teststrecke s_{testA2} der 2. Achse ist dann (Anhang B.6):

$$s_{testA2} = \frac{a^2}{r} * t_{oVerz} - 2 * \frac{a^3}{r^2} \quad (3-10)$$

Die Fälle für die Berechnung sind folgende:

1. Fall: Keine Optimierung möglich ($t_{gesA2} > t_{oVerz}$)
2. Fall: Die effektive Beschleunigung wird nicht erreicht, 4 oder 5 Phasen

$$(s_{A2} < s_{SBa}) \text{ oder } (s_{TestA2} \geq s_{A2})$$

3. Fall: Optimierung der Geschwindigkeit bei 7 Phasen ($s_{TestA2} < s_{A2}$)

Für den **1. Fall** wird die Geschwindigkeit nicht optimiert.

Beim **2. Fall** sind die Zeit t_{gesA2} und die Strecke s_{A2} gegeben. Die gesamte Fahrzeit setzt sich aus den Zeiten der Fahrkurvenphasen 1, 3, 4, 5 und 7 zusammen. Die reduzierte Geschwindigkeit berechnet sich dann wie folgt (siehe Anhang B.7):

$$0 = 4 * \frac{v_{opt}^3}{r} - t_{gesA2}^2 * v_{opt}^2 + 2 * t_{gesA2} * v_{opt} * s_{A2} - s_{A2}^2 \quad (3-11)$$

Um die Nullstellen zu berechnen, wird das Newton-Rapshon-Verfahren angewendet:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \text{ hier mit } x = v_{opt} \quad (3-12)$$

$$v_{n+1} = v_n - \frac{f(v_n)}{f'(v_n)} = v_n - \frac{4 * \frac{v_n^3}{r} - t_{gesA2}^2 * v_n^2 + 2 * t_{gesA2} * v_n * s_{A2} - s_{A2}^2}{\frac{8}{r} v_n^2 - 2 * t_{gesA2}^2 * v_n + 2 * t_{gesA2} * s_{A2}} \quad (3-13)$$

Mit diesem Verfahren werden drei Nullstellen gesucht. Diese werden entweder wegen der Randbedingungen für die Geschwindigkeit aussortiert oder mittels Probe auf Richtigkeit getestet. Zur Probe wird mit den berechneten Geschwindigkeiten die Strecke für eine Fahrbewegung mit den Phasen 1, 3, 4, 5 und 7 ermittelt:

$$s_{ges} = 2 * v * \sqrt{\frac{v}{r}} + \left(t_{ges} - 4 * \sqrt{\frac{v}{r}} \right) * v \quad (3-14)$$

Beim **3. Fall** sind die Zeit t_{gesA2} und die Strecke s_{A2} gegeben. Die Fahrkurve setzt sich aus allen 7 Phasen zusammen. Die optimierte Geschwindigkeit berechnet sich folgendermaßen (siehe Anhang B.8):

$$v_{opt1/2} = \frac{-\frac{a}{r} + t_{gesA2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{r} - t_{gesA2}\right)^2 - 4 \frac{s_{A2}}{a}}}{\frac{2}{a}} \quad (3-15)$$

Für die Berechnung wird die kleinste Geschwindigkeit verwendet, die den Randbedingungen der Geschwindigkeit für die Achse entspricht.

3.5.3 Lastmanagement-Freigaben

Das Lastmanagement prüft bei den Freigabeanfragen, ob der angefragte Teilauftrag eine der beiden Lastmanagementgrenzen verletzt oder freigegeben werden kann. Die Grenzen des Lastmanagements sind die Lastgang- und die Leistungsgrenze. Das RBG sendet eine Anfrage mit der Leistungsvoraussage für den Teilauftrag. Für die Prüfung des Lastmanagements existiert eine Leistungsvoraussage für alle bereits vom Lastmanagement freigegebenen Teilaufträge. Die Prüfung teilt sich in:

- Leistungsspitzenprüfung
- Lastgangprüfung

Für beide Prüfungen wird im Simulationsmodell die Freigabezeit $t_{Freigabe}$ definiert. Diese bestimmt die Anzahl der Simulationszeitschritte zwischen der Freigabe und dem Start des Teilauftrags. Anschließend wird die vorläufige Leistungsvoraussage der Anlage P_{VorA}^* erstellt. Für diese wird die Leistungsvoraussage des Teilauftrags P_{VorTA} vom Startzeitpunkt t_{Start} bis zum Endzeitpunkt t_{Ende} zur Leistungsvoraussage Anlage P_{VorA} summiert. Der Startzeitpunkt berechnet sich aus dem aktuellen Simulationszeitpunkt t_0 und der Freigabezeit $t_{Freigabe}$:

$$t_{Start} = t_0 + t_{Freigabe} \quad (3-16)$$

Der Endzeitpunkt t_{Ende} berechnet sich mit der Zeitdauer der Leistungsvoraussage des Teilauftrags t_{PVorTA} zu:

$$t_{Ende} = t_{Start} + t_{PVorTA} \quad (3-17)$$

Die vorläufige Leistungsvoraussage der Anlage berechnet sich mit der Leistungsvoraussage der Anlage P_{VorA} , der vorläufigen Leistungsvoraussage der Anlage P_{VorA}^* und der Leistungsvoraussage des Teilauftrags P_{VorTA} zu:

$$P_{VorA}^* = P_{VorA} \quad (3-18)$$

$$P_{VorA}^*(t_{Start} - t_{Ende}) = P_{VorA}^*(t_{Start} - t_{Ende}) + P_{VorTA} \quad (3-19)$$

Bei der Leistungsspitzenprüfung wird geprüft, ob die maximale Leistung der vorläufigen Leistungsvoraussage der Anlage die Leistungsgrenze und somit den Grenzwert für die Leistungsspitze $GWLSP$ verletzt. Bei Verletzung wird die Variable zur Leistungsspitze lsp falsch, andernfalls wahr:

$$lsp = \max(P_{VorA}^*) \leq GWLSP \quad (3-20)$$

Für die Prüfung der Lastganggrenze müssen die Start- und Endzeitpunkte der aktuellen und folgenden Messperiode der Lastgangmessung bekannt sein. Für die beiden Messperioden wird der durchschnittliche Leistungsbedarf mit der Lastganggrenze verglichen. Falls einer dieser höher liegt als die Grenze, wird der Teilauftrag nicht freigegeben. Der Startzeitpunkt der aktuellen Messperiode $t_{p0Start}$ mit der Dauer einer Messperiode T_{PD} berechnet sich im Simulationsmodell folgenderweise:

$$t_{p0Start} = \left\lceil \frac{t_0 + t_{Freigabe}}{60 * T_{PD}} \right\rceil * 60 * T_{PD} \quad (3-21)$$

Der Endzeitpunkt der aktuellen Messperiode t_{p0Ende} ist dann:

$$t_{p0Ende} = t_{p0Start} + 60 * T_{PD} \quad (3-22)$$

Der Startzeitpunkt $t_{p1Start}$ und der Endzeitpunkt t_{p1Ende} der folgenden Messperiode sind dann:

$$t_{p1Start} = t_{p0Ende} \quad (3-23)$$

$$t_{p1Ende} = t_{p1Start} + 60 * T_{PD} \quad (3-24)$$

Für die Prüfung der Lastganggrenze wird für beide Messperioden das arithmetische Mittel der Leistungsvoraussage der Anlage P_{mP0}, P_{mP1} gebildet und mit dem Grenzwert für die Lastganggrenze $GWLG$ verglichen. Das Ergebnis ist die Variable zum Leistungsmittelwert lmw (wahr: Lastganggrenze nicht verletzt, falsch: Lastganggrenze verletzt):

$$P_{mP0} = \sum_{t_{p0Start}}^{t_{p0Ende}} P_{VorA}^* \quad (3-25)$$

$$P_{mP1} = \sum_{t_{p1Start}}^{t_{p1Ende}} P_{VorA}^* \quad (3-26)$$

$$lmw = (P_{mP0} \leq GWLG) \wedge (P_{mP1} \leq GWLG) \quad (3-27)$$

Abschließend wird geprüft, ob die Leistungsspitzenprüfung und die Prüfung der Lastganggrenze bestanden sind.

$$Freigabe = lsp \wedge lmw \quad (3-28)$$

Wenn die Freigabe „wahr“ ist, wird der Teilauftrag freigegeben und ausgeführt.

3.5.4 Erweiterungen der Leistungsberechnung

In diesem Kapitel werden Berechnungen beschrieben, welche das bestehende Simulationsmodell von *Ertl* erweitern. Das bestehende Simulationsmodell berechnet den Leistungsbedarf von Bewegungen des RBG. In dieser Untersuchung wird der Leistungsbedarf des RBG während der Fahrt und im Stillstand untersucht. Aus diesem Grund wird das Simulationsmodell für das RBG um die leistungsabhängige und die stromabhängige Verlustleistung und die Berechnung des Strombedarfs des Asynchronantriebs ergänzt. Die leistungsabhängige Verlustleistung wird für die Leistungsberechnung der Schaltschrankkomponenten benötigt. Die stromabhängige Verlustleistung wird für die Leistungsberechnung der Umrichter gebraucht. Die Berechnung des Strombedarfs des Asynchronantriebs ist für die Berechnung der Ausgangsströme und damit der Verlustleistung der Umrichter erforderlich.

Leistungsabhängige und stromabhängige Verlustleistung

Die leistungsabhängige Verlustleistung wird mit der Nennleistung, der Grundverlustleistung und der Nennverlustleistung der Komponenten berechnet. Laut der Hersteller steigt die Verlustleistung bei vielen Komponenten proportional zur elektrischen Leistung an. Berechnen lässt sich die Verlustleistung P_{Vla} aus der Grundverlustleistung P_{VGr} , der Nennverlustleistung P_{VN} , der momentanen elektrischen Wirkleistung P und der Nennleistung der Komponente P_N folgendermaßen:

$$P_{Vla} = P_{VGr} + (P_{VN} - P_{VGr}) * \frac{P}{P_N} \quad (3-29)$$

Die stromabhängige Verlustleistung berechnet sich analog der leistungsabhängigen Verlustleistung. Hierbei ist die Verlustleistung proportional zur Stromstärke I und wird mit der stromabhängigen Verlustleistung P_{Vsa} und dem Nennstrom der Komponente P_N berechnet.

$$P_{Vsa} = P_{VGr} + (P_{VN} - P_{VGr}) * \frac{I}{I_N} \quad (3-30)$$

Strombedarf des Asynchronantriebs

Der Strombedarf des Asynchronantriebs setzt sich vereinfacht aus dem Magnetisierungsstrom (Blindstrom) und dem Wirkstrom zusammen. Mit dem Wirkstrom wird das Moment erzeugt und die Arbeit in einem Antrieb verrichtet. Mit dem Magnetisierungsstrom wird das Magnetfeld des Antriebes aufgebaut. Während der Lageregelung eines Hubantriebs wird keine mechanische Arbeit verrichtet, trotzdem muss der Antrieb für das Halten des HW einen Moment erzeugen. Der hierfür benötigte Strom erzeugt im Umrichter eine Verlustleistung. Der tatsächliche Strombedarf des Asynchronantriebs berechnet sich näherungsweise mit dem Strombedarf des Antriebs I , dem Grundmagnetisierungsstrom I_{GM} , dem Abtriebsmoment des Antriebs M und dem Nennmoment des Antriebs M_N [Rie-2008, S. 118]:

$$I = \sqrt{I_{GM}^2 + \frac{M^2}{M_N^2} * (I_N^2 - I_{GM}^2)} \quad (3-31)$$

Der Grundmagnetisierungsstrom kann bei den Antriebsherstellern erfragt werden.

3.5.5 Leistungsberechnung RBG-Fahrten

Die Leistungsberechnungen in dieser Dissertation basieren auf den Arbeiten von *Ertl, Schulz et al.; Schulz und Lerher et al.* Da diese in dieser Arbeit erweitert wurden, werden die Leistungsberechnungen für die Fahrten hier dargestellt. Das Antriebsmoment M_{Ax} und die Antriebsleistung P_{Ax} des Fahrtriebs berechnen sich mit der Winkelgeschwindigkeit des Antriebs ω_{Ax} , der Fahrbeschleunigung a_x , der Masse des RBG inkl. Zuladung m_{RBG} , der Normalkraft auf die Laufrollen F_{NLR} , dem Rollwiderstandsbeiwert des Fahrwerks f_{RWx} , dem geschwindigkeitsabhängigen Rollwiderstand des Fahrwerks F_{RWgax} , dem Laufradius r_{LR} , der Getriebeübersetzung i_{Gx} , den beschleunigungsabhängigen Wirkungsgraden des Laufrads η_{LR}^* , des Getriebes η_{Gy}^* und des Fahrwerkantriebs η_{Ax}^* sowie den Trägheitsmomenten des Laufrads J_{LR} , des Getriebes J_{Gx} und des Antriebes J_{Ax} wie folgt:

$$M_{Ax}(t) = \frac{(a_x(t)m_{RBG} + F_{NLR}f_{RWx} + F_{RWgax}(t))r_{LR}}{\eta_{LR}^*\eta_{Gx}^*i_{Gx}} + \frac{J_{LR}a_x(t)}{r_{LR}i_{Gx}\eta_{Gx}^*} + \frac{a_x(t)i_{Gx}}{r_{LR}}(J_{Gx} + J_{Ax}) \quad (3-32)$$

$$P_{Ax}(t) = \frac{M_{Ax}(t)\omega_{Ax}(t)}{\eta_{Ax}^*} \quad (3-33)$$

Die Winkelgeschwindigkeit des Fahrtriebs ω_{Ax} berechnet sich aus der Fahrgeschwindigkeit v_x , dem Laufradradius r_{LR} und der Getriebeübersetzung i_{Gx} wie folgt:

$$\omega_{Ax}(t) = \frac{v_x(t)i_{Gx}}{r_{LR}} \quad (3-34)$$

Die beschleunigungsabhängigen Wirkungsgrade des Fahrtriebs η_{Ax}^* , des Getriebes η_{Gx}^* und des Laufrades η_{LR}^* berechnen sich mit den Wirkungsgraden des Fahrtriebs η_{Ax} , des Getriebes η_{Gx} und des Laufrades η_{LR} sowie der Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei Rückspeisung η_{Gredx} wie folgt:

$$\eta_{Gx}^*(a_x(t)) = \begin{cases} \eta_{Gx}, & a_x \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_{Gx} - \eta_{Gredx}}, & a_x < 0 \end{cases} \quad (3-35)$$

$$\eta_{LR}^*(a_x(t)) = \begin{cases} \eta_{LR}, & a_x \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_{LR}}, & a_x < 0 \end{cases} \quad (3-36)$$

$$\eta_{Ax}^*(a_x(t)) = \begin{cases} \eta_{Ax}, & a_x \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_{Ax}}, & a_x < 0 \end{cases} \quad (3-37)$$

Das Antriebsmoment des Hubwerks M_{Ay} berechnet sich aus der Hubgeschwindigkeit v_y , der Hubbeschleunigung a_y , dem Gewicht des Hubwagens mit LAM und Zuladung m_{LAM} , dem Rollwiderstand des Hubwagens F_{RWy} , dem Zahnriemenscheibenradius r_{ZRS} , der Getriebeübersetzung i_{Gy} , den richtungsabhängigen Wirkungsgraden des Rientriebs η_{RT}^* und des Getriebes η_{Gy}^* , den Trägheitsmomenten des Rientriebs J_{RT} , des Getriebes J_{Gy} und des Antriebs J_{Ay} sowie dem Richtungsfaktor d_y wie folgt:

$$M_{Ay}(t) = \left(\frac{(m_{LAM}a_y(t) + F_{RWy}(t))r_{RT}}{\eta_{RT}^*\eta_{Gy}^*i_{Gy}} + \frac{J_{RT}a_y(t)}{r_{RT}i_{Gy}\eta_{Gy}^*} \right. \\ \left. + \frac{(J_{Gy} + J_{Ay})a_y(t)i_{Gy}}{r_{RT}} \right) d_y + \frac{m_{LAM}r_{RT}g}{\eta_{RT}^*\eta_{Gy}^*i_{Gy}} \quad (3-38)$$

Der Richtungsfaktor d_y ist abhängig von der Bewegungsrichtung des Hubwagens:

$$d_y = \begin{cases} 1, & v_y(t) > 0 \\ -1, & v_y(t) \leq 0 \end{cases} \quad (3-39)$$

Der Rollwiderstand F_{RWy} berechnet sich aus der Normalkraft F_{NLRy} auf die Laufrollen des Hubwagens, dem Rollwiderstandsbeiwert f_{RWy} und dem geschwindigkeitsabhängigen Rollwiderstand des Hubwagens F_{RWgay} :

$$F_{RWy}(t) = \begin{cases} F_{NLRy}f_{RWy} + F_{RWgay}(t), & v_y(t) \neq 0 \\ -F_{NLRy}f_{RWy} - F_{RWgay}(t), & v_y(t) = 0 \end{cases} \quad (3-40)$$

Die richtungsabhängigen Wirkungsgrade des Getriebes η_{Gy}^* , des Riementriebes η_{RT}^* und des Antriebs η_{Ay}^* des Hubwerks berechnen sich mit der Hubgeschwindigkeit v_y (Heben positiv, Senken negativ), den Wirkungsgraden des Getriebes η_{Gy} , des Riementriebes η_{RT} und des Antriebs η_{Ay} sowie der Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei Rückspeisung η_{Gredy} wie folgt:

$$\eta_{Gy}^*(v_y(t)) = \begin{cases} \eta_{Gy}, & v_y > 0 \\ \frac{1}{\eta_{Gy}}, & v_y = 0 \\ \frac{1}{\eta_{Gy} - \eta_{Gredy}}, & v_y < 0 \end{cases} \quad (3-41)$$

$$\eta_{RT}^*(v_y(t)) = \begin{cases} \eta_{RT}, & v_y > 0 \\ \frac{1}{\eta_{RT}}, & v_y \leq 0 \end{cases} \quad (3-42)$$

$$\eta_{Ay}^*(v_y(t)) = \begin{cases} \eta_{Ay}, & v_y \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_{Ay}}, & v_y < 0 \end{cases} \quad (3-43)$$

Die Hubantriebleistung P_{Ay} berechnet sich folgenderweise:

$$P_{Ay}(t) = \frac{(a_y(t)m_{LAM} + F_{RWy}(t))|v_y(t)|}{\eta_{RT}^*\eta_{Gy}^*\eta_{Ay}^*} + \frac{J_{RT}a_y(t)|v_y(t)|}{r_{RT}^2\eta_{Gy}^*\eta_{Ay}^*} \quad (3-44)$$

$$+ \frac{|v_y(t)|a_y(t)i_{Gy}^2}{r_{RT}^2\eta_{Ay}^*}(J_{Gy} + J_{Ay}) + \frac{m_{LAM}v_y(t)g}{\eta_{RT}^*\eta_{Gy}^*\eta_{Ay}^*}$$

4 Implementierung des Simulationsmodells

In diesem Kapitel wird die Implementierung des Simulationsmodells in MATLAB beschrieben. Das bestehende Modell wird in diesem Schritt um zusätzliche Funktionen erweitert. Diese sind:

- Lastmanagement
- Auftragsabwicklung
- Achssteuerung
- Bremsensteuerung
- LAM-Leistung
- Schaltschranke

Die Funktionen dieser Komponenten sind in den Kapiteln 3.2 „Systemanalyse“ und 3.5 „Modellformalisierung“ beschrieben. Die Implementierung wird in den folgenden Kapiteln dargestellt.

4.1 Lastmanagement

Das Lastmanagement ist das zentrale Freigabesystem für die Teilaufträge der RBG. Es sorgt für die Einhaltung der Grenzen für den maximalen Leistungsbedarf und den Leistungsmittelwert der angeschlossenen RBG. Bei einer Verletzung der eingestellten Grenzen verzögert das Lastmanagement den Teilauftrag des anfragenden RBG, bis



Abbildung 4-1: Implementierung des Lastmanagements

beide Grenzen gewahrt werden. Jeder Freigabeanfrage beinhaltet eine Leistungsvoraussage für den Teilauftrag. Mit dieser prüft das Lastmanagement, ob die Freigabe erteilt werden kann. Die Anfragen der RBG werden vom Lastmanagement priorisiert vom RBG 1-n abgearbeitet. Implementiert ist das Lastmanagement als ein Zustandsautomat, welcher für jedes RBG über einen Anfrage-, einen Leistungsvoraussageeingang und einen Freigabeausgang verfügt. Der Zustandsautomat ist in der Abbildung 4-1 dargestellt.

Der Initialisierungszustand ist „Warten auf Anfrage“. Sobald eine Anfrage eingeht und somit ein Anfrageeingang „wahr“ ist, bearbeitet das Lastmanagement die Anfrage und der Zustandsautomat wechselt in den Zustand „Anfrage RBGn“. Wenn mehrere Anfragen gleichzeitig eingeht oder anstehen, werden diese in aufsteigender Reihenfolge bearbeitet. Dabei prüft das Lastmanagement, ob beide Grenzen gewahrt werden. Dafür werden als erstes die Start- und Endzeitpunkte der aktuellen und der folgenden Messperiode und der Freigabezeitpunkt berechnet. Anschließend wird die Freigabeprüfung in der Freigabeprüfungsfunktion durchgeführt. Diese berechnet mit den Leistungsvoraussagen der Teilaufträge und der Anlage die vorläufige Leistungsvoraussage der Anlage bei sofortiger Freigabe des Teilauftrags. Anschließend prüft sie, ob die Grenzen des Lastmanagements gewahrt werden. Wenn beide Grenzen gewahrt werden, wird die Freigabe erteilt und der Zustand „Anfrage RBGn“ verlassen. Dabei wird die Leistungsvoraussage der Anlage mit der vorläufigen Leistungsvoraussage für die Anlage aktualisiert. Falls mindestens eine der Grenzen verletzt wird, werden der Freigabezeitpunkt und die Start- und Endzeitpunkte der aktuellen und der folgenden Messperiode erneut berechnet und die Prüfung wiederholt. Dieses Vorgehen wiederholt sich, bis die Freigabe erteilt werden kann.

Bei den Simulationen hat sich herausgestellt, dass für eine zuverlässige Arbeitsweise des Lastmanagements die folgenden Sonderfälle betrachtet werden müssen:

1. Die Leistungsspitze der Leistungsvoraussage für den Teilauftrag ist größer als die Leistungsgrenze der Anlage. In diesem Fall kann niemals eine Freigabe für den Teilauftrag erteilt werden und die Simulation wird abgebrochen.
2. Die Bremse des RBG fällt während der Freigabeprüfung ein. In diesem Fall ist die Bremsenöffnungszeit nicht in der Leistungsvoraussage berücksichtigt und die Leistungsvoraussage stimmt nicht mit dem zu erwartenden Leistungsbedarf überein. Um dies zu vermeiden, wird die Bremse während der Freigabeprüfung offengehalten.

3. Der vorliegende Teilauftrag verletzt die Lastganggrenze. In diesem Fall kann der aktuelle Teilauftrag erst wieder freigegeben werden, wenn ein Teil seines Leistungsbedarfs in die nächste Lastgangperiode fällt. Da das RBG bei geöffneter Bremse mehr Energie benötigt, wird die Bremse bis zum nächstmöglichen Freigabezeitpunkt geschlossen. Zusätzlich ist es nicht notwendig, die Freigabeprüfung bis zum nächstmöglichen Freigabezeitpunkt durchzuführen, weil keine Freigabe möglich ist. Die Berechnung wird deswegen bis zu diesem Zeitpunkt übersprungen.

Die Prüfung des **Sonderfalls 1** zeigt, ob die Leistungsspitze des Teilauftrags größer ist als die Leistungsgrenze (LGR) für die Anlage. Sie geht nach folgender Formel vor:

$$\max(P_{VorTA}) \geq LGR \quad (4-1)$$

Ist das der Fall, wird die Simulation abgebrochen, da dieser Teilauftrag nie freigegeben werden kann und die Anlage damit mit diesem Teilauftrag blockiert ist.

Beim **2. Sonderfall** muss sichergestellt werden, dass beide Bremsen während des Freigabeprozesses ihren Zustand nicht ändern, da sonst die Leistungsvoraussage des Teilauftrags nicht mit dem Leistungsbedarf des RBG übereinstimmt. Im Zustandsdiagramm des Lastmanagements wird für jedes RBG ein weiterer Ausgang namens „BremseX_halten“ („X“ steht für die Nummer des RBG) eingeführt. Dieser wird aktiviert, sobald der Zustand „Anfrage bearbeiten RBGX“ aktiviert wird und keine der Bremsen des jeweiligen RBG schließt, außer der Sonderfall 3 tritt ein.

Der **3. Sonderfall** tritt bei einer Verletzung der Lastganggrenze durch einen Teilauftrag ein. Dabei kann der aktuelle Teilauftrag bis zum Erreichen der nächsten Messperiode nicht freigegeben werden. Erst wenn mindestens ein Teil des Leistungsbedarfs dieses Auftrags in der nachfolgenden Messperiode verbraucht wird, kann der Auftrag freigegeben werden. Solange die RBG auf die Freigabe warten, werden die Bremsen geschlossen und der Energiebedarf der RBG reduziert. Für das Schließen der Bremsen ist beim Lastmanagement ein Ausgangssignal mit dem Namen „Bremsen schließen“ implementiert. Bei einer Verletzung der Lastganggrenze wird das Signal zum Schließen der Bremsen aktiviert. Daraufhin schließen die Bremsen der RBG nach Ablauf der Bremseneinfallzeit. Zusätzlich wird der Simulationsaufwand reduziert, indem überflüssige Freigabeprüfungen übersprungen werden.

4.2 Auftragsabwicklung

Die Auftragsabwicklung arbeitet die Auftragsliste chronologisch ab, ermittelt bzw. berechnet die Leistungsvoraussage, sendet die Anfrage auf Freigabe, verarbeitet die Freigabe, leitet die Teilaufträge an das RBG-Modell weiter und berechnet die Materialflussleistung des RBG. Implementiert ist die Auftragsabwicklung als Zustandsautomat. Die Eingänge der Auftragsabwicklung sind die Zeit, die Auftragsliste und RBG-Zustandsinformationen. Die Ausgänge sind die Informationen zum Teilauftrag, die Anfrage inkl. Leistungsvoraussage und die Materialflussinformation. Der Zustandsautomat der Auftragsabwicklung ist in Abbildung 4-2 abgebildet.

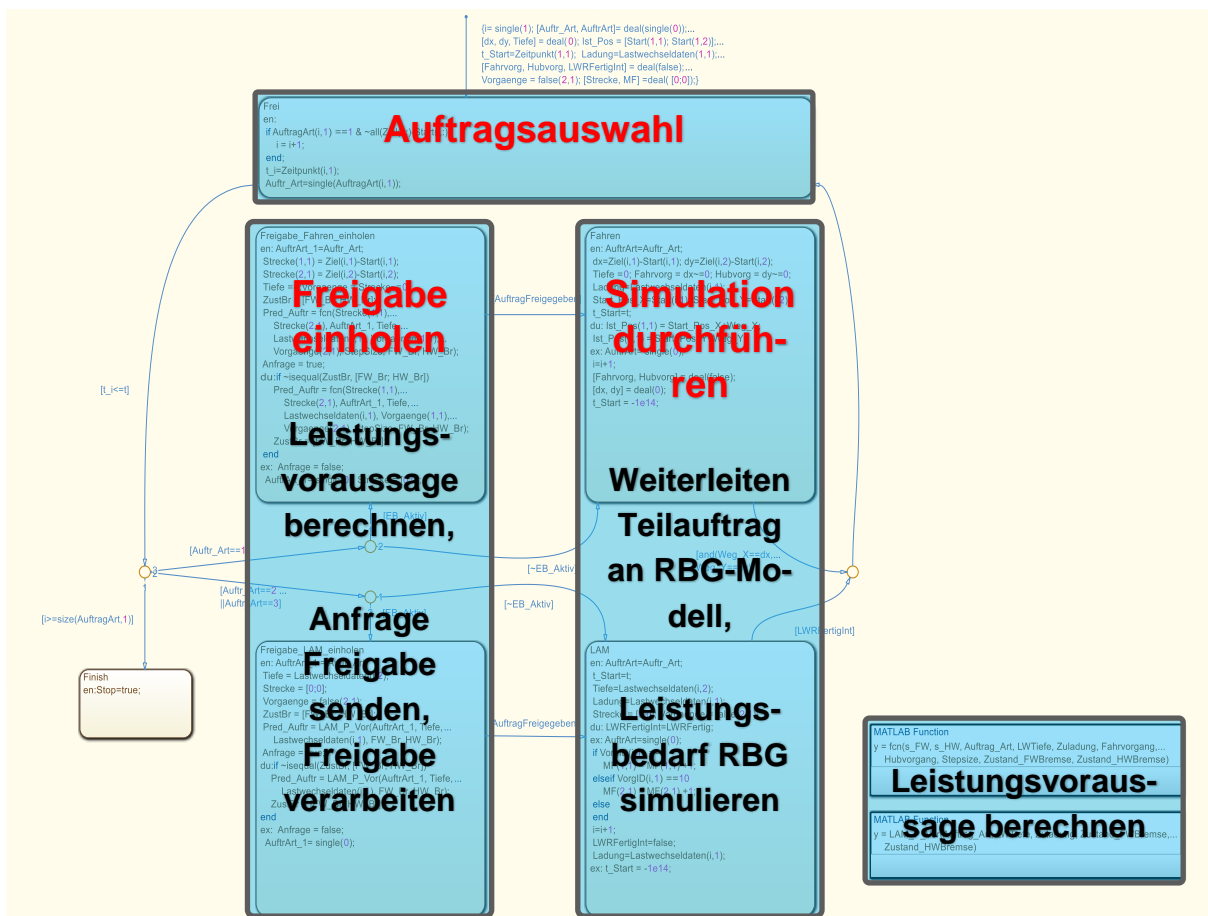


Abbildung 4-2: Implementierung der Auftragsabwicklung

Initial ist die Auftragsabwicklung im Zustand „Auftragsauswahl“. In diesem Zustand wird abhängig vom Simulationszeitpunkt und dem Abarbeitungsfortschritt geprüft, ob ein neuer Auftrag in der Auftragsliste existiert. Ist dies der Fall, wird der Zustand „Auftragsauswahl“ verlassen. Wenn die Simulation mit dem Lastmanagement durchgeführt wird, wechselt die Auftragsabwicklung direkt in den Zustand „Simulation durchführen“. Im Zustand „Freigabe einholen“ berechnet der Funktionsbaustein „Leistungs-voraussage berechnen“

berechnen“, abhängig vom aktuellen Teilauftrag und RBG Zustand, die Leistungsvoraussage. Die Auftragsabwicklung sendet anschließend die Anfrage auf Freigabe inkl. der Leistungsvoraussage an das Lastmanagement. Sobald die Freigabe erteilt ist, wird der Zustand „Freigabe einholen“ verlassen und in den Zustand „Simulation durchführen“ gewechselt. In diesem werden die Daten für den Teilauftrag an das RBG-Modell weitergeleitet und gewartet, bis die Zielposition erreicht ist oder der Lastwechsel als abgeschlossen gemeldet wurde. Sobald dies geschieht, wechselt die Auftragsabwicklung in den Zustand „Auftragsauswahl“.

Der Funktionsbaustein „Leistungsvoraussage berechnen“ liefert für die Eingangsdaten die Leistungsvoraussage zurück. Die Leistungsvoraussagen werden entweder aus der Leistungsvoraussagematrix ausgewählt oder berechnet. In der Leistungsvoraussagematrix sind die Leistungsvoraussagen der LAM-Zyklen und für die häufigsten Fahrten abgelegt, welche in der Implementierungsphase des Simulationsmodells vorausberechnet werden. Alle Fahrten, die nicht in der Leistungsvoraussagematrix abgelegt sind, werden während der Simulation berechnet.

4.3 Achssteuerung

Die Achssteuerung berechnet für die Eingangsparameter neuer Auftrag, Strecke FW, Strecke HW, Achssteuerungsstrategie und Dynamikparameter für FW und HW die Startzeitpunkte für FW und HW und abhängig von der Achssteuerungsstrategie die optimierte Geschwindigkeit. Implementiert ist die Achssteuerung als Zustandsdiagramm (siehe Abbildung 4-3). Mit Hilfe des Zustandsdiagramms wird die Berechnung für die Achssteuerung einmalig bei einem neuen Fahrauftrag durchgeführt.

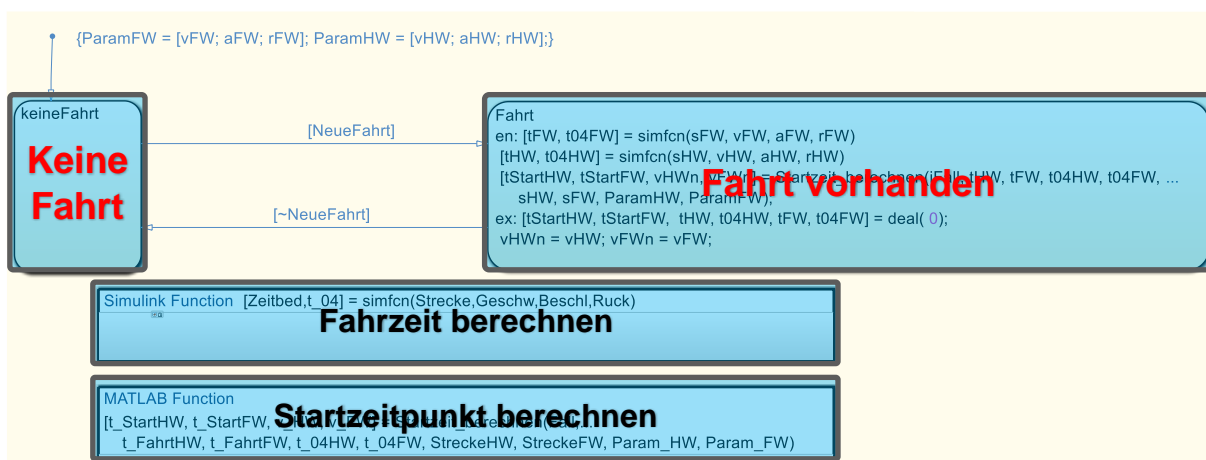


Abbildung 4-3: Implementierung der Achssteuerung

Initial ist das Zustandsdiagramm im Zustand „Keine Fahrt“ und kein Fahrauftrag für das RBG vorhanden. Sobald ein neuer Fahrauftrag vorhanden ist, wechselt der Zustand in „Fahrt vorhanden“. Beim Wechseln in diesen Zustand werden für die vorliegende Fahrt der Fahrzeitbedarf und der Fahrzeitbedarf ohne die Verzögerungszeit bei der Achsen berechnet. Anschließend werden mit diesen Informationen die Startzeitpunkte und evtl. die optimierten Geschwindigkeiten für die Achsen berechnet. Sobald der Teilauftrag abgeschlossen ist, wechselt der Zustandsautomat in den Zustand „Keine Fahrt“ und alle Zeiten und Geschwindigkeiten werden zurückgesetzt.

4.4 Bremsensteuerung

Die Bremsensteuerung bildet das Verhalten der FW- und der HW-Bremse ab. Das Verhalten der Bremsen ist in Kapitel 3.2.2 beschrieben. Der Zustand beider Bremsen ist mit einer Vorsteuerung und jeweils mit einem Zustandsautomaten implementiert. Die Vorsteuerung bildet die Regeln der Achssteuerung ab. Der Zustandsautomat bildet das Verhalten der Bremse ab. Die Vorsteuerung öffnet bei einer Fahrbewegung beide Bremsen bei der erweiterten Achssteuerung gleichzeitig. Bei der einfachen Achssteuerung werden die Bremsen abhängig von den Bewegungen getrennt geöffnet.

Der Zustandsautomat steuert in Abhängigkeit von den Eingängen „Neuer Auftrag“, aktuelle „Zeit der Achse“, der „Bremsenöffnungszeit“ und der „Bremsenwartezeit“ die Ausgänge „Zustand der Bremse“ und „Startzeitverzögerung Bremse“. Ein zusätzlicher Eingang „Öffnen“ ist der Befehl zum sofortigen Öffnen der Bremse, welcher für die Berechnung der Leistungsvoraussage verwendet wird. Der Eingang bewirkt, dass der Zustandsautomat sofort vom Zustand „Bremse geschlossen“ in den Zustand „Bremse offen“ übergeht. Der Zustandsautomat der Bremse ist in Abbildung 4-4 dargestellt.

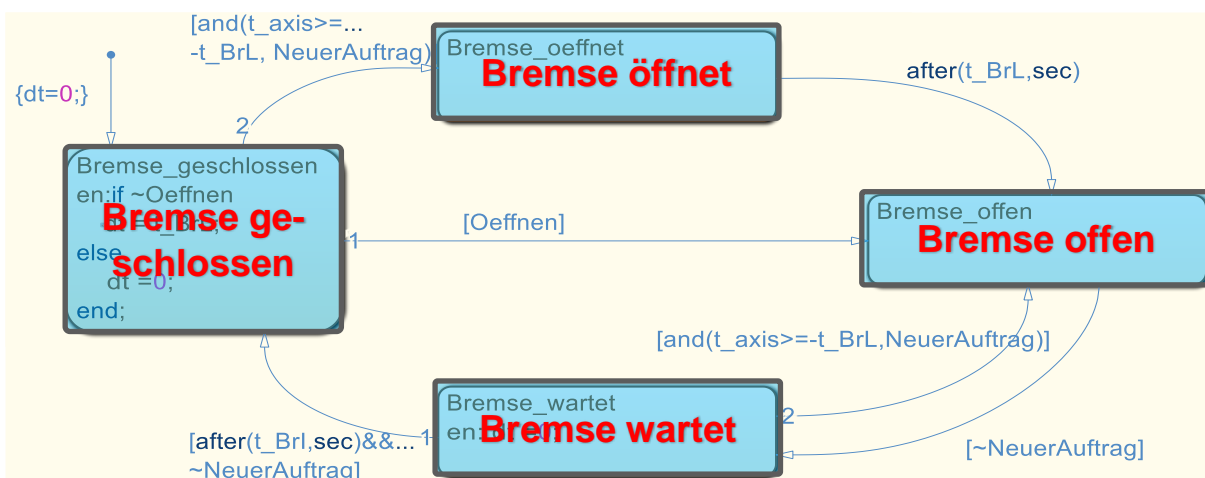


Abbildung 4-4: Implementierung der Bremssteuerung

Initial befindet sich die Bremsensteuerung im Zustand „Bremse geschlossen“ und kann in den Zustand „Bremse offen“ oder in den Zustand „Bremse öffnet“ übergehen. Wenn der Eingang „Öffnen“ „wahr“ ist, wechselt die Bremsensteuerung direkt in den Zustand „Bremse offen“. Wenn ein neuer Auftrag vorhanden und die relative Zeit der Achse die negative Bremsenöffnungszeit ist, wechselt das Diagramm in den Zustand „Bremse öffnet“. Nach dem Ablauf der Bremsenöffnungszeit wechselt das Zustandsdiagramm vom Zustand „Bremse öffnet“ in den Zustand „Bremse offen“ und der Teilauftrag der Achse kann durchgeführt werden. Sobald dieser abgeschlossen ist und kein neuer Auftrag vorliegt („neuer Auftrag“ = „falsch“), wechselt das Zustandsdiagramm in den Zustand „Bremse wartet“. Dieser wird entweder bei einem neuen Teilauftrag oder nach dem Ablauf der Bremsenwartezeit verlassen. Wenn ein neuer Teilauftrag vorhanden und die Zeit der Achse die negative Bremsenöffnungszeit ist, wechselt die Bremsensteuerung in den Zustand „Bremse offen“ und der anstehende Teilauftrag wird ausgeführt. Wenn die Bremsenwartezeit abgelaufen ist und kein neuer Auftrag vorhanden ist, wechselt die Bremsensteuerung in den Zustand „Bremse geschlossen“. In den Zuständen „Bremse offen“ und „Bremse wartet“ wird der Ausgang „Bremse offen“ „wahr“ gesetzt. Im Zustand „Bremse geschlossen“ wird die Bremsenöffnungszeit als Startzeitverzögerung ausgegeben, da bei einem neuen Auftrag die Bremse geöffnet werden muss.

Bei einem Lastwechsel des LAM muss die Hubwerksbremse offen sein, um das LAM vor dem Fach zu positionieren bzw. um die LE anzuheben oder abzusetzen. Bei geschlossener Bremse muss diese geöffnet werden, bevor der Lastwechsel durchgeführt werden kann. Wie bei einem Fahrauftrag berechnet die Bremsensteuerung abhängig vom Bremsenzustand die Startzeit für den Lastwechsel.

Die Bremsen werden abhängig von der Achssteuerung bei Fahrvorgängen unterschiedlich gesteuert. Die einfache Achssteuerung steuert die Bremsen unabhängig vom Auftragsstatus der jeweils anderen Achse. Die Bremse der Achse wird geöffnet, wenn für sie ein Fahrauftrag vorliegt. Bei der erweiterten Achssteuerung werden, unabhängig vom Auftragsstatus für die jeweilige Achse, bei einer Fahrbewegung immer beide Bremsen geöffnet. Bei beiden Achssteuerungen berechnet diese den Startzeitpunkt für die jeweilige Fahrt.

Bremsensteuerung bei einem Lastwechsel

Die Hubwerksbremse muss bei einem Lastwechsel offen sein, um den Hubwagen vor dem Fach zu positionieren, um auf die sich ändernde Nutzlast zu reagieren und, je nach LAM, um die LE auszuheben oder abzusetzen. Der Fahrwerksantrieb wird ausschließlich für eine Korrektur der Position entlang der x-Richtung benötigt. Da dies selten vorkommt, wird die Fahrwerksbremse ausschließlich im Bedarfsfall geöffnet. Bei

dem Simulationsmodell kommt dies nicht vor, da die genaue Positionierung vor dem Fach angenommen wird und keine Korrektur der Position in x-Richtung auftritt.

Im Simulationsmodell ist die Startzeit für einen Teilauftrag der Zeitpunkt, an dem die Bewegung begonnen wird. Teilweise muss dieser Zeitpunkt korrigiert werden, da die Bremse geöffnet werden muss, bevor mit der Fahrt begonnen werden kann. Die Berechnung des Startzeitpunkts erfolgt nach den folgenden Formeln:

Der Zustand der Hubwerksbremse Z_{HWBr} ist:

$Z_{HWBr} = 1(true)$: Bremse ist geschlossen

$Z_{HWBr} = 0(false)$: Bremse ist offen

Bei einer offenen Bremse wird der Startzeitpunkt nicht korrigiert:

$$t_{Start} = t_{Start}, Z_{HWBr} = 0 \quad (4-2)$$

Bei einer geschlossenen Hubwerksbremse gilt:

$$t_{Start} = \begin{cases} t_{Start}, t \leq t_{Start} - t_{HWBroeff} \\ t + t_{HWBroeff}, t > t_{Start} - t_{HWBroeff} \end{cases} \quad (4-3)$$

Bremsensteuerung bei der Einfachen Achssteuerung

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie der Startzeitpunkt für die Teilaufträge in Abhängigkeit von den Zuständen der Bremsen bei der Einfachen Achssteuerung berechnet wird. Dabei wird geprüft, ob auf Grund der Bremsenöffnungszeit der Startzeitpunkt für den Teilauftrag verschoben werden muss. Als erstes wird dafür die maximale Bremsenöffnungszeit der am Teilauftrag beteiligten Achsen ermittelt, um im Anschluss zu prüfen, ob die Startzeit verändert werden muss. Die folgenden Fälle werden unterschieden:

1. ein Hubvorgang und kein Fahrvorgang
2. kein Hubvorgang aber ein Fahrvorgang
3. ein Hub- und ein Fahrvorgang

Im Fall 1 liegt eine Fahrt mit einem Hubvorgang ohne einen Fahrvorgang vor. Vor dieser Bewegung muss die Hubwerksbremse geöffnet sein. Bei einer geöffneten Hubwerksbremse kann mit dem Hubvorgang zum Startzeitpunkt begonnen werden. Wenn die Hubwerksbremse geschlossen ist, wird geprüft, ob die Bremse bis zum Startzeitpunkt der Fahrt geöffnet werden kann. Ist dies der Fall, wird der Startzeitpunkt nicht verschoben. Ist dies nicht der Fall, wird der Startzeitpunkt um die benötigte Zeit verschoben. In Formeln bedeutet das:

Zustand der Hubwerksbremse Z_{HWBr} :

$$Z_{HWBr} = 1 \quad (4-4)$$

$$t_{Start} = \begin{cases} t_{Start}, t_{HWBroeff} \leq t_{Start} - t \\ t + t_{HWBroeff}, t_{HWBroeff} > t_{Start} - t \end{cases} \quad (4-5)$$

$$Z_{HWBr} = 0 \quad (4-6)$$

$$t_{Start} = t_{Start} \quad (4-7)$$

Im 2. Fall liegt eine Fahrt mit Fahrvorgang aber ohne Hubvorgang vor. Für die Ausführung des Teilauftrags muss die Fahrwerksbremse offen sein. Wie bei der Hubwerksbremse wird in diesem Fall geprüft, ob die Bremse bis zum Startzeitpunkt geöffnet werden kann. Bei Bedarf wird der Startzeitpunkt verschoben:

$Z_{FWBr} = 1(true)$: Bremse ist geschlossen

$$t_{Start} = \begin{cases} t_{Start}, t_{FWBroeff} \leq t_{Start} - t \\ t + t_{FWBroeff}, t_{FWBroeff} > t_{Start} - t \end{cases} \quad (4-8)$$

$Z_{FWBr} = 0(false)$: Bremse ist offen

$$t_{Start} = t_{Start} \quad (4-9)$$

Beim Fall 3 liegt eine Fahrt mit einer Kombination aus Hubvorgang und Fahrvorgang vor. Für diese Bewegung müssen die Hub- und die Fahrwerksbremse geöffnet sein. Falls beide Bremsen offen sind, kann zum Startzeitpunkt die Bewegung begonnen werden. Andernfalls muss geprüft werden, ob die Bremsen rechtzeitig vom Startzeitpunkt geöffnet werden können. Bei der Einfachen Bremssteuerung werden die Bremsen unabhängig voneinander gesteuert.

Die Bremsenöffnungszeiten des Hubwerks $t_{HWBroeff}$ und des Fahrwerks $t_{FWBroeff}$ sind mit den Zuständen der Hubwerksbremse Z_{HWBr} und der Fahrwerksbremse Z_{FWBr} und den Bremsenöffnungszeiten der Hubwerksbremse $t_{HWBroeff}$ und der Fahrwerksbremse $t_{FWBroeff}$ zu berechnen:

$$t_{HWBroeff} = \begin{cases} 0, Z_{HWBr} = 0 \\ t_{HWBroeff}, Z_{HWBr} = 1 \end{cases} \quad (4-10)$$

$$t_{FWBroeff} = \begin{cases} 0, Z_{FWBr} = 0 \\ t_{FWBroeff}, Z_{FWBr} = 1 \end{cases} \quad (4-11)$$

Damit ergibt sich der kleinste Bremsenöffnungszeitenpunkt t_{Broeff} :

$$t_{StartHW}^* = t_{StartHW} - t_{HWBroeff} \quad (4-12)$$

$$t_{StartFW}^* = t_{StartFW} - t_{FWBroeff} \quad (4-13)$$

$$t_{Broeff} = \min(t_{StartHW}^*, t_{StartFW}^*) \quad (4-14)$$

Die Startzeit muss nicht geändert werden, wenn der kleinste Bremsenöffnungszeitenpunkt später ist als der Startzeitpunkt des Teilauftrags:

$$t_{start} = t_{start}, t_{Broeff} \geq t_{start} \quad (4-15)$$

Der Startzeitpunkt wird geändert, wenn der kleinste Bremsenöffnungszeitenpunkt vor dem Startzeitpunkt liegt:

$$t_{Broeff} < t_{start} \quad (4-16)$$

Die Verzögerung dt_{start} durch das Öffnen der Bremsen beträgt:

$$dt_{start} = \text{abs}(t_{start} - t_{Broeff}) \quad (4-17)$$

Der neue Startzeitpunkt t_{start} ist somit:

$$t_{start} = \begin{cases} t + t_{HWBroeff}, t_{StartHW}^* \leq t_{StartFW}^* \\ t + t_{FWBroeff}, t_{StartHW}^* > t_{StartFW}^* \end{cases} \quad (4-18)$$

Die Startzeitpunkte $t_{StartHW}$ und $t_{StartFW}$ für die Achsen sind:

$$t_{StartHW} = t_{StartHW} + dt_{Start} \quad (4-19)$$

$$t_{StartFW} = t_{StartFW} + dt_{Start} \quad (4-20)$$

Bremsensteuerung bei der Erweiterten Achssteuerung

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie der Startzeitpunkt für die Teilaufträge in Abhängigkeit von den Zuständen der Bremsen bei der Erweiterten Achssteuerung berechnet wird. Dabei wird geprüft, ob auf Grund der Bremsenöffnungszeit der Startzeitpunkt für den Teilauftrag verschoben werden muss. Bei der Erweiterten Achssteuerung werden bei einer Fahrt immer beide Bremsen unabhängig von Hub- und/oder Fahrvorgang zum Startzeitpunkt geöffnet. Der Startzeitpunkt wird folgenderweise berechnet:

Die Bremsenöffnungszeiten $t_{HWBroeff}$ und $t_{FWBroeff}$ sind:

$$t_{HWBroeff} = \begin{cases} 0, Z_{HWBr} = 0 \\ t_{HWBroeff}, Z_{HWBr} = 1 \end{cases} \quad (4-21)$$

$$t_{FWBroeff} = \begin{cases} 0, Z_{FWBr} = 0 \\ t_{FWBroeff}, Z_{FWBr} = 1 \end{cases} \quad (4-22)$$

Damit ergibt sich der kleinste Bremsenöffnungszeitpunkt t_{Broeff} :

$$t_{StartHW}^* = t_{Start} - t_{HWBroeff} \quad (4-23)$$

$$t_{StartFW}^* = t_{Start} - t_{FWBroeff} \quad (4-24)$$

$$t_{Broeff} = t_{Start} - \max(t_{HWBroeff}, t_{FWBroeff}) \quad (4-25)$$

Die Startzeit muss nicht geändert werden, wenn der kleinste Bremsenöffnungszeitpunkt später ist als der Startzeitpunkt des Teilauftrags:

$$t_{Start} = t_{Start}, t_{Broeff} \geq t_{Start} \quad (4-26)$$

Der Startzeitpunkt wird geändert, wenn der kleinste Bremsenöffnungszeitpunkt vor dem Startzeitpunkt liegt:

$$t_{Broeff} < t_{Start} \quad (4-27)$$

Die Verzögerung dt_{Start} durch das Öffnen der Bremsen beträgt:

$$dt_{Start} = abs(t_{Start} - t_{Broeff}) \quad (4-28)$$

Der neue Startzeitpunkt t_{Start} ist somit:

$$t_{Start} = t + max(t_{HWBroeff}, t_{FWBroeff}) \quad (4-29)$$

Die Startzeitpunkte $t_{StartHW}$ und $t_{StartFW}$ für die Achsen sind:

$$t_{StartHW} = t_{StartHW} + dt_{Start} \quad (4-30)$$

$$t_{StartFW} = t_{StartFW} + dt_{Start} \quad (4-31)$$

4.5 LAM-Leistung

Die LAM-Leistung bildet den Leistungsbedarf des LAM nach. Wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben, sind die gemessenen elektrischen Leistungsbedarfsverläufe der LAM-Zyklen in Variablen abgespeichert und werden während der Simulation abgespielt. Da unterschiedliche Zuladungen simuliert werden und damit der Leistungsbedarf des HW variiert, beinhalten die Leistungsbedarfsverläufe den Leistungsbedarf des LAM ohne den des Hubwerks. In Abbildung 4-5 ist das Modell der LAM-Leistung abgebildet.

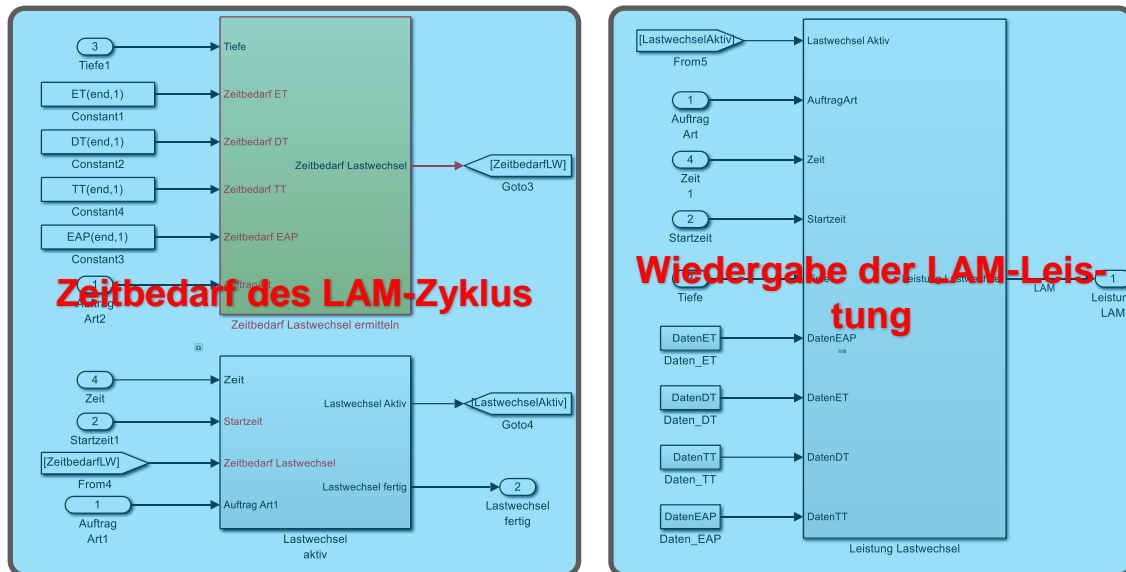


Abbildung 4-5: Implementierung der LAM-Leistung

Das Modell teilt sich in die Zeitbedarfsermittlung für den LAM-Zyklus und die Wiedergabe der LAM-Leistung. Die Zeitbedarfsermittlung bestimmt den Zeitbedarf für den LAM-Zyklus in Abhängigkeit der Auftragsart (bspw. Lastwechsel am EAP) und der Tiefe. Für die Berechnung des Endzeitpunkts des LAM-Zyklus wird der Zeitbedarf für den LAM-Zyklus auf den Startzeitpunkt des Teilauftrags summiert. Während des Lastwechsels ist die Variable „Lastwechsel aktiv“ auf „wahr“ gesetzt.

Die „Wiedergabe der LAM-Leistung“ spielt den im Teilauftrag geforderten Leistungsbedarf des LAM-Zyklus ab. Der Leistungsbedarf wird aus einer Datei gelesen und ab dem Startzeitpunkt des LAM-Zyklus abgespielt. Die Leistungsbedarfe wurden im Vorfeld an einem repräsentativen Teststand gemessen.

4.6 Schaltschränke

In diesem Kapitel werden die Implementierungen vom mitfahrenden und dem stationären Schaltschrank beschrieben.

4.6.1 Mitfahrender Schaltschrank

Der mitfahrende Schaltschrank verteilt die elektrische Energie an die Verbraucher des RBG. Das Modell des mitfahrenden Schaltschranks summiert die Leistungen der Achsen in Abhängigkeit der Antriebskonfiguration (siehe Kapitel 2.1.2) des RBG und bildet den Leistungsbedarf der zusätzlichen Verbraucher ab. Die Funktionen dahinter sind im Modell von *Ertl* vorhanden [Ert-2016]. Die Berechnung der Verlustleistung der Rückspeiseeinheit ist in Kapitel 3.5.4 beschrieben.

Die Implementierung der Verlustleistung der zusätzlichen Verbraucher des mitfahrenden Schaltschranks ist in Abbildung 4-6 abgebildet. Die Verlustleistung dieser ist stromabhängig und wird mit dem Strombedarf des Achsverbunds nach der Formel für die stromabhängige Verlustleistung (Kapitel 3.5.4) berechnet. Diese wird anschließend zu dem Leistungsbedarf des Achsverbunds und dem konstanten Leistungsbedarf des mitfahrenden Schaltschranks summiert und von der Summe wird der Energie- und Strombedarf für den mitfahrenden Schaltschrank berechnet.

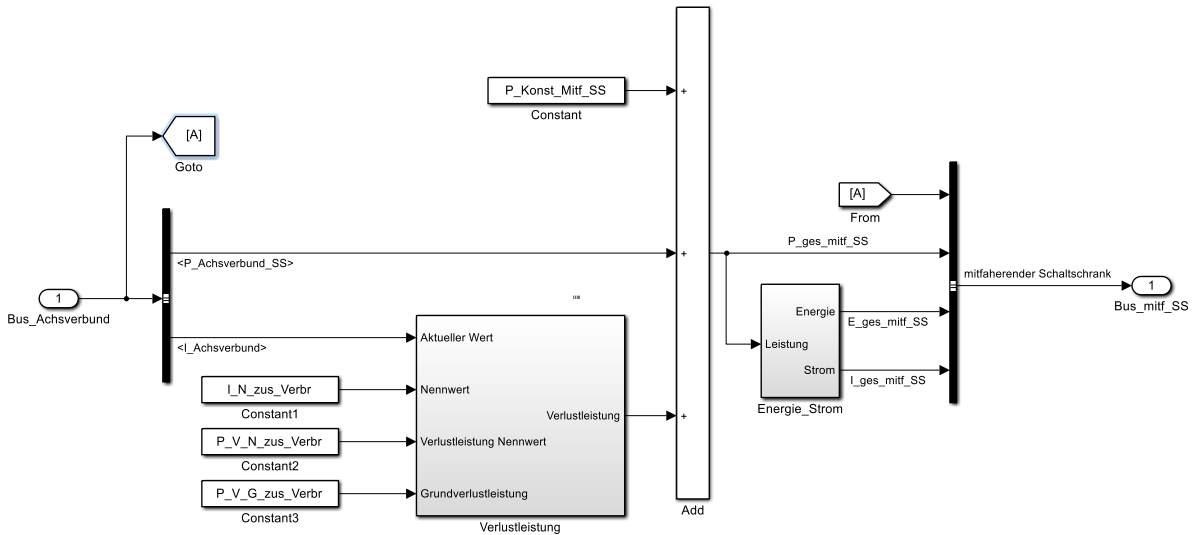


Abbildung 4-6: Implementierung der Verlustleistung der zusätzlichen Verbraucher des mitfahrenden Schaltschranks

4.6.2 Stationärer Schaltschrank

Der stationäre Schaltschrank der RBG verteilt die Leistung an die RBG-Gassen der Anlage. Im Modell summiert der stationäre Schaltschrank die Leistungsbedarfe der RBG zu dem eigenen Leistungsbedarf und berechnet damit den Gesamtleistungsbedarf und den Gesamtenergiebedarf. Zur Berechnung des Energiebedarfs des stationären Schaltschranks wird dessen Leistungsbedarf integriert. Der Strombedarf des stationären Schaltschranks wird aus dessen Leistungsbedarf berechnet und zu den Strombedarfen der RBG summiert. Das Modell eines stationären Schaltschranks mit sechs angeschlossenen RBG ist in Abbildung 4-7 dargestellt.

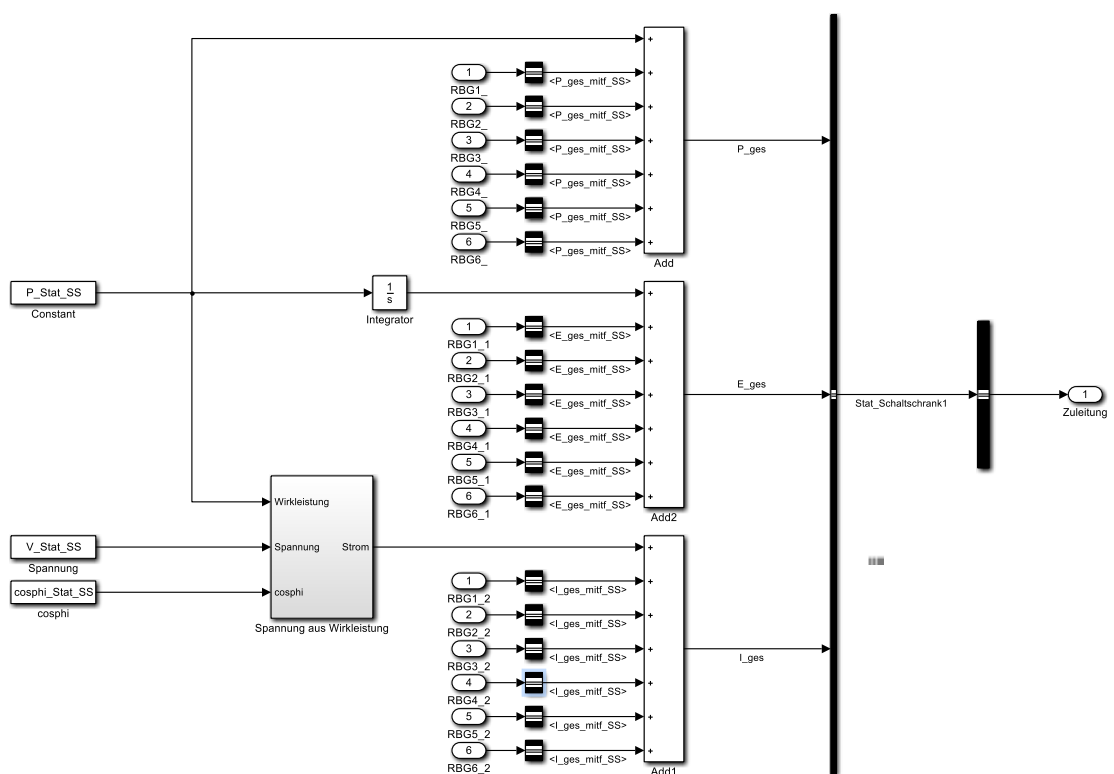


Abbildung 4-7: Modell des stationären Schaltschranks

5 Verifikation und Validierung des Simulationsmodells

Bevor die Simulation durchgeführt werden kann, muss überprüft werden, ob das beschriebene Modell korrekt abgebildet wird und ob es das reale System genau genug abbildet. Diese Prüfung wird Verifikation und Validierung bezeichnet. „Verifikation ist die Überprüfung, ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde“ [Rab-2008, S. 23]. Mit dem Validieren wird nachgewiesen, dass das entwickelte „...Modell das Verhalten des realen Systems genau genug und fehlerfrei widerspiegelt“ [VDI-3633b, S. 37], um die Untersuchungsfrage zu beantworten. Wichtig ist hierbei, dass das Modell die Realität nicht zu 100 % widerspiegelt, sondern dass die Realität genau genug und fehlerfrei wiedergespiegelt wird, um die Forschungsfrage zu beantworten.

Validiert wird das Simulationsmodell anhand von Referenzmessungen, welche hierfür mit den Simulationsergebnissen verglichen werden. Erst bei einer ausreichend genauen Übereinstimmung von den Referenzmessungen und dem Simulationsergebnis wird mit der Simulation fortgefahren. Die Validierung des Simulationsmodelles wird mit einem Bottom-Up-Ansatz durchgeführt, also im Vorgang von innen nach außen bzw. vom Kleinen zum Großen, um evtl. vorhandene Fehler in den Submodellen besser eingrenzen zu können. Als erstes wird vom Fahr- und dem Hubantrieb die Berechnung des Antriebsmoments validiert. Anschließend wird getrennt voneinander die jeweilige Energiebedarfsberechnung der einzelnen Achsen validiert, worauf die Validierung der Energiebedarfsberechnung von Diagonalfahrten des RBG folgt. Abschließend wird die Energiebedarfsberechnung mehrerer parallel arbeitender RBG über einen längeren Zeitraum validiert.

Im ersten Abschnitt 5.1 wird die Verifizierung beschrieben. Kapitel 5.2 beschreibt die Daten, die für die Simulation und die Verifikation und Validierung benötigt werden sowie die Datenbeschaffung und -aufbereitung dieser. Die Kalibrierung und Validierung der RBG-Parameter für AKL und APL und die anschließende Validierung der Leistungsberechnung wird in Kapitel 5.3 beschrieben. Die Validierung der Energiebedarfsberechnung der Diagonalfahrten von einzelnen RBG sind im Kapitel 5.4 dokumentiert. Kapitel 5.5 beinhaltet die Validierung der Energiebedarfsberechnung mehrerer paralleler RBG. Neben dem RBG-Modell wird das Lastmanagement im Kapitel 5.6 verifiziert. Da keine Anlage mit einem Lastmanagement existiert, an der Referenzmessungen für die Validierung des Lastmanagements durchgeführt werden können, wird die

Funktionsweise des Lastmanagements anhand der Simulationsergebnisse mit den Simulationsparametern validiert. Abschließend wird die Verifikation und Validierung bewertet.

5.1 Verifikation

Mit der Verifikation des Simulationsmodells wird überprüft, ob das Simulationsmodell das reale System korrekt wiedergibt und alle Anforderungen an das Modell erfüllt. Die Anforderungen an das Modell ergeben sich aus der Aufgabendefinition (siehe Kapitel 3.1). Die Definitionen für den Begriff „Verifikation“ sind unterschiedlich. Zum einen ist die Verifikation ein „softwaretechnisch unterstützter formaler Nachweis der Korrektheit von Programmen oder Programmteilen“ [VDI-3633a]. Zum anderen ist die „Verifikation ... (ist) die Überprüfung, ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde“ [Rab-2008, S. 23]. Und „Verifizieren bedeutet also eine Überprüfung von Phasenergebnissen während des gesamten Simulationsprojektes“ [Rab-2008, S. 24].

Nach der VDI-Richtlinie wird im Prozess des Verifizierens der Programmcode bzw. das Simulationsmodell auf formale Fehler überprüft. Mit dieser Prüfung werden die Lauffähigkeit des Modells bzw. Programmcodes nachgewiesen. Ob das vorliegende Modell korrekt von der einen in die andere Beschreibungsart transformiert wurde, wird dabei nicht überprüft. Da die Prüfung des Programmcodes beim Kompilieren des Simulationsmodells von der Simulationsumgebung durchgeführt wird, wird in dieser Arbeit die korrekte Transformation von der Realität in das Konzeptmodell und vom Konzeptmodell in das Simulationsmodell überprüft.

Das Simulationsmodell setzt sich aus drei verschiedenen Teilkomponenten zusammen. Die Vorverarbeitung der Simulationsdaten und die Nachbereitung der Simulationsergebnisse wird von einem Programm ausgeführt. Die drei Teilkomponenten sind die RBG-Gassenmodelle, das Modell des stationären Schaltschranks und das Modell des LM.

Das RBG-Gassenmodell beinhaltet die Auftragsabwicklung und das Leistungsberechnungsmodell des RBG. Das Konzeptmodell der Auftragssteuerung des RBG ist im Kapitel 3.3.2 beschrieben. Dieses ist, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, in einen Zustandsautomaten in der MatLab®-Stateflow®-Umgebung transformiert. Die Verifizierung prüft die sequenzielle Verarbeitung der Auftragsliste des RBG, die ordnungsgemäße Weiterleitung der Informationen des Teilauftrags an das Leistungsberechnungsmodell des RBG, die korrekte Verarbeitung der Zustandsinformationen des RBG, die korrekte

Erstellung und Weiterleitung der Freigabeanfrage an das LM, die richtige Verarbeitung der Freigabe des LM und die fehlerfreie Berechnung der Materialflussleistung. Hierfür werden die Programmcodes des Zustandsautomaten mit Hilfe des Debuggers der Simulationsumgebung schrittweise mit unterschiedlichen Auftragslisten überprüft und ggf. korrigiert. Das Leistungsberechnungsmodell ist größtenteils von *Ertl* übernommen und in seiner Arbeit bereits verifiziert worden. Die ergänzten Programmteile der Leistungsberechnung werden im Debugger-Modus der MatLab®-Simulink®-Umgebung überprüft. Hierfür werden unterschiedliche Szenarien simuliert und anschließend die Simulationsergebnisse auf ihre Korrektheit geprüft. Die Umgebung bietet die Möglichkeit, die Signale – Variablen für die Berechnung der Leistung – aufzuzeichnen. Für die Verifizierung werden die Eingangs- und die Ausgangsparameter der Komponenten aufgezeichnet und anschließend geprüft, ob das Verhalten korrekt abgebildet ist.

Das Modell des stationären Schaltschranks hat die Funktion, den eigenen Energiebedarf abzubilden, die Energiebedarfe der RBG zu summieren und die Materialflussdaten der RBG zusammenzufassen. Das Konzeptmodell ist in Kapitel 3.3.1 und die Implementierung in Kapitel 4.6 beschrieben. Der stationäre Schaltschrank hat einen einfachen Aufbau und wird deshalb verifiziert, indem die Komponenten, Berechnungen und Simulationsergebnisse einzeln gesichtet und auf deren Richtigkeit geprüft werden.

Das Konzeptmodell des LM ist in Kapitel 3.3.1 beschrieben. Transformiert ist das Konzeptmodell in einen Zustandsautomaten in der Matlab®-Stateflow®-Umgebung (siehe Kapitel 4.1). Das LM prüft, ob bei der Ausführung des Teilauftrags die Energiebedarfsgrenzen des LM gewahrt werden, und gibt anschließend den geprüften Teilauftrag frei oder verzögert diesen. Bei der Verifizierung wird geprüft, ob diese Funktionen korrekt in der Simulationsumgebung abgebildet sind. Hierfür werden im Debugger-Modus der Simulationsumgebung verschiedene Haltepunkte in den Programmcodes eingebaut, um die korrekte Funktion des LM zu überprüfen. Zusätzlich werden die Leistungsvoraussage des LM und der simulierte Leistungsbedarf der Anlage verglichen und auf Abweichungen überprüft.

5.2 Datenbeschaffung und -aufbereitung

Dieses Kapitel beschreibt die Datenbeschaffung und -aufbereitung. Daten werden für die Beschreibung bzw. Nachbildung des technischen Systems und für die Validierung des Simulationsmodells benötigt. Nach der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 [VDI-3633b] werden die Daten für die Simulation in Systemlastdaten, Organisationsdaten und tech-

nische Daten eingeteilt (siehe Abbildung 5-1). Die Daten für diese Simulationsuntersuchung sind so über die drei Datentypen verteilt, dass die Datentypen folgenderweise eingeteilt werden:

- Systemlastdaten
- Technische Daten
- Validierungsdaten

Die Systemlastdaten und die Organisationsdaten sind in den Systemlastdaten zusammengefasst. Hierzu gehören die Auftragslisten, welche die Auftragseinlastung (Transportaufträge, Mengen und Termine), die Ressourcenzuordnung (Fördermittel), die Ablauforganisation (Lagerstrategien) und teilweise die Fabrikstrukturdaten (Anlagentopologie wie Layout, Lagertyp und Lagergröße) umfassen. Die technischen Daten für diese Simulationsuntersuchung beinhalten die Materialflussdaten (Topologie des Fördersystems, Leistungsdaten und Kapazität). Mit den Validierungsdaten wird das Simulationsmodell kalibriert und validiert. Diese sind die Antriebsmomente von Hub- und Fahrtrieb, der Leistungsbedarf von RBG und der Leistungs- und Energiebedarf von stationären Schaltschränken. Im Folgenden werden die Simulationsdaten und deren Ermittlung beschrieben.

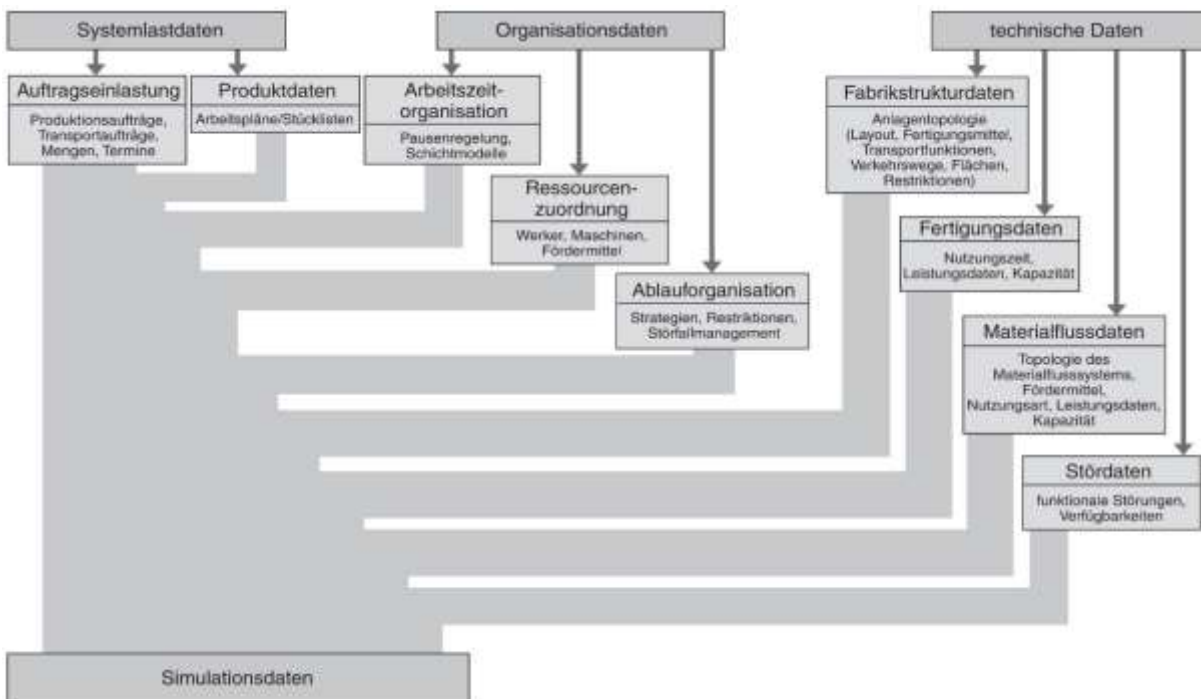


Abbildung 5-1: Einteilung der Daten für die Simulation [VDI-3633b, S. 34]

5.2.1 Systemlastdaten

Die Systemlastdaten sind in dieser Dissertation die Auftragslisten für die RBG. Diese beinhalten die Gassennummer, den Ausführungszeitpunkt, den Transportvorgang, die Start- und die Zielposition, die Anzahl der LE und deren Gewichte. Die Auftragslisten werden auf zwei Wegen beschafft. Zum einen werden Protokoll Daten vom MFS für die Validierung des Simulationsmodells beschafft und für die Simulation aufbereitet. Zum anderen werden Auftragslisten mit Hilfe von Generatorprogrammen erzeugt.

Die Protokoll Daten des MFS sind Textdateien, in denen die Kommunikationstelegramme zwischen MFS und RBG aus Servicegründen temporär gespeichert werden. Sie beinhalten mehr Informationen, als für die Simulation benötigt werden und werden deshalb konzentriert und aufbereitet.

Das Generatorprogramm erzeugt, abhängig von den Benutzereingaben, zufällige Auftragslisten. Das Programm ist an dem Lehrstuhl fml entstanden und für diese Arbeit erweitert worden. Es erzeugt Auftragslisten für einfachtiefe Lagerung unter Berücksichtigung der Regalfächer, der Lagerstrategie, des Lagerbelegungsgrad, der ABC-Zonierung, der Umschlaghäufigkeit der ABC-Zonen, der Häufigkeiten der Einzelspiele Einlagern, der Einzelspiele Auslagerung und der Doppelspiele sowie der Gewichte der LE. Erzeugt werden Auftragslisten mit der Start- und der Zielposition, dem Transportvorgang und dem Gewicht der LE.

Unabhängig von der Ermittlungsmethode beinhalten die Auftragslisten Fachpositionen und keine Fachkoordinaten. Für das Simulationsmodell werden die Fachpositionen der Auftragslisten in Koordinaten umgerechnet. Die erfolgt anhand von Höhenkodetabellen, in welchen für jede Fachposition ein absolutes Abstandsmaß zu dem Bezugspunkt des RBG dokumentiert ist. Diese Umrechnung erfolgt bei einem realen System in der Steuerung des RBG.

Aufbau der Protokolle zwischen MFS und RBG

Als **Fahrten** werden die Fahraufträge für die Simulation bezeichnet. Hierbei handelt es sich um Telegramme von Fahrten, die in Tabellen zusammengefasst sind. In diesen Listen sind Informationen über den Transportvorgang, die LE und die Zeit vorhanden.

ID	C/OID	ORI	AFR	ATO	ERR			OID	S/OID	P/RIO	C/TYP	C/HI	C/LEN	C/WDT	WGT	STATE				
					DEV	DEVID	ERRID									PROST	COLOC	W/FLG	RES	RES
DD	LLLLLLLLLLLLL...	OO	GGXXXXYYT	GGXXXXYYT	DDDD	NNNN	000000NNNN	NNNN	NNNN	NN	T	H	L	W	GGGGGGGG	SS	PPPP	W	RRR	...

Abbildung 5-2: MFS-Telegrammstruktur

Die Telegramme setzen sich wie in Abbildung 5-2 dargestellt zusammen. Die Beschreibung der Telegrammfelder ist in Abbildung 5-3 dargestellt.

Feld	Länge (Byte)	Format	Bezeichnung Telegrammfeld	Beschreibung Telegrammfeld
ID	2	N	<u>Telegram ID</u>	Telegramm ID s. Seite[-> 14]
COID	20	A	<u>Container ID</u>	Ladeeinheit –Nummer
ORI	2	A	<u>Orientation</u>	Ausrichtung der Ladeeinheit
AFR	10	A	<u>Address From</u>	Adresse von „0000 “ – „9999 “ [-> 14]
ATO	10	A	<u>Address To</u>	Adresse nach „0000 “ – „9999 “ [-> 14]
ERR	18	A	<u>Error Code</u>	Fehler -Code[-> 15]
OID	4	N	<u>Order ID</u>	Auftragsnummer
SOID	4	N	<u>Suborder ID</u>	Sortier –Nr. innerhalb der Auftragsnummer
PRIO	2	N	<u>Priority</u>	Auslagerpriorität der Aufträge
CTYP	1	N	<u>Container Type</u>	Ladeeinheiten-Typ
CHI	1	N	<u>Container Height</u>	Ladeeinheiten-Höhe
CLEN	1	N	<u>Container Length</u>	Ladeeinheiten-Länge
CWDT	1	N	<u>Container Width</u>	Ladeeinheiten-Breite
WGT	8	N	<u>Weight [g]</u>	Gewicht in g
STATE	10	A	<u>State</u>	RBG Status (früher KDA)[-> 16]
RES	18	A	<u>Reserve</u>	Reserve für Projekt Erweiterungen
Summe	112 Byte			

Abbildung 5-3: MFS-Telegrammfelder

Für die Simulation sind die Telegrammfelder für die Aufnahmeposition „AFR“, für die Abgabeposition „ATO“ und für das LE-Gewicht „WGT“ entscheidend. Die Bestandteile der Telegrammfelder „AFR“ und „ATO“ beinhalten die Gasse, eine Fachposition oder die Platznummer am Ein- bzw. Auslagerplatz, die Lagerseite und die Information, in welcher Tiefe die LE in diesem Lagerfach eingelagert ist (siehe Abbildung 5-4). Zusätzlich beinhaltet die Textdatei den Übermittlungszeitpunkt des Protokolleintrags. Ein Protokolleintrag beinhaltet vier Teilaufträge – Fahren zum Aufnahmeort, Aufnehmen der LE, Fahren zum Abgabepunkt und Abgeben der LE. Für das Bestimmen des Ausführungszeitpunkts der Teilaufträge ist der Übermittlungszeitpunkt unpräzise. Mit einem Telegramm der ID = 60 wird der Bearbeitungsstatus des Auftrags von der RBG-Steuerung an das MFS gemeldet. Dieser wird im Telegrammfeld „PROST“ (**P**rocessing **S**tate „PROST“, dem Bearbeitungsstatus, siehe Abbildung 5-5) übermittelt und wird analog der Teilaufträge des Simulationsmodells eingeteilt. Mit diesen Teilaufträgen werden die Auftragslisten für die Validierung mehrerer Gassen über mehrere Tage erzeugt. Mit den Statusmeldungen der Teilaufträge und den dazugehörigen Zeitpunkten werden die Ausführungszeitpunkte enger eingegrenzt und eignen sich somit besser für die Validierung.

Struktur	Format	Beschreibung
GGSSXXYYTT	A	Repräsentiert eine Fachposition: GG : Gassennummer (Gang) (00 – 99) S : Seite des Lagerfachs (1 – 2) 1 = links 2 = rechts XXX : Horizontale Koordinaten des Lagerbereichs (000 – 999) YY : Vertikale Koordinaten des Lagerbereichs (00 – 99) TT : Tiefe des Lagerfachs (00 – 99) 0 = ohne Zyklus (z.B. bei Parkfahrt) 1 = vorne (Gang nahes Fach) 2 = hinten (Gang fernes Fach)
PPPP	A	Repräsentiert eine Platznummer PPPP : Platznummer [-> 10] (0000 – 9999)

Abbildung 5-4: Beschreibung Telegrammfeld "AFR" und "ATO"

PROST – Processing state	COLOC – Container location
00 = noch nicht begonnen bei : Telegramm ID = 01, 02, 03	PPPP = 0000
20 = Fahren wird begonnen (Aufnehmen)	PPPP = 0000
26 = Fahren fertig (Aufnehmen)	PPPP = 0000
40 = Zyklus aufnehmen wird begonnen	PPPP = 0000
46 = LE auf LAM – Platz, Ende Zyklus aufnehmen	PPPP = Platznummer des LAM auf den die LE aufgenommen wurde
60 = Fahren wird begonnen (Abgeben)	PPPP = Platznummer des LAM
66 = Fahren fertig (Abgeben)	PPPP = Platznummer des LAM
80 = Zyklus abgeben wird begonnen	PPPP = Platznummer des LAM
86 = LAM - Platz frei, Ende Zyklus abgeben	Bei Ziel Auslagerplatz: PPPP = FT – Platznummer sonst : PPPP = 0000

Abbildung 5-5: Bearbeitungsstatus bei TeleID = 60

5.2.2 Technische Daten

Die technischen Daten detaillieren das Lagersystem und bilden die Grundlage zur Berechnung des Materialflusses und des Energiebedarfs der RBG und somit der Anlage. Sie beinhalten bspw. den Aufbau der Anlage, die Anzahl der parallelen RBG und die Massen dieser. Die Parameter des Stromnetzes sind in Tabelle 5-1 dargestellt.

Tabelle 5-1: Parameter des Stromnetzes

Parameter	Einheit
Spannung	[V]
Netzfrequenz	[Hz]

Die Daten für die RBG sind in der Tabelle C-1 dargestellt. Die letzte Tabellenspalte beinhaltet die Ermittlungsmethode für die Daten. Es wurde bei der Modellerstellung darauf geachtet, dass möglichst Herstellerdaten für die Komponenten verwendet werden können. Die Ermittlungsmethoden sind:

- Herstellerangaben (H)
- Messungen (M)
- Berechnung (B)

Die vom Hersteller zu ermittelnden technischen Daten sind teilweise in Katalogen vorhanden oder müssen direkt von den Herstellern erfragt werden.

Messungen

Kalibriert werden der geschwindigkeitsabhängige Fahrwiderstand, der geschwindigkeitsabhängige Hubwiderstand, die Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei generatorischem Betrieb von FW und HW, der Antriebswirkungsgrad von FW und HW, die konstante Verlustleistung des mitfahrenden Schaltschranks und der Grundverlust des RBG bei geöffneten Bremsen. Die geschwindigkeitsabhängigen Widerstände und die Wirkungsgradreduzierungen der Getriebe werden mit Hilfe des Antriebsmoments ermittelt bzw. kalibriert. Dieser wird mit der Diagnosefunktion der Umrichter aufgezeichnet und als Textdateien ausgegeben. Die Ermittlung wird in Kapitel 5.2.3 genauer beschrieben.

Die Wirkungsgrade der Antriebe, die Verlustleistung des Schaltschranks und der Grundverlust des RBG werden mittels Leistungsmessungen ermittelt bzw. kalibriert. Für die Wirkungsgrade wird die elektrische Leistungsaufnahme am Gassenzugang von RBG von definierten Fahrten aufgezeichnet. Für die Ermittlung der Verlustleistung

und dem Grundverlust der Schaltschränke werden die Leistungsmessungen ohne Bewegungen des RBG durchgeführt. Wie der Antriebsmoment und die Leistung der RBG gemessen werden, ist in Kapitel 5.2.3 beschrieben.

Berechnungen

In diesem Kapitel werden die Berechnungsmethoden für die zu berechnenden technischen Daten beschrieben. Diese sind die Massenträgheitsmomente von den Laufrädern, der Seiltrommel und des Hubriementriebs sowie der Wirkungsgrad des Seiltriebs. Die Berechnungen sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Massenträgheitsmomente

Dieses Kapitel beschreibt die Berechnung der Massenträgheitsmomente der Seiltriebe, Riementriebe bzw. der Laufräder. Bei der Beschleunigung bzw. Verzögerung des Fahr- bzw. Hubwerks werden Kraftübertragungselemente wie bspw. die Laufräder beschleunigt bzw. verzögert, wodurch zusätzliche Momente entstehen. Diese Momente werden im Simulationsmodell für das Fahrwerk im Parameter „Massenträgheitsmoment Laufrad“ und für das Hubwerk im Parameter „Massenträgheitsmoment Hubriemen-/Seiltrieb“ zusammengefasst. Für die Simulation werden die Daten der Seiltrommeln, Umlenkrollen, Laufräder und ZRS in der CAD-Umgebung berechnet. Hier sind die Materialien für die Komponenten definiert und die Massenträgheitsmomente werden exakt berechnet. Im Folgenden werden die Berechnungen der Massenträgheitsmomente für den Seiltrieb des APL und den Hubriementrieb des AKL kurz beschrieben.

Seiltrieb des APL

Der Seiltrieb des APL besteht aus der Seiltrommel, dem Hubseil und den Umlenkrollen für das Hubseil. Bei der Beschleunigung bzw. Verzögerung des Hubwagens werden die Seiltrommel, das Hubseil und die Umlenkrollen in Bewegung gesetzt, wodurch eine zusätzliche Kraft bzw. Moment entsteht. Um dieses Moment zu berechnen, werden die Massenträgheitsmomente der rotatorisch und translatorisch beschleunigten Elemente des Seiltriebs auf den Massenträgheitsmoment Seiltrieb J_{STges} reduziert. Dieser berechnet sich aus den Massenträgheitsmomenten der Umlenkrollen J_{URi} und der Seiltrommel J_{ST} , dem Gewicht des Hubseils m_{HS} und den Radien der Umlenkrollen r_{URi} sowie der Seiltrommel r_{ST} folgenderweise:

$$J_{STges} = r_{ST}^2 * \left(\sum \frac{J_{URi}}{r_{URi}^2} + m_{HS} \right) + J_{ST} \quad (5-1)$$

Das Massenträgheitsmoment des Seiltriebes ist bezogen auf die Getriebeabtriebswelle des Hubwerks.

Hubriementrieb des AKL

Der Hubriementrieb des AKL besteht aus einer angetriebenen Zahnriemenscheibe, zwei nicht angetriebenen Zahnriemenscheiben und dem Zahnriemen. Wie bei dem APL werden alle diese Komponenten beschleunigt und verzögert, wenn der Hubwagen beschleunigt oder verzögert wird. Die Massenträgheitsmomente der Komponenten werden auf das Massenträgheitsmoment des Hubriementriebs reduziert. Die Massenträgheitsmomente für die Zahnriemenscheiben sind im CAD-System berechnet worden. Das Massenträgheitsmoment des Hubriementriebs J_{HRT} berechnet sich aus den Massenträgheitsmomenten der angetriebenen Zahnriemenscheibe J_{ZRSan} und der nicht angetriebenen Zahnriemenscheiben J_{ZRSnan} , den Radien der angetriebenen ZRS r_{ZRSan} und der nicht angetriebenen ZRS r_{ZRSnan} sowie der Masse des Hubriemens m_{HR} und wird berechnet zu:

$$J_{HRT} = r_{ZRSan}^2 * \left(\frac{J_{ZRSnan}}{r_{ZRSnan}^2} + m_{HR} \right) + J_{ZRSan} \quad (5-2)$$

Das Massenträgheitsmoment des Hubriementriebs ist bezogen auf die Getriebeabtriebswelle des Hubwerks.

Wirkungsgrad eines Seiltriebs

Die Berechnung des Wirkungsgrades eines Seiltriebs wird in der DIN 15020 – Blatt 1 beschrieben. Der Wirkungsgrad berechnet sich mit dem Wirkungsgrad des Flaschenzugs η_S , dem Wirkungsgrad einer Seilrolle η_R , der Anzahl der festen Seilrollen zwischen Seiltrommel und Flaschenzug i und der Anzahl der Stränge des Flaschenzugs n der folgenden Formel [DIN-15020]:

$$\eta_S = (\eta_R)^{i_{SR}} * \eta_F = (\eta_R)^{i_{SR}} * \frac{1}{n} * \frac{1 - (\eta_R)^n}{1 - \eta_R} \quad (5-3)$$

Bei dem betrachteten APL gilt:

$$\eta_S = (0,98)^1 * \frac{1}{3} * \frac{1 - (0,98)^3}{1 - 0,98} = 0,96 \quad (5-4)$$

5.2.3 Kalibrierungs- und Validierungsdaten

In diesem Kapitel werden die Kalibrierungs- und Validierungsdaten und deren Erhebungsmethoden beschrieben. Die Validierung des Simulationsmodells erfolgt zum einen parallel zur Implementierung und zum anderen abschließend vor der Durchführung der Parameterstudie. Während der Implementierung werden Teilsysteme validiert. Hierfür werden Validierungsdaten von einer kurzen Zeitdauer mit einer hohen Auflösung benötigt, bspw. der Leistungsbedarf des RBG für eine einzelne Fahrt von Punkt A nach Punkt B. Für die abschließende Validierung des Gesamtsystems werden Validierungsdaten über mehrere Tage bis Wochen mit einer geringeren Auflösung verwendet. Im Folgenden wird kurz beschrieben, wie die Validierungsdaten erfasst und aufbereitet werden. Benötigt werden die technischen Daten des RBG und der Anlage, die Bewegungs- und die Materialflussdaten der RBG, der elektrische Leistungsbedarf und die Momentverläufe. Im Folgenden wird die Erhebung der Antriebsmomente, die der detaillierten Leistungsbedarfe, bspw. von einzelnen Fahrten, und die der Langzeitleistungsmessungen in den stationären Schaltschränken und die Durchführung der Referenzfahrten beschrieben.

Antriebsmoment

Das Antriebsmoment wird zur Validierung der Simulation des Antriebsmoments benötigt. Aufgezeichnet werden das Antriebsmoment des Fahrtriebs und des Hubtriebs mit der Diagnosefunktion des Umrichters. Mit Hilfe der Diagnosefunktion können Parameter der Antriebsregelung des Umrichters sowie Parameter der RBG-Steuerung aufgezeichnet werden. Mit der Konfigurationsmaske (siehe Abbildung 5-6) für die Aufzeichnung werden die Messparameter (2), der Trigger (1, 4) und die Abtastzeit (3) eingestellt. Gleichzeitig können mit dieser Funktion bis zu acht Messparameter aufgezeichnet werden. Der Trigger ist der Auslöser der Messung, welcher manuell über Schaltflächen (1) oder bspw. wie hier mit einem Signal (4) ausgelöst wird. Für die Aufzeichnungen des Antriebsmoments des Fahrwerks wurde der Zustand der Bremse als Auslösesignal verwendet. Die Aufzeichnung startet, wenn die Fahrwerksbremse öffnet. Zusätzlich können die Abtastzeit (3) und der Trigger-Nachlauf eingestellt werden. Die maximale Laufzeit (1) der Aufzeichnung ist deshalb abhängig von der Anzahl der Messparameter und der eingestellten Abtastzeit. Mit dem Trigger-Nachlauf wird der prozentuale Anteil der Messung eingestellt, der vor oder nach dem Auftreten des Trig-

gers aufgezeichnet werden soll. Für die Validierung der Simulation des Antriebsmoments werden neben dem Antriebsmoment die Position und die Geschwindigkeit aufgezeichnet.

Nachdem die Aufzeichnung der Messung vom Umrichter abgeschlossen ist, werden die Messdaten vom Umrichter in der Applikation des Herstellers aufbereitet und grafisch dargestellt (Abbildung 5-7). Die Messparameter sind in jeweils eigenen Kanälen abgespeichert, zur weiteren Verwendung müssen sie mit Hilfe der Herstellerapplikation in eine CSV-Datei exportiert und anschließend aufbereitet werden.

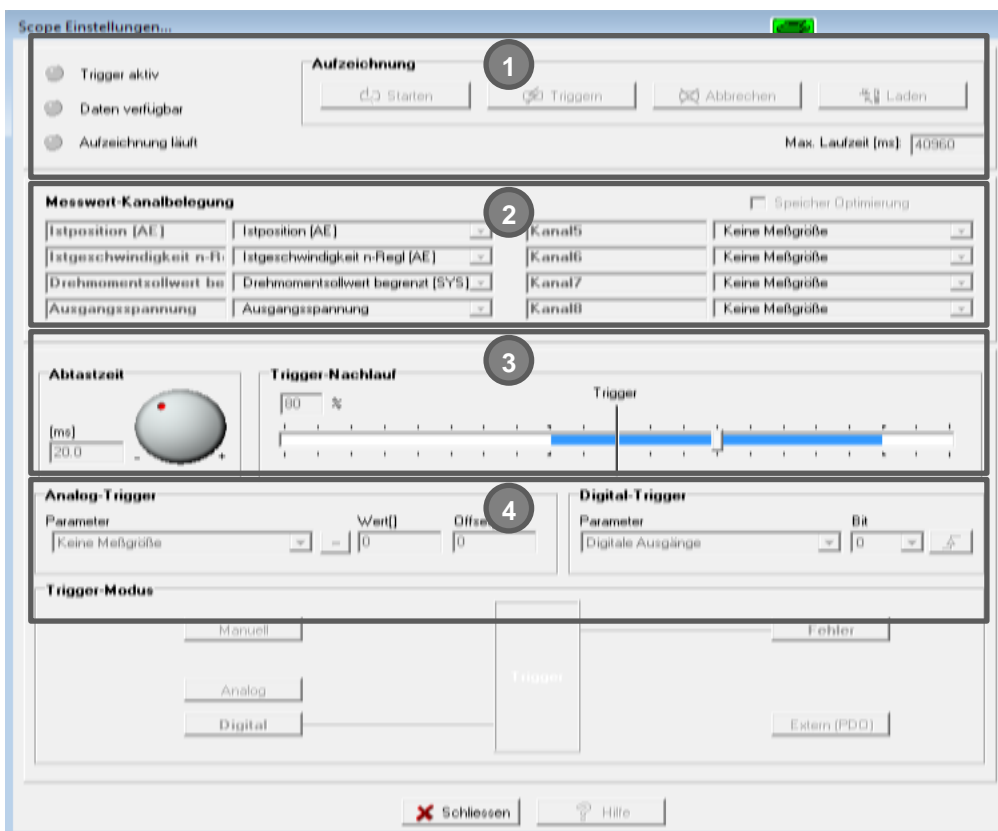


Abbildung 5-6: Aufzeichnungsfunktion des Umrichterherstellers (Screenshot SEW-Software)

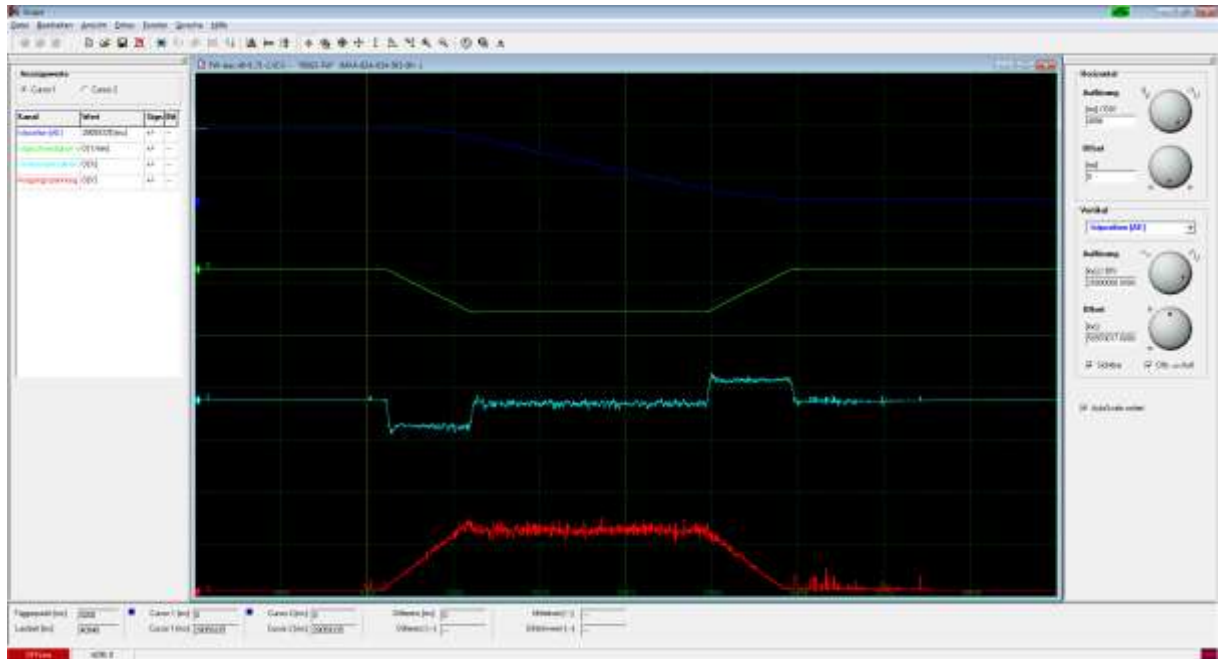


Abbildung 5-7: Darstellung der aufgezeichneten Messparameter mit Hilfe der Herstellerapplikation

Leistungs- und Energiebedarfsmessung Einzelfahrten

Für die Validierung der Leistungsberechnung und der RBG-Parameter des Simulationsmodells werden Leistungs- und Energiebedarfsmessungen an dem RBG durchgeführt. Hierfür werden von Referenzfahrten der Leistungs- und Energiebedarf gemessen. Zur Validierung wird der gemessene mit dem simulierten Leistungs- und Energiebedarf verglichen.

Der Energiebedarf des RBG wird mit einem Stromzangen-Leistungsmessgerät gemessen. Das Messgerät misst von einem 3-Phasen-System u. a. die Ströme, die Spannungen, den Leistungsfaktor sowie die Schein-, die Blind- und die Wirkleistung. Für die Validierung werden die Wirkleistung, der Energiebedarf und der Strombedarf des RBG oder des stationären Schaltschranks gemessen. Das Leistungsmessgerät mit Zubehör ist in der Abbildung 5-8 dargestellt.



Abbildung 5-8: Stromzangen-Leistungsmessgerät mit Zubehör (Quelle Foto: [HIO-2013])

Das Leistungsmessgerät ist ein HIOKI-Leistungs-Analysator (1). Dieses misst mit Stromzangen (2) die Stromstärken und mit Spannungsleitungen (3) die Spannungen der drei Phasen. Um den Energiebedarf des einzelnen RBG zu ermitteln, wird die Messung an der Gassenzuleitung durchgeführt (siehe Abbildung 5-9). Hierfür werden die Spannungsleitungen (1) und die Stromzangen (2) im stationären Schaltschrank an die Zuleitung für die Gasse angeschlossen.

Das Leistungsmessgerät erfasst mit der kleinsten Abtastrate alle 20 Millisekunden einen Messwert und speichert diesen auf der integrierten Speicherkarte. Wie bei der Aufzeichnung der Antriebsmomente werden Leistungsmessungen in einem nativen Dateiformat abgespeichert und für den Vergleich mit den Simulationsdaten mit der Anwendung des Herstellers aufbereitet.

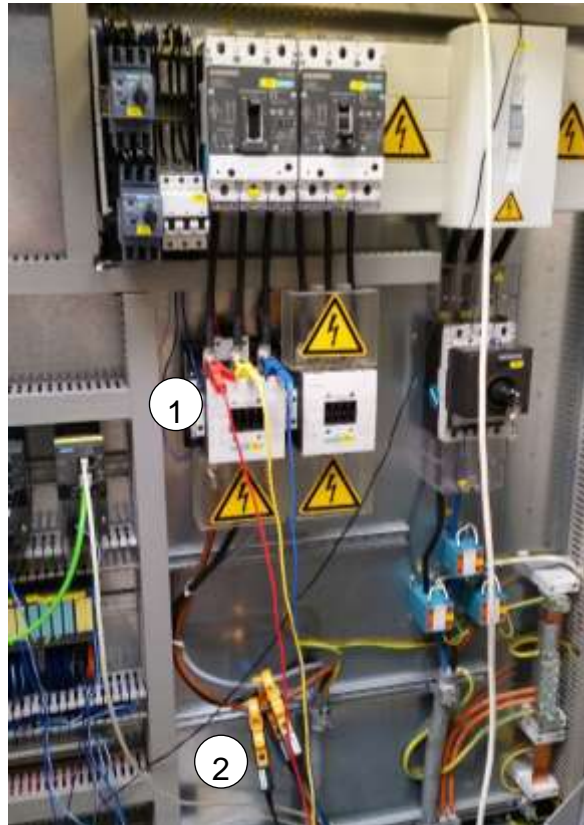


Abbildung 5-9: Anschluss des Leistungsmessgeräts für die Leistungsmessung an der Gassenzuleitung des RBG

Langzeitmessungen des Leistungs- und Energiebedarfs

Die Langzeitmessungen des Leistungs- und Energiebedarfs der stationären Schaltschränke werden für die Validierung der Leistungs- und Energiebedarfssimulation von Lagersystemen mit mehreren Gassen verwendet. Für die Langzeitmessungen des Energiebedarfs der stationären Schaltschränke werden SENTRON-PAC3200-Multifunktionsmessgeräte (siehe Abbildung 5-10) von Siemens eingesetzt. Sie messen u. a. den Strom und die Spannung und damit den Leistungs- bzw. Energiebedarf an der Zuleitung der stationären Schaltschränke. Die Stromstärke wird mit Stromwandlern gemessen. Die Leitungen zur Spannungsmessung werden direkt an die Klemmen des Multifunktionsmessgeräts angeschlossen. Zur Datenübertragung verfügt das Gerät über eine Ethernet-Schnittstelle.

Gemessen wird die kumulierte aufgenommene und abgegebene Energie. Bei einer Anlage mit dem LVS viadat fragt eine Routine regelmäßig die Messwerte des Multifunktionsmessgeräts ab und speichert sie in einer Datenbanktabelle. In dieser werden die Messwerte mindestens ein Jahr gespeichert. Normalerweise ist das Abfrageintervall auf 15 Minuten eingestellt und entspricht damit dem Messintervall der Lastgangmessung der EVU.



Abbildung 5-10: Multifunktionsmessgerät PAC3200 von Siemens [Sie-2016]

Für die Weiterverwendung werden die Daten von der Datenbank abgerufen und aufbereitet. Hierbei werden die aufgenommene Energie $E_{statSSauf}$ und die abgegebene Energie $E_{statSSab}$ im Intervall berechnet. Anschließend wird diese aus dem gesamten Energiebedarf des Stationären Schaltschranks $E_{statSSges}$ in den durchschnittlichen Leistungsbedarf P_{LMW} im Intervall umgerechnet:

$$P_{LMW}(t_n) = \frac{E_{statSSges}(t_n) - E_{statSSges}(t_{n-1})}{t_n - t_{n-1}} \quad (5-5)$$

$$E_{statSSges}(t) = E_{statSSauf}(t) - E_{statSSab}(t) \quad (5-6)$$

Referenzfahrten

Für die Validierung des Simulationsmodells werden der Leistungsbedarf und das Antriebsmoment von verschiedenen Referenzfahrten gemessen. Um die gemessenen Daten verwenden zu können, werden alle Parameter der verwendeten RBG dokumentiert. Die Referenzmessungen werden an AKL und APL durchgeführt. Es werden Fahrten mit isolierten Bewegungen einer Achse und kombinierte Bewegungen beider Achsen des RBG benötigt.

Zur Eingabe der Fahrten wird die RBG-Applikation des RBG-Herstellers verwendet. Hierfür werden das Startfach und das Zielfach eingegeben. Daraufhin fährt das RBG zum Startfach, führt dort den Aufnahme-LAM-Zyklus in der angegebenen Tiefe aus, fährt anschließend zum Zielfach und führt dort den Abgabe-LAM-Zyklus aus. Wenn

das RBG sich an dem Startfach befindet, wird die Fahrt zum Startfach nicht durchgeführt. Bei einer Tiefe von Null bleibt das RBG vor dem Regalfach stehen.

Um aus den Fachnummern die Fahrstrecke zu ermitteln, werden die Höhenkodetabellen des RBG benötigt. Diese sind die X-, die Y- und die Einzelhöhenkodetabelle. In den Tabellen ist für jedes Regalfach der Abstand in Millimeter vom Referenzpunkt eingetragen. Mit den ermittelten Fachkoordinaten wird die Wegstrecke der Fahrt in entlang der beiden Hauptachsen berechnet.

5.3 Kalibrierung und Validierung der RBG-Parameter

Bei der Kalibrierung und Validierung der RBG-Parameter werden die Parameter der RBG überprüft und ggf. korrigiert. Für die Kalibrierung werden die mitgeschriebenen Daten der Referenzmessungen mit den Simulationsdaten verglichen. Bei Abweichungen werden die RBG-Parameter korrigiert. Nach der Kalibrierung werden anhand von anderen Fahrten und Referenzmessungen, die nicht zur Kalibrierung des Simulationsmodells verwendet wurden, die Parameter validiert.

Die Parameter der Fahr- und Hubachse werden getrennt voneinander schrittweise kalibriert und in eigenen Unterkapiteln beschrieben. In dieser Arbeit werden vorerst die Parameter des AKL und anschließend die der APL kalibriert und validiert.

5.3.1 Fahrwerkparameter AKL

In diesem Kapitel wird die Kalibrierung der Fahrwerkparameter beschrieben. Für die Kalibrierung werden Referenzmessungen durchgeführt, diese mit den Simulationsdaten verglichen und bei einer unzureichenden Übereinstimmung die Parameter korrigiert. Während den Referenzmessungen werden das Antriebsmoment und der Leistungs- und Energiebedarf für die Bewegung aufgezeichnet. Mit den Messdaten des Antriebsmoments werden der Rollreibungskoeffizient, der Wirkungsgrad des Riementriebs, der geschwindigkeitsabhängige Fahrwiderstand und der Wirkungsgrad des Getriebes bei generatorischem Betrieb kalibriert. Für die Kalibrierung des Wirkungsgrads des Antriebsmotors wird die Leistungs- und Energiebedarfsmessung von isolierten Fahrten der Achsen und anschließend kombinierten Fahrten des RBG verwendet.

Der technische Aufbau der untersuchten AKL unterscheidet sich vom APL. Die AKL verfügen über eine Riementriebverbindung zwischen dem vorderen und hinteren Lauf- rad. Damit sind beide Räder miteinander verbunden und das Antriebsmoment kann vom einen zum anderen Antriebsrad übertragen werden. Da der Riementrieb einen

Wirkungsgrad aufweist, wird dieser bei der Kalibrierung berücksichtigt. Die Parameter des AKL-Fahrwerks werden in der nachfolgenden Reihenfolge kalibriert:

1. Rollreibungskoeffizient der Lauf- bzw. Antriebsrolle
2. Wirkungsgrad des Riementriebs des AKL-Fahrwerks (Nur bei AKL)
3. Geschwindigkeitsabhängiger Fahrwiderstand
4. Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei generatorischem Betrieb
5. Wirkungsgrad des Antriebsmotors

Für alle Kalibrierungen 1-3 des Antriebsmotors wird das im Umrichter mitgeschriebene Antriebsmoment mit dem simulierten Antriebsmoment verglichen. Für die Kalibrierung des Antriebswirkungsgrades wird der an der Gassenzuleitung gemessene elektrische Leistungsbedarf des RBG mit dem simulierten Leistungsbedarf verglichen.

Rollreibungskoeffizient der Antriebsrollen des Fahrwerks

Mit dem Rollreibungskoeffizienten der Antriebsrollen des Fahrwerks berechnet sich der Rollwiderstand des Fahrwerks. Die Antriebsräder des untersuchten AKL bestehen aus Vulkollan, das laut Herstellerangaben einen Rollwiderstand von 0,8-0,9 % hat. Für die Kalibrierung wird der Moment des FW-Antriebs aufgezeichnet. Der Wirkungsgrad des Zahnriementriebs zwischen den beiden Antriebsrädern wird für die Kalibrierung des Rollreibungskoeffizienten bei der Herstellerangabe von 0,98 belassen. Der geschwindigkeitsabhängige Fahrwiderstand wird auf Null gesetzt. Der Rollreibungskoeffizient wird in verschiedenen Stufen simuliert und mit dem Antriebsmoment verglichen. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 5-11 zu sehen. Ein Rollreibungskoeffizient von 0,9 wird für die weitere Simulation verwendet, da mit diesem das aufgezeichnete Moment am Anfang der Phase mit konstanter Beschleunigung und am Ende der Phase mit konstanter Verzögerung am genauesten nachgebildet wird. Zusätzlich weist der Rollreibungskoeffizient von 0,9 den geringsten Fehlerwert auf.

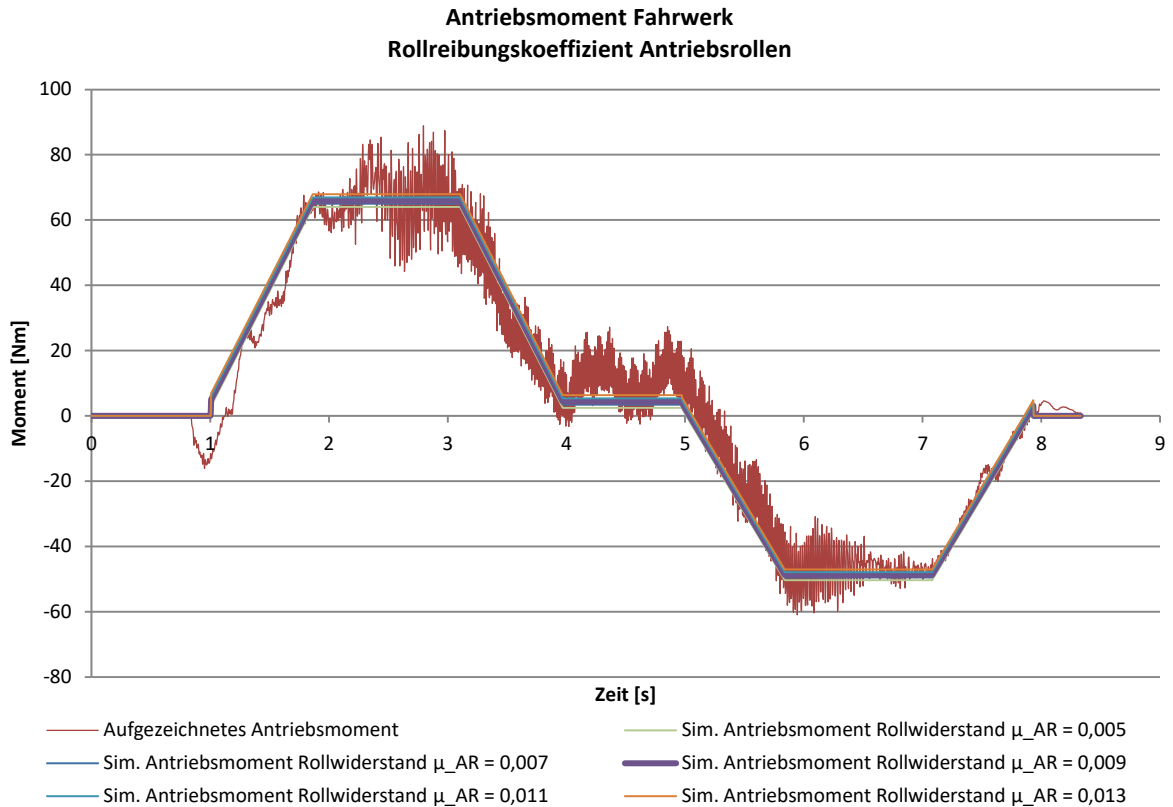


Abbildung 5-11: Antriebsmoment FW Kalibrierung Rollwiderstand Fahrwerk

Wirkungsgrad des Riementriebs des AKL Fahrwerks

Wie bereits beschrieben, sind die beiden Antriebsräder des AKL mit einem Riementrieb verbunden. Dieser hat einen vom Hersteller angegebenen Wirkungsgrad von 0,98. In diesem Schritt wird der Wirkungsgrad des Riementriebs von 0,95 auf 0,99 in Schritten von 0,01 gesteigert um ihn zu kalibrieren.

In Abbildung 5-12 ist das simulierte Antriebsmoment mit den unterschiedlichen Wirkungsgraden des Riementriebs dargestellt. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass ein geringerer Wirkungsgrad das Antriebsmoment hauptsächlich während der Beschleunigungsphasen erhöht. Da der WG des Fahrwerkriementriebs das Antriebsmoment in der Beharrungsphase nicht beeinflusst, wird ein WG von 0,97 verwendet.

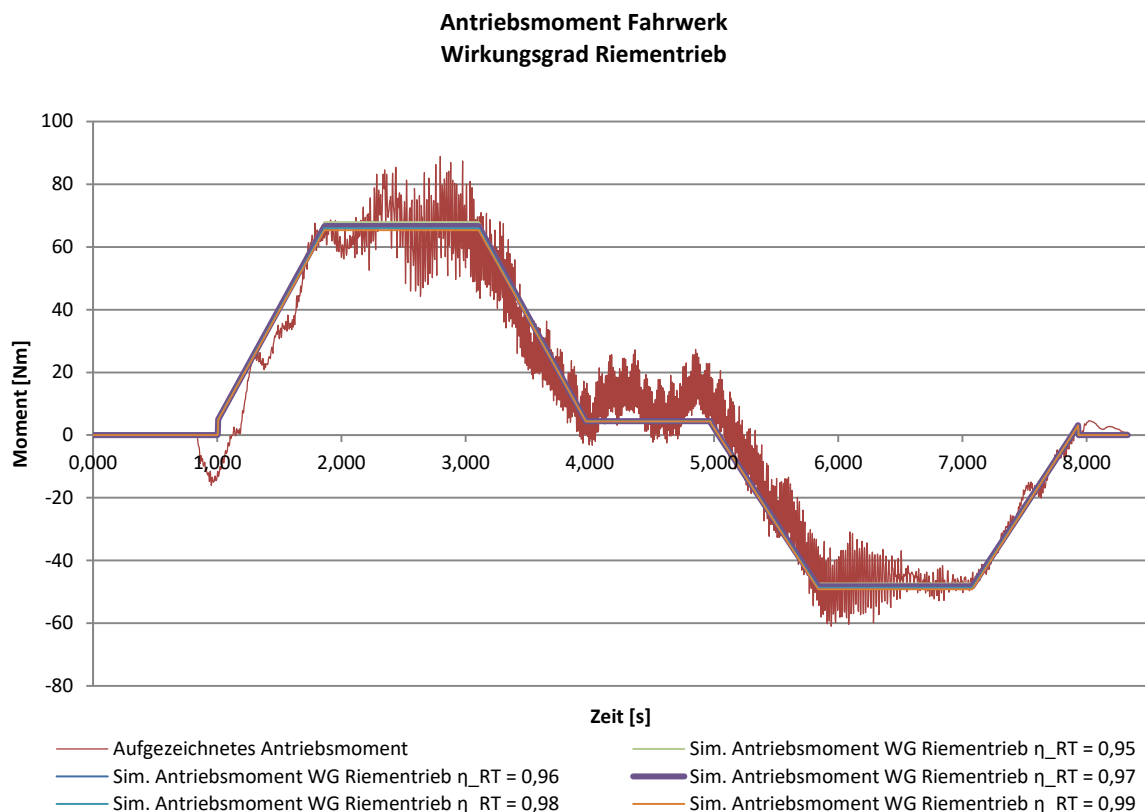


Abbildung 5-12: Antriebsmoment FW Kalibrierung Wirkungsgrad Riementrieb

Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand

Der geschwindigkeitsabhängige Rollwiderstand wächst abhängig von der Geschwindigkeit an. Dieser Wert ist in den Herstellerangaben der Komponenten nicht zu finden. Wegen der Charakteristik des Antriebsmoments hat sich dieser Wert ergeben. Das Moment ist in der Phase 4 (Fahrt mit maximaler, konstanter Geschwindigkeit) höher als der simulierte Wert. Zusätzlich steigt das Antriebsmoment zum Ende der Phase 2 (Phase mit konstanter Beschleunigung) an. Für die Kalibrierung wird der geschwindigkeitsabhängige Rollwiderstand von 0 auf 100 N/(m/s) in 25 N/(m/s) Schritten erhöht. Die Ergebnisse davon sind in Abbildung 5-13 dargestellt. Ein geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand von 75 N/(m/s) bewirkt in der Phase 4 der Fahrt eine gute Übereinstimmung der Kurven und wird für die weitere Simulation der AKL dieses Typs verwendet.

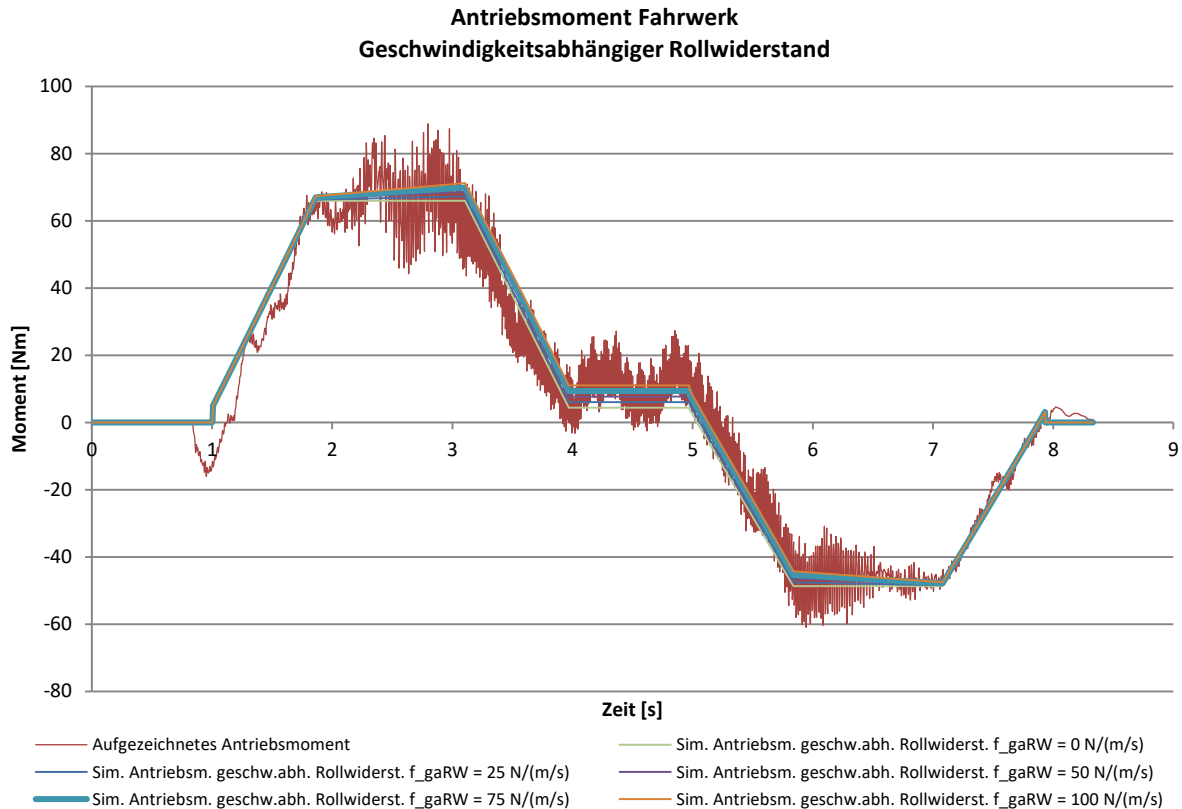


Abbildung 5-13: Antriebsmoment FW Kalibrierung geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand

Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei generatorischem Betrieb

Die Getriebe von RBG weisen beim Antreiben einen hohen Wirkungsgrad auf. Beim Verzögern des RBG wird die Energie vom Antriebsrad über das Getriebe zu dem Antrieb übertragen. Hierbei ist der Wirkungsgrad geringer als beim Antreiben. In der Simulation existiert für diesen Schachverhalt der Parameter „Wirkungsgradreduzierung bei Rückspeisung“ (des Getriebes). Die Wirkungsgradreduzierung bei Rückspeisung wird von 0 auf 0,1 in 0,025-Schritten erhöht und ist in der Abbildung 5-14 dargestellt. Bei einem Wert von 0,025 ist der Fehlerwert am kleinsten.

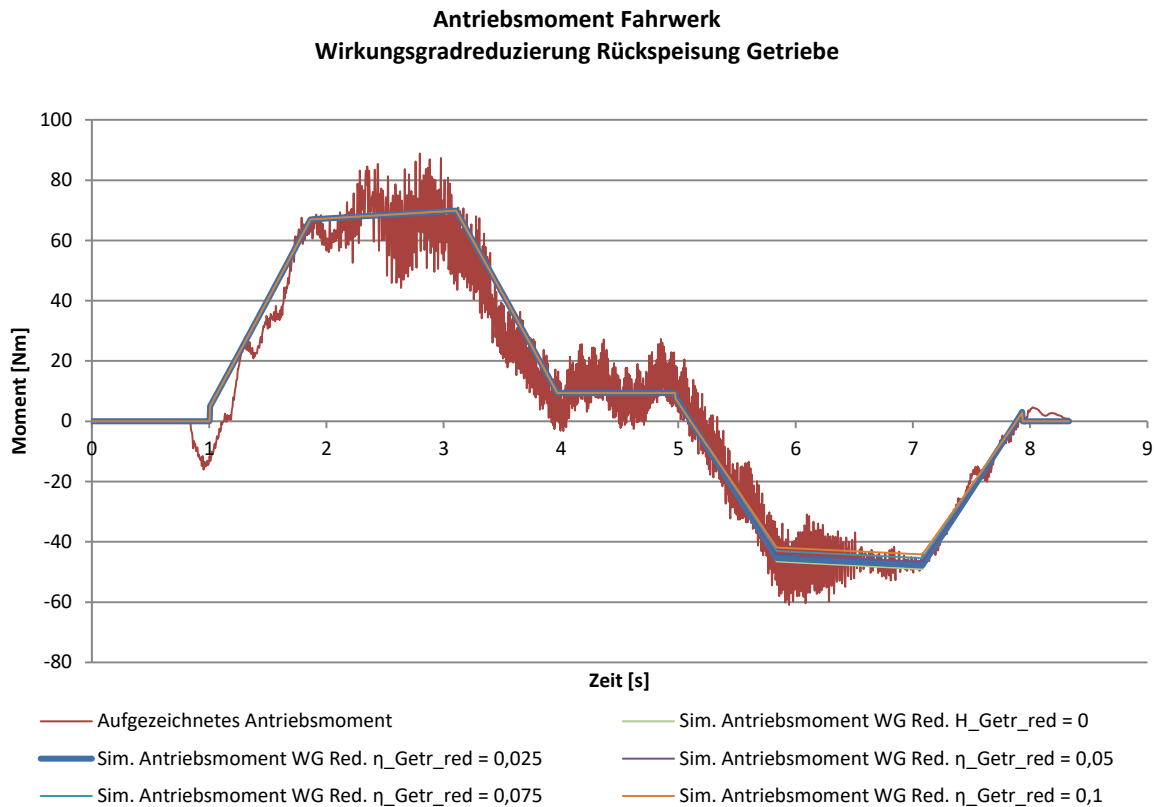


Abbildung 5-14: Antriebsmoment FW Kalibrierung Wirkungsgradreduzierung Rückspeisung Getriebe

Wirkungsgrad des Antriebsmotors

Abschließend wird der Wirkungsgrad des Antriebsmotors kalibriert. Der Wirkungsgrad der eingesetzten Antriebe ist abhängig von der Antriebsdrehzahl und dem Antriebsmoment. In Abbildung 5-15 ist der Leistungsverlauf einer Fahrt mit einer maximalen Geschwindigkeit von 4 m/s dargestellt. Der Antrieb ist für eine maximale Geschwindigkeit von 6 m/s ausgelegt. Hierdurch arbeitet der Antrieb in einem schlechteren Wirkungsgradbereich als bei einer Geschwindigkeit von 6 m/s. In der Abbildung ist zusätzlich zu sehen, dass, wenn die simulierte Leistungsspitze mit der gemessenen Leistungsspitze beim Beschleunigungsvorgang übereinstimmt, der simulierte Leistungsbedarf während der Beharrung zu niedrig ist. Dies ist auch an der niedrigeren Steigung des Energiebedarfs zwischen der 6. und 10. Sekunde zu sehen. Das resultiert aus einer geringeren Auslastung und somit einem geringeren Wirkungsgrad des Antriebs während der Beharrung. Um den Energiebedarf für die gesamte Fahrt richtig zu berechnen, sollte ein Wirkungsgrad für den Antrieb von 0,79 verwendet werden. Mit diesem Wirkungsgrad wird der Energiebedarf für diese Strecke richtig berechnet. Aufgrund der unterschiedlichen Steigung in der Beharrungsphase wird mit dieser Parametereinstellung abhängig von der Strecke ein zu hoher oder zu niedriger Energiebedarf berechnet. Zusätzlich wird eine zu hohe Leistungsspitze berechnet.

Im Bereich der Verzögerung (ca. 10. bis 13. Sekunde) ist eine Abweichung der Kurven zu sehen. Diese resultiert aus einem Programmierfehler der RBG-Steuerung. Der Startzeitpunkt des Hubwerks wird bei sehr kurzen Fahrten falsch berechnet. Der Fehler konnte während den Messungen nicht korrigiert werden und wurde nicht in das Simulationsmodell programmiert.

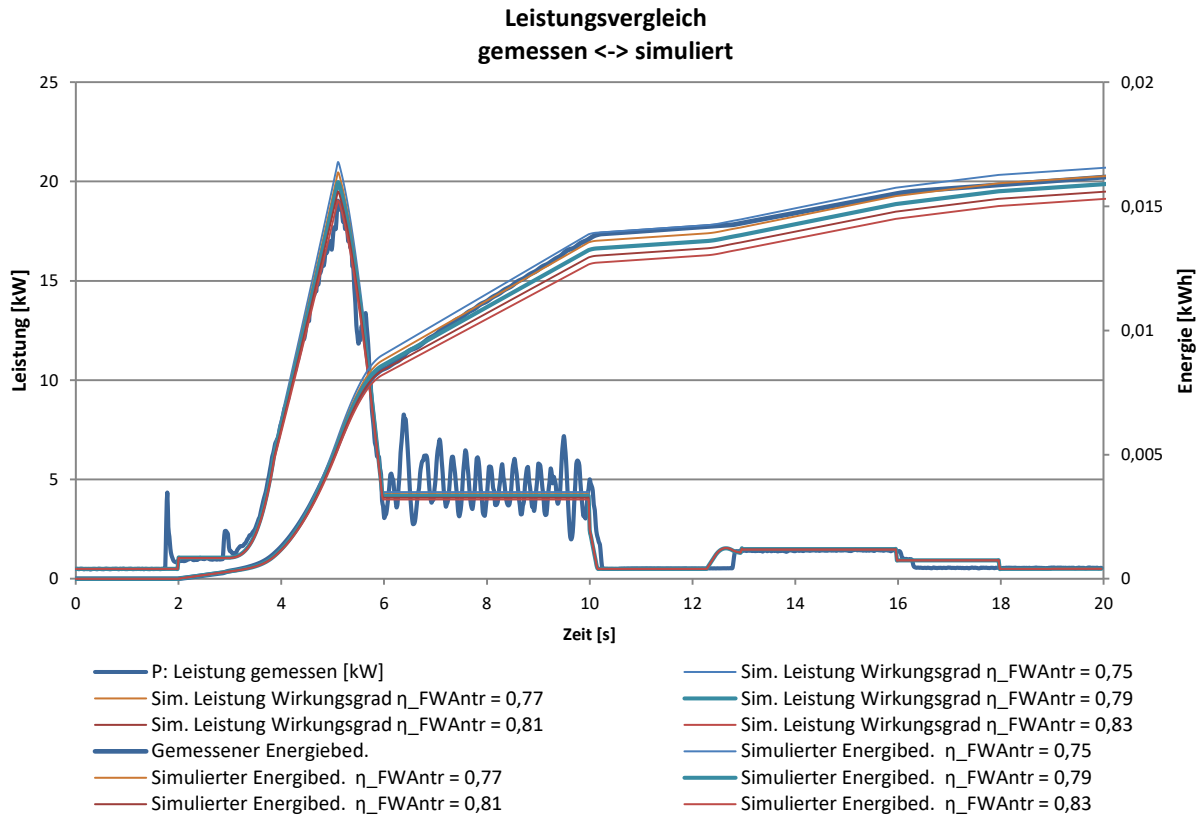


Abbildung 5-15: Leistungsbedarf FW Kalibrierung Wirkungsgrad Antrieb

In Abbildung 5-15 ist der Leistungsbedarf der Fahrt mit einem geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstand von 95 N/(m/s) abgebildet. Wie zu sehen ist, stimmt hier der Energiebedarfsverlauf von der Simulation mit einem Antriebswirkungsgrad über die gesamte Länge exakter überein. Der maximale Leistungsbedarf in der Beschleunigungsphase wird mit diesen Simulationsparametern zu hoch berechnet. Durch eine zu hohe Leistung kann es bei der Simulation zu mehr Verzögerungen durch das LM kommen und das Ergebnis für die Durchsatzleistungs-Reduzierung größer sein als an einer realen Anlage. Für die weitere Berechnung wird ein Antriebswirkungsgrad von 0,80 für den Fahrwerksantrieb verwendet.

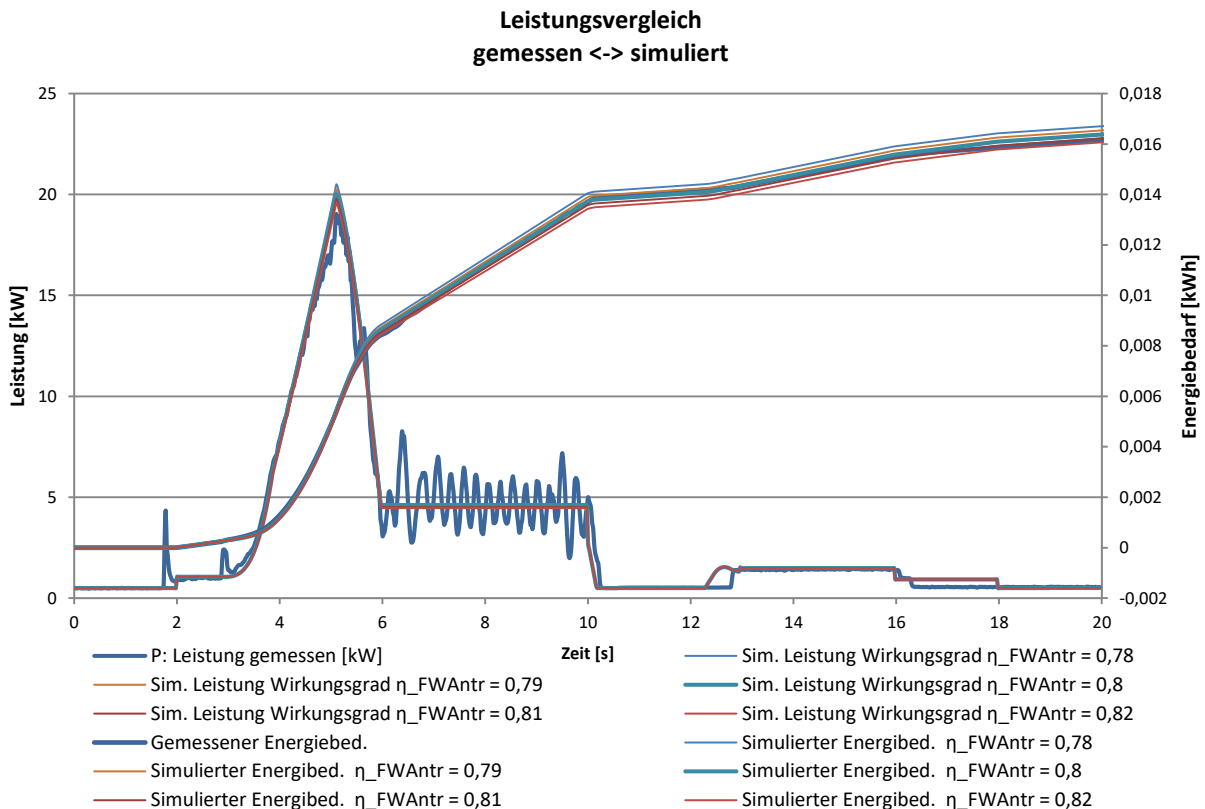


Abbildung 5-16: Leistungsbedarf FW Kalibrierung Wirkungsgrad Antrieb AKL geschwindigkeitsabhängiger Fahrwiderstand 95 N/(m/s)

5.3.2 Hubwerksparameter AKL

Das Hubwerk wird analog zum Fahrwerk kalibriert. Mit Hilfe des aufgezeichneten Antriebsmoments des Hubantriebs wird der Wirkungsgrad des Hubriementriebs, der Koeffizient der Rollreibung, der geschwindigkeitsabhängige Fahrwiderstand und die Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei generatorischem Betrieb kalibriert. Mit der Leistungsmessung am Gassenzugang wird der Wirkungsgrad des Antriebsmotors kalibriert. Die Parameter des Hubwerks werden in der nachfolgenden Reihenfolge kalibriert:

1. Wirkungsgrad des Hubriemen- bzw. Seiltriebs
2. Koeffizient der Rollreibung der Laufrollen
3. Geschwindigkeitsabhängiger Fahrwiderstand
4. Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei generatorischem Betrieb
5. Wirkungsgrad des Antriebsmotors

Die Kalibrierungen 1 bis 3 werden bei einer Hubfahrt durchgeführt, da dabei der Antrieb treiben muss. Die Kalibrierung der Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei

generatorischem Betrieb wird bei einer Senkfahrt durchgeführt. Die abschließende Kalibrierung des Hubwerksantriebs wird bei einer Hubfahrt durchgeführt.

Wirkungsgrad des Hubriemen- bzw. Seiltriebs

Das AKL hebt den Hubwagen mithilfe eines Hubriementriebs, der an zwei Zahnriemenscheiben umgelenkt und an einer angetriebenen Zahnriemenscheibe angetrieben wird. Der Hersteller gibt für den Hubriementrieb einen Wirkungsgrad von 0,98 an. Wie in Abbildung 5-17 dargestellt, wird ein Wirkungsgrad von 0,97 für die Simulation verwendet. Bei einem niedrigeren Wirkungsgrad wird das Antriebsmoment in der Anfangsphase der Bewegung zu groß. Bei einem höheren ist der Abstand der Kurven zu groß.

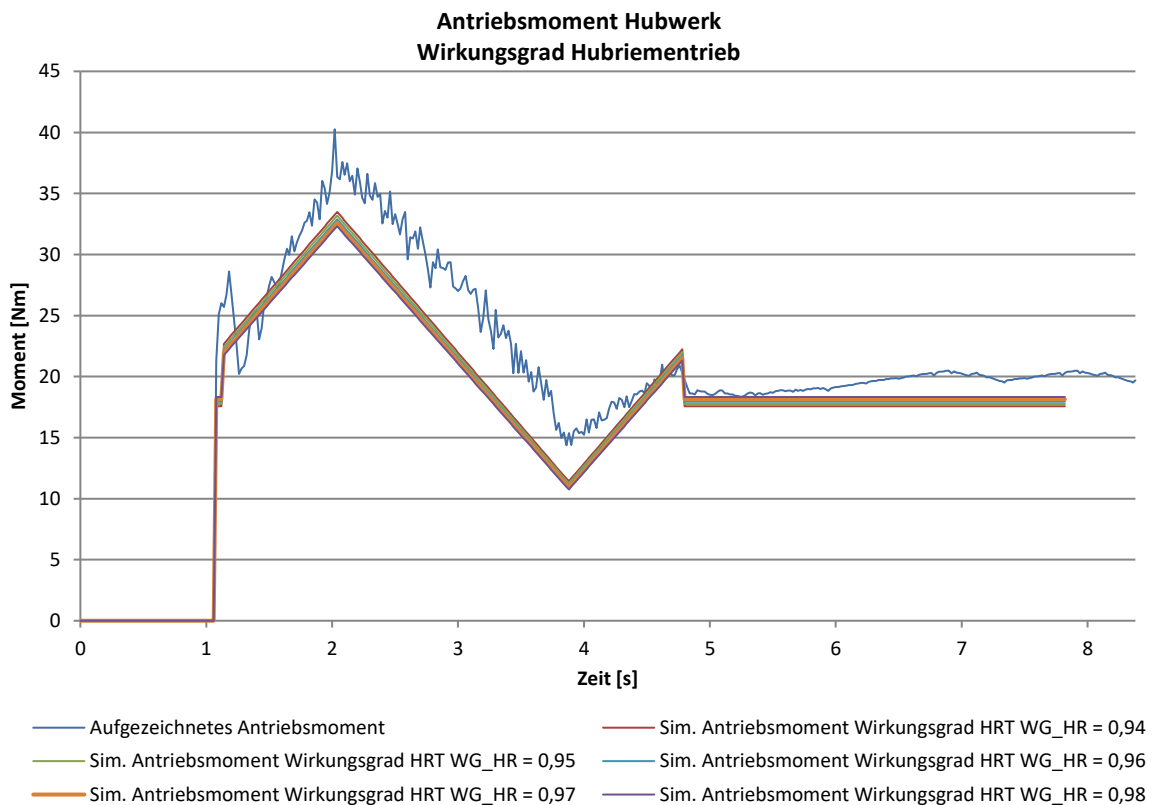


Abbildung 5-17: Antriebsmoment HW Kalibrierung Wirkungsgrad Hubriementrieb.

Rollreibungskoeffizient der Laufrollen

Die Kalibrierung des Rollreibungskoeffizienten der Laufrollen des Hubwagens ist in Abbildung 5-18 dargestellt. Dieser wird in 0,004s-Schritten von 0,004 auf 0,02 variiert. Wie zu sehen ist, hat die Rollreibung der Laufrollen wenig Einfluss auf das Antriebsmoment. Aus diesem Grund wird für die Simulation dieses AKL-Typs der vom Hersteller angegebene Rollreibungskoeffizient von 0,8 % verwendet.

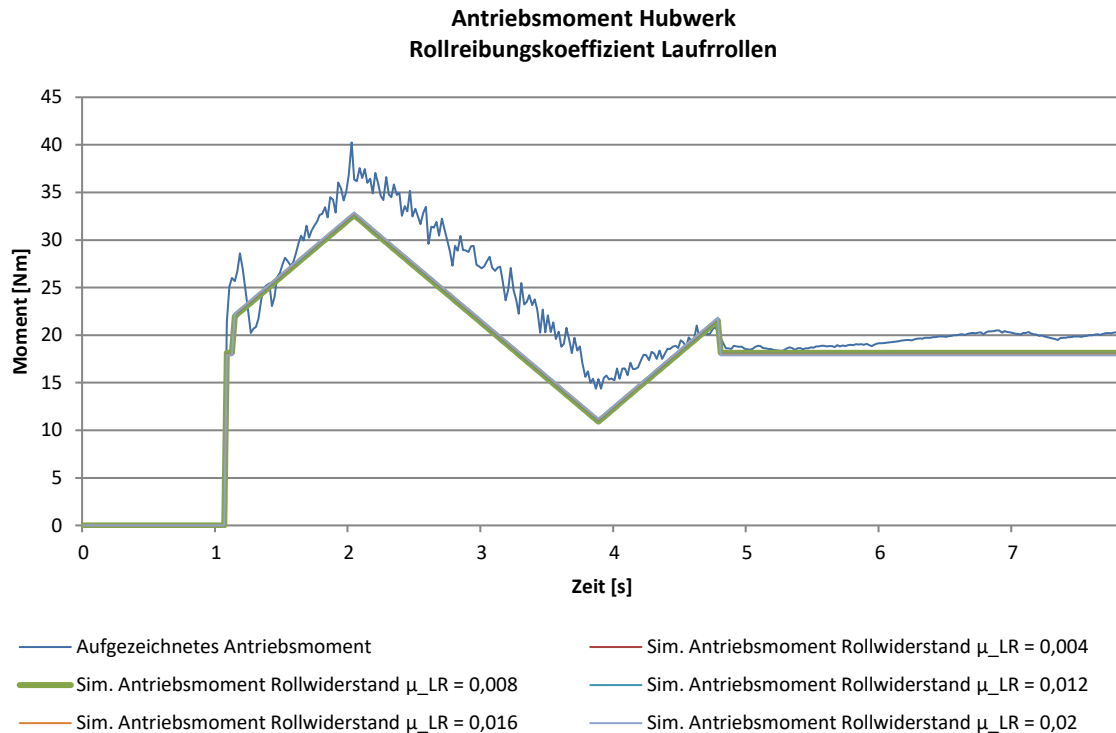


Abbildung 5-18: Antriebsmoment HW Kalibrierung Rollreibungskoeffizient Laufrollen AKL

Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand

In Abbildung 5-19 ist die Kalibrierung des geschwindigkeitsabhängigen Rollwiderstands des Hubwerks dargestellt. Dieser wird schrittweise von 200 N/(m/s) auf 280 N/(m/s) in Schritten von 20 N/(m/s) variiert. Mit Hilfe des geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstands kann das Antriebsmoment des Hubantriebs sehr gut nachgebildet werden. Die Ursache für diesen Effekt wurde nicht ermittelt. Möglicherweise sind last- oder geschwindigkeitsabhängige Wirkungsgrade hierfür die Ursache. Für die Simulation wird ein geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand von 225 N/(m/s) verwendet.

Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei generatorischem Betrieb

In Abbildung 5-20 ist die Kalibrierung der Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei generatorischem Betrieb abgebildet. Die Wirkungsgradreduzierung wurde von 0,05 in 0,025-Schritten auf 0,15 gesteigert. Wie zu sehen ist, hat diese einen Einfluss auf das Antriebsmoment des Hubantriebs. Eine Reduzierung des Getriebewirkungsgrades bei generatorischem Betrieb von 0,125 wird für die weitere Simulation verwendet.

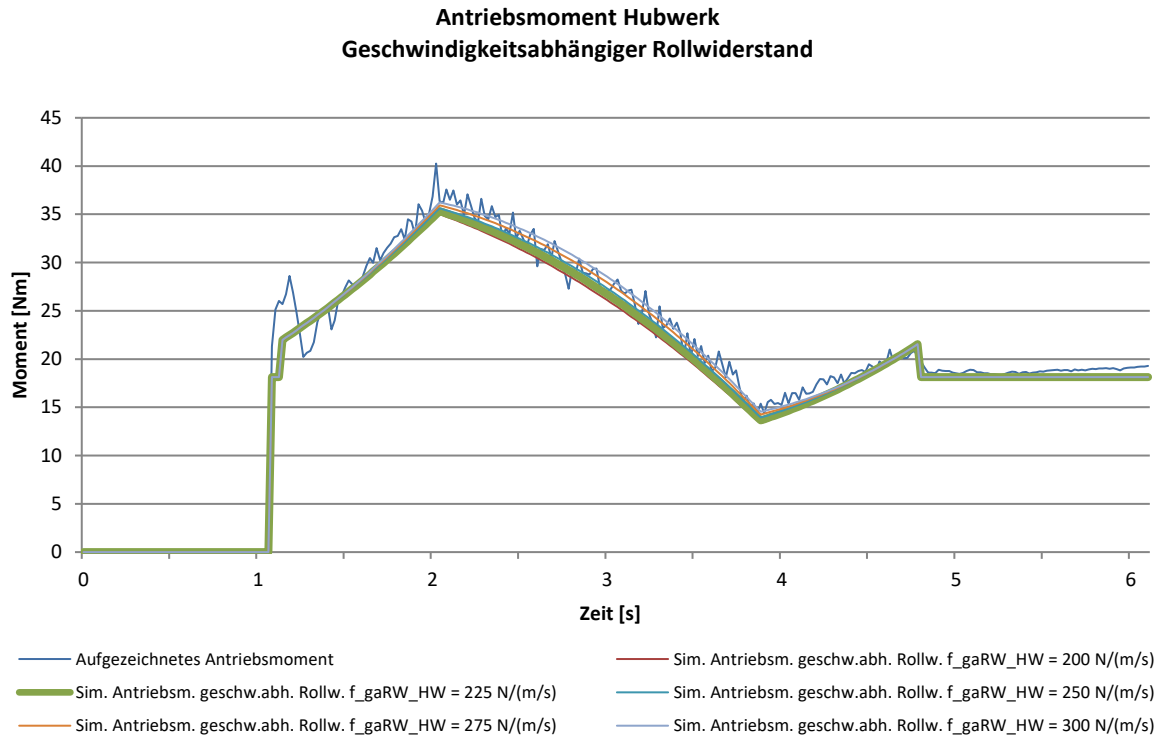


Abbildung 5-19: Antriebsmoment HW Kalibrierung geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand

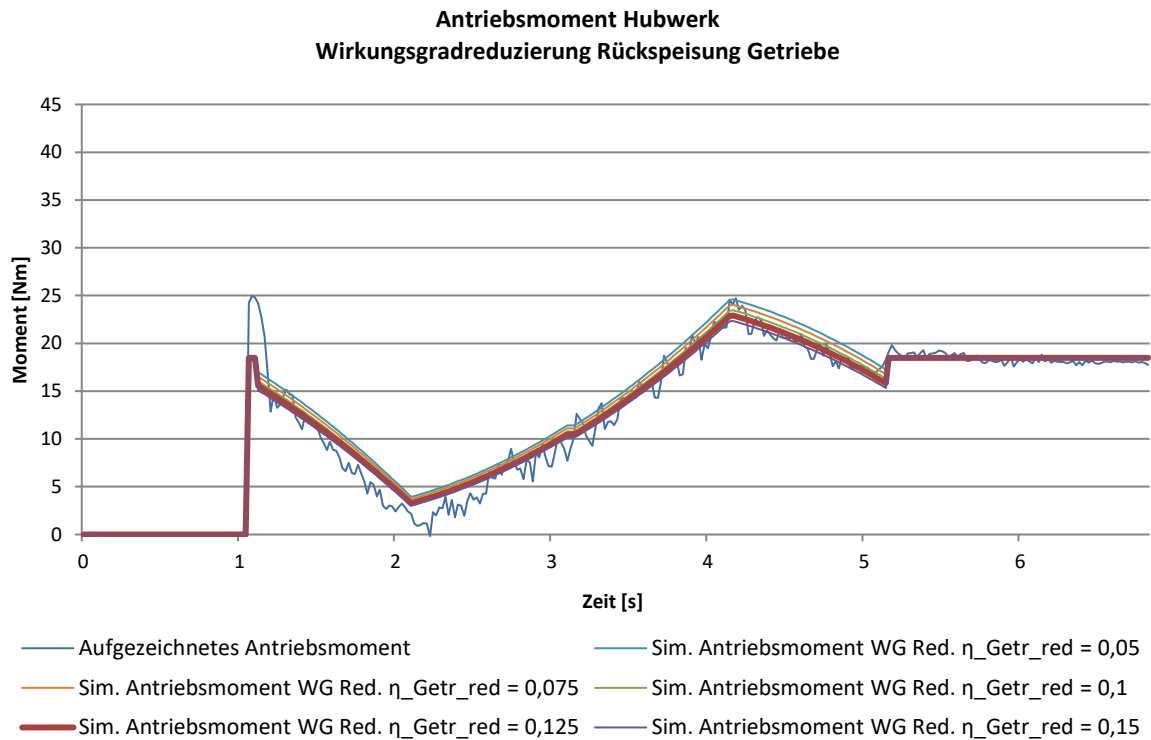


Abbildung 5-20: Antriebsmoment FW Kalibrierung Wirkungsgradreduzierung Rückspeisung Getriebe

Wirkungsgrad des Antriebsmotors

In Abbildung 5-21 ist die Kalibrierung des Antriebswirkungsgrads für den Hubwerksantrieb bei einer Hubfahrt dargestellt. Der Wirkungsgrad von 0,78 ergibt den kleinsten Fehlerwert. Für die Simulationen und die weiteren Validierungen wird dieser Wirkungsgrad für den Hubwerksantrieb verwendet.

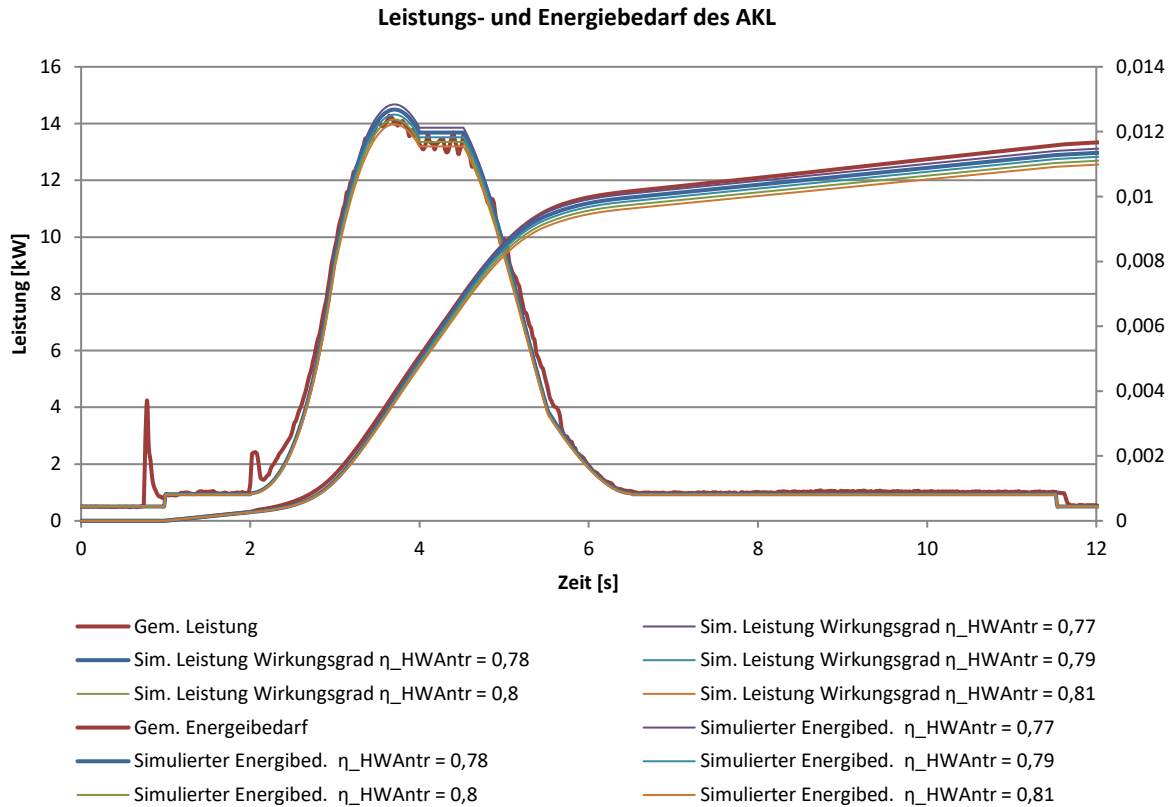


Abbildung 5-21: Leistungsbedarf HW Kalibrierung Wirkungsgrad Antrieb

5.3.3 Fahrwerksparameter APL

Dieses Kapitel beschreibt die Kalibrierung der Fahrwerksparameter des APL. Für die Kalibrierung werden Referenzmessungen durchgeführt, diese mit den Simulationsdaten verglichen und bei einer unzureichenden Übereinstimmung die Parameter korrigiert. Die Kalibrierung erfolgt analog zur Kalibrierung des AKL.

Wie im Kapitel 5.3.1 beschrieben, unterscheidet sich der technische Aufbau der untersuchten APL von dem der AKL. Die APL verfügen über keine Riementriebverbindung zwischen dem vorderen und hinteren Laufrad. Die Parameter des APL-Fahrwerks werden in der nachfolgenden Reihenfolge kalibriert:

1. Rollreibungskoeffizient der Lauf- bzw. Antriebsrolle
2. Geschwindigkeitsabhängiger Fahrwiderstand
3. Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei generatorischem Betrieb
4. Wirkungsgrad des Antriebsmotors

Für die Kalibrierungen 1 bis 3 des Antriebsmotors wird das im Umrichter mitgeschriebene Antriebsmoment mit dem simulierten Antriebsmoment verglichen. Für die Kalibrierung des Antriebswirkungsgrades wird der an der Gassenzuleitung gemessene elektrische Leistungsbedarf des RBG mit dem simulierten Leistungsbedarf verglichen.

Rollreibungskoeffizient der Antriebsrollen des Fahrwerks

Der Rollreibungskoeffizient der Antriebsrollen des Fahrwerks wird für die Berechnung des Rollwiderstands des Fahrwerks verwendet. Die Antriebsrollen des untersuchten APL bestehen wie die Fahrschiene aus Stahl. Der Hebelarm f der Rollreibung für diese Kombination ist $f \approx 0,05 \text{ cm}$ [Dub-2007]. Der Rollreibungskoeffizient μ_{rLRFW} berechnet sich mit dem Hebelarm der Rollreibung f und dem Radius des Laufrads r_{LR} nach folgender Formel:

$$\mu_{rLRFW} = \frac{f}{r} = \frac{0,05 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} = 0,0025 \quad (5-7)$$

Die Antriebsrollen haben einen Rollwiderstand von 0,25 % der Normallast auf die Laufäder. Um ein möglichst gutes Ergebnis zu erlangen, wird dieser Wert für diesen APL-Typ zusätzlich kalibriert. Hierfür wird der geschwindigkeitsabhängige Fahrwiderstand auf null gesetzt und der Rollreibungskoeffizient in den Stufen 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; und 0,3 % simuliert (siehe Abbildung 5-22). Aus dem Vergleich ergibt sich ein Rollreibungskoeffizient von 0,2, da mit diesem die Summe der Abstandskvadrat zwischen dem

gemessenen und simulierten Antriebsmoment in der Verzögerungsphase am niedrigsten ist. Ein höherer Rollreibungskoeffizient würde den Momentverlauf in der Verzögerungsphase nach oben verschieben, was mit den nachfolgenden Parametern nicht umgekehrt werden kann.

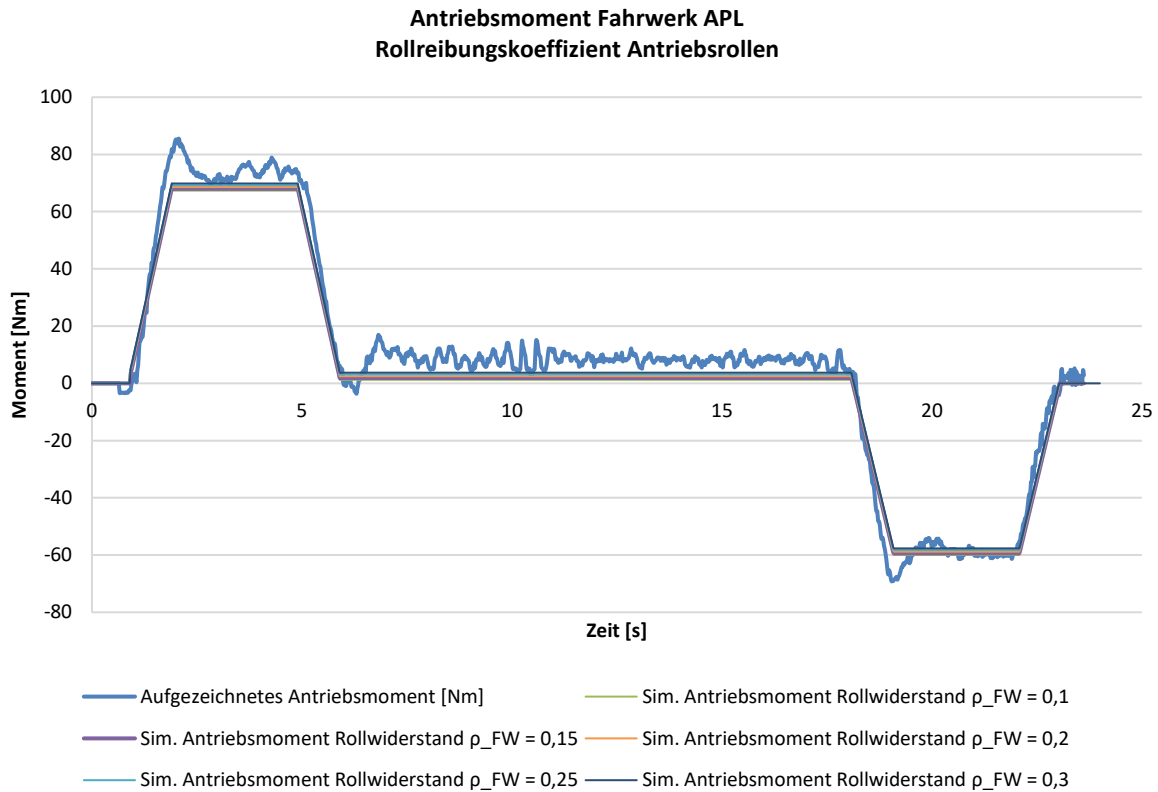


Abbildung 5-22: Antriebsmoment Fahrwerk APL Rollwiderstand Laufräder

Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand

Für die Kalibrierung des geschwindigkeitsabhängigen Rollwiderstands des APL wird dieser von 200 auf 280 N/(m/s) in 20 N/(m/s) Schritten erhöht. Die Ergebnisse davon sind in Abbildung 5-23 dargestellt. Ein geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand von 260 N/(m/s) wird für die weitere Simulation der APL dieses Typs verwendet, da dieser die kleinste Summe der Abstandsquadrate erzeugt.

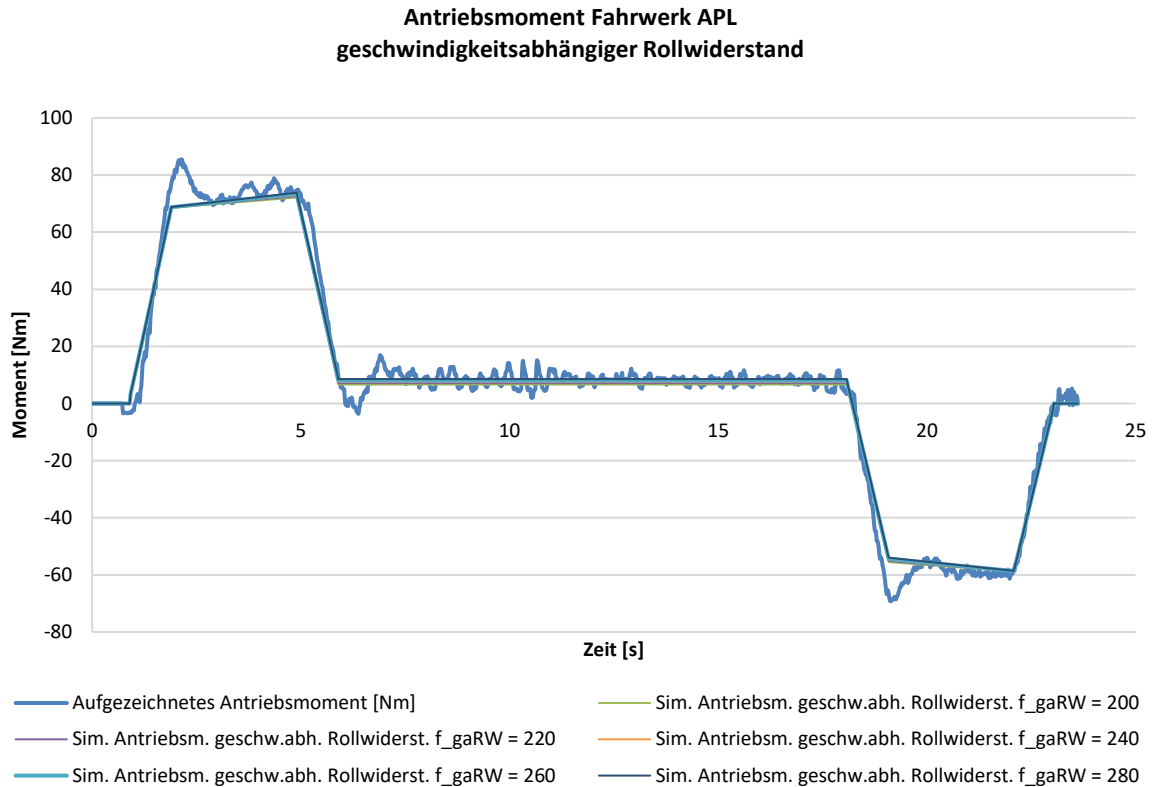


Abbildung 5-23: Antriebsmoment Fahrwerk APL geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand

Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei generatorischem Betrieb

Die Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei Rückspeisung wird bei den APL von 0 bis 0,04 in 0,01 Schritten erhöht. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 5-24 dargestellt. Bei einem Wert von 0 wird der Antriebsmoment sehr gut nachgebildet und die Summe der Abstandsquadrate ist am kleinsten.

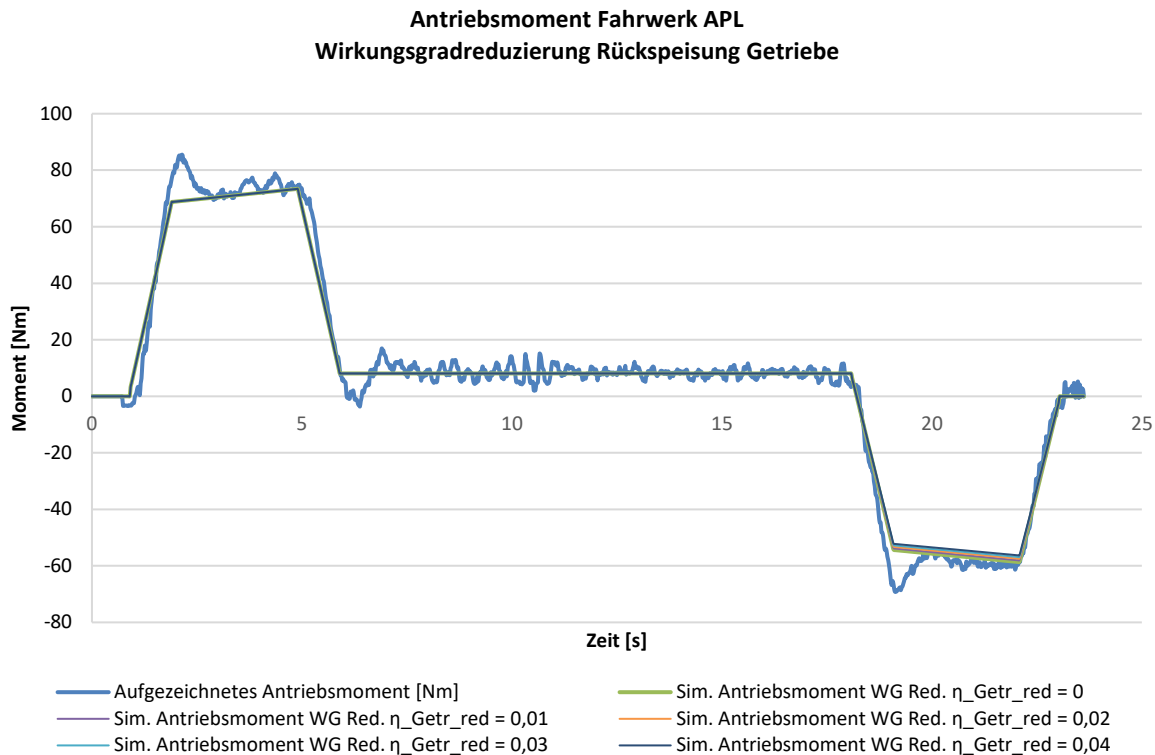


Abbildung 5-24: Antriebsmoment Fahrwerk APL Wirkungsgradreduzierung Rückspeisung Getriebe

Wirkungsgrad des Antriebsmotors

Abschließend wird bei dem Fahrwerk des APL der Wirkungsgrad des Antriebsmotors kalibriert. Der Wirkungsgrad der eingesetzten Antriebe ist abhängig von der Drehzahl und dem Moment des Antriebs. Diese Abhängigkeit ist nicht im Simulationsmodell nachgebildet. Deshalb muss der Antriebswirkungsgrad bestmöglich kalibriert werden. Bei dem APL wird dieser von 0,8 bis 0,88 in Schritten von 0,02 variiert. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 5-25 dargestellt.

Am Anfang der Kurve ist ein Leistungsanstieg zu sehen. Dieser Leistungsbedarf entsteht durch einen Aushub ohne Zuladung, welcher aufgrund der Steuerung der RBG automatisch durchgeführt wird. Mit einem Antriebswirkungsgrad des Fahrwerksantriebs von 0,84 weichen der simulierte und der gemessene Energiebedarf dieser Fahrt um 0,8 % voneinander ab. Die Steigungen der Energiebedarfe unterscheiden sich während der Beharrungsphase. Da die Steigung des gemessenen Energiebedarfs geringer als die der simulierten Energiebedarfe ist, wird der Energiebedarf einer längeren Fahrt zu hoch und einer kürzeren Fahrt zu niedrig berechnet. Aus diesem Grund ist in Abbildung 5-26 der Leistungsbedarf und der Energiebedarf der Fahrt mit einem geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstand von 240 N/(m/s) dargestellt. Die Steigung der Energiebedarfskurve stimmt damit exakter überein.

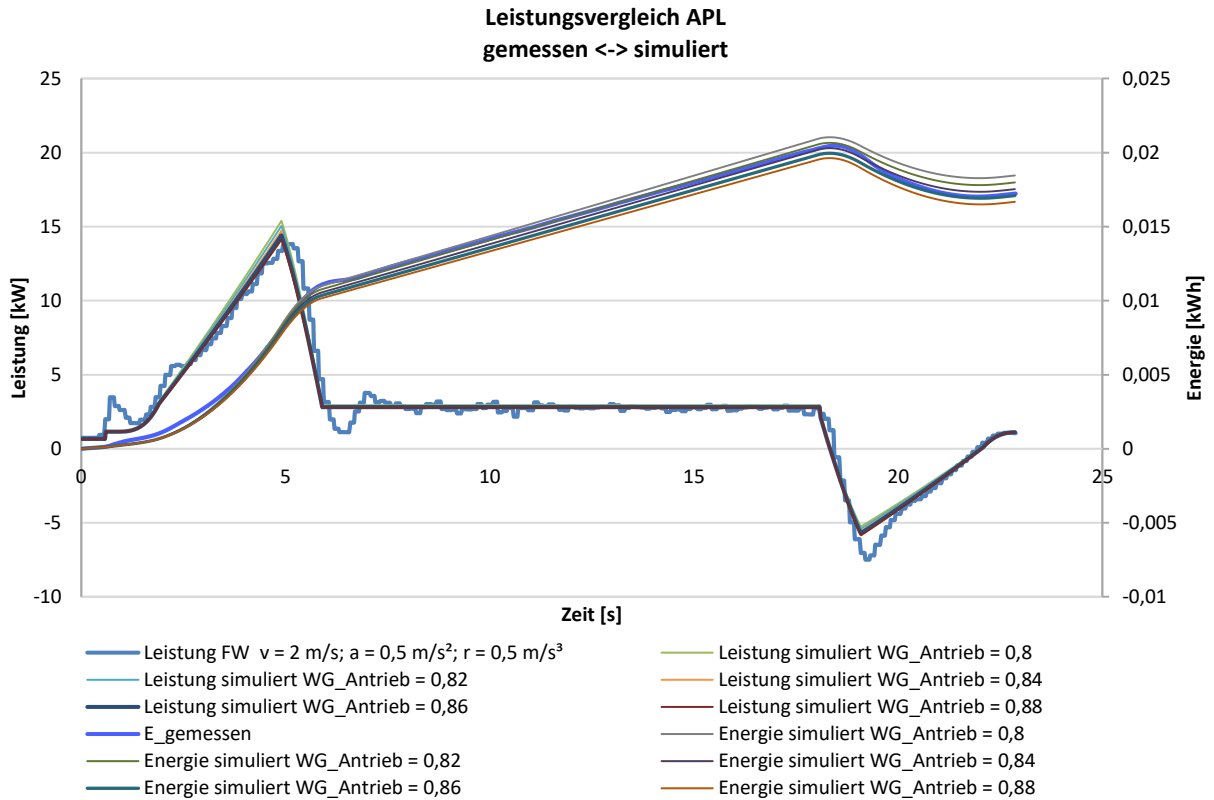


Abbildung 5-25: Leistungsbedarf FW Kalibrierung Wirkungsgrad Antrieb APL

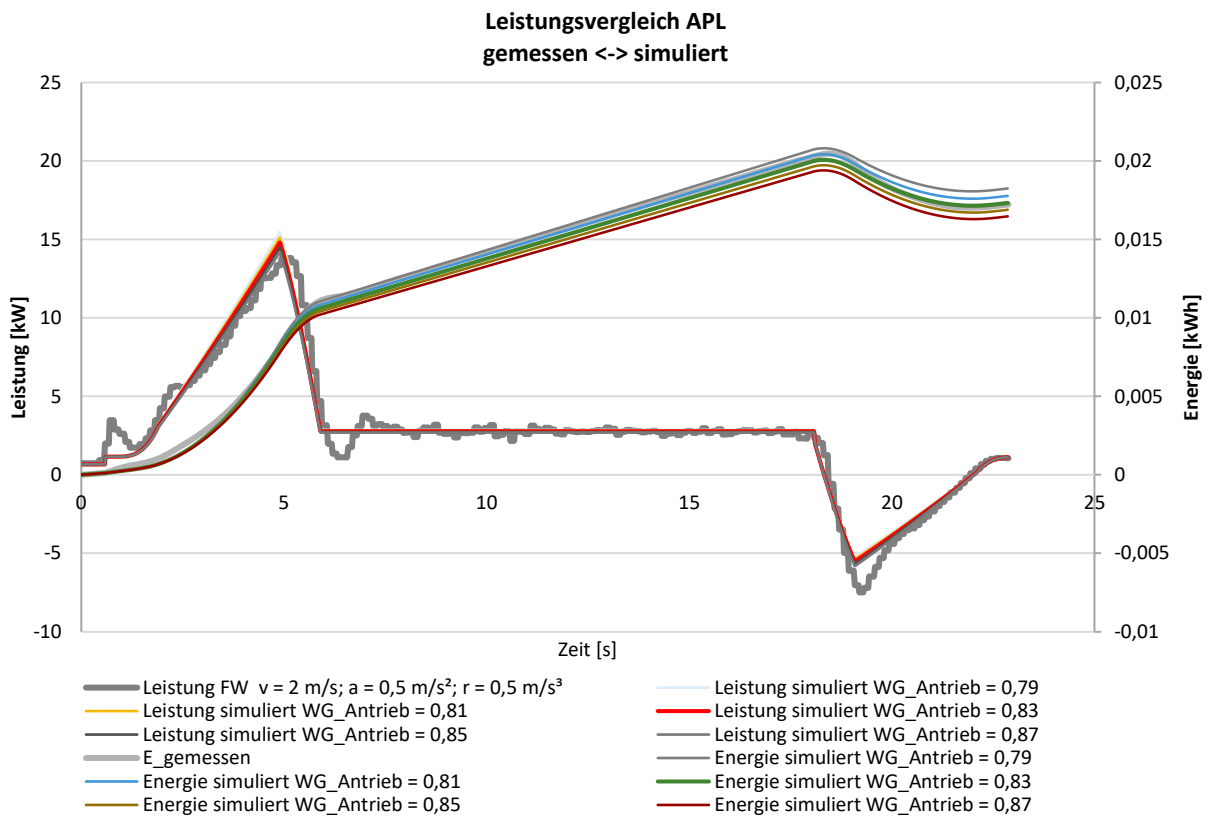


Abbildung 5-26: Leistungsbedarf FW Kalibrierung Wirkungsgrad Antrieb APL
geschwindigkeitsabhängiger Wirkungsgrad = 240 N/(m/s)

5.3.4 Hubwerksparameter APL

Die Parameter des Hubwerks werden analog zur Kalibrierung des AKL durchgeführt.

Wirkungsgrad des Hubriemen- bzw. Seiltriebs

Das APL hebt den Hubwagen mithilfe eines Seiltriebes, der an drei Seilscheiben umgelenkt und auf einer angetriebenen Seiltrommel aufgewickelt wird. Der Wirkungsgrad des Seiltriebes berechnet sich wie in Kapitel 3.5.4 beschrieben.

In Abbildung 5-27 ist dargestellt, wie sich die Wirkungsgrade auf die Simulationsergebnisse des Hubantriebsmoments auswirken. Für die Simulation wird der berechnete Wirkungsgrad von 0,96 verwendet.

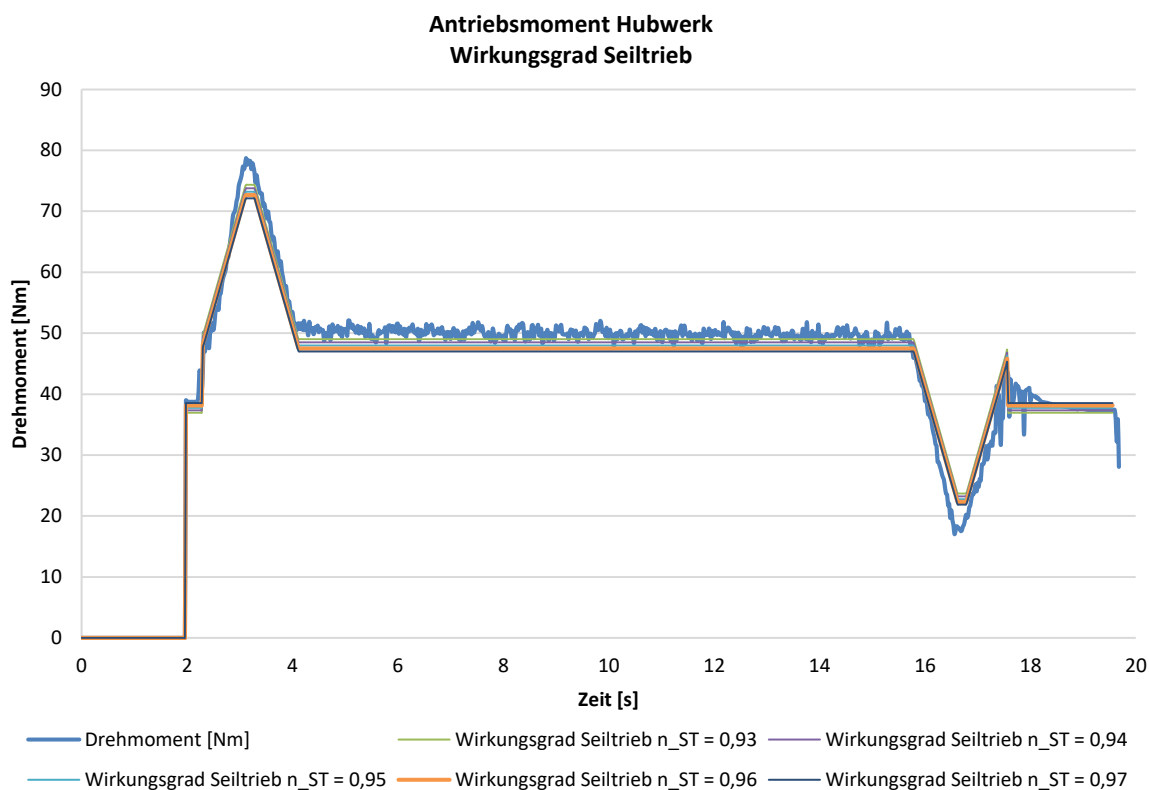


Abbildung 5-27: Antriebsmoment HW Kalibrierung Wirkungsgrad Seiltrieb

Rollreibungskoeffizient der Laufrollen

Die Kalibrierung des Rollreibungskoeffizienten der Laufrollen des Hubwagens ist in Abbildung 5-28 dargestellt. Der berechnete Rollreibungskoeffizient für die Laufrollen des Hubwagens μ_{rLRHW} ist:

$$\mu_{rLRHW} = \frac{1,2 \text{ mm}}{75 \text{ mm}} = 0,016 \quad (5-8)$$

$$\mu_{rLRHW} = \frac{1,2 \text{ mm}}{90 \text{ mm}} = 0,013 \quad (5-9)$$

Bei der Kalibrierung wird dieser in 0,2 %-Schritten von 1,2 % auf 2 % erhöht. Wie zu sehen ist, hat die Rollreibung der Laufrollen einen geringen Einfluss auf das Antriebsmoment. Für die Simulation des APL wird der berechnete Rollreibungskoeffizient für die Laufrollen des Hubwagens von $\mu_{rLRHW} = 1,6 \%$ verwendet.

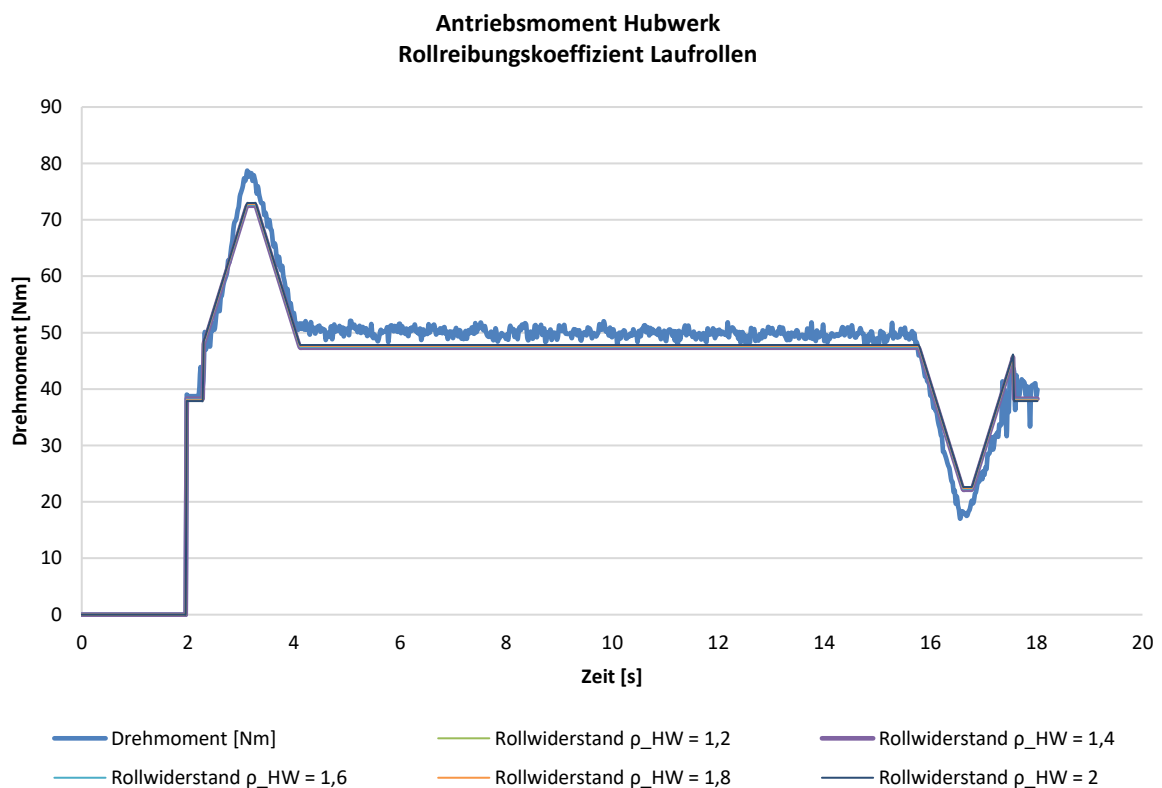


Abbildung 5-28: Antriebsmoment HW Kalibrierung Rollwiderstand Laufrollen APL

Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand

In Abbildung 5-29 ist die Kalibrierung des geschwindigkeitsabhängigen Rollwiderstands des Hubwerks dargestellt. Dieser wird schrittweise von 450 N/(m/s) auf 850 N/(m/s) variiert. Bei einem geschwindigkeitsabhängigen Rollwiderstand von 650 N/(m/s) ist der Fehlerwert zwischen beiden Kurven am kleinsten und wird für die weitere Simulation verwendet.

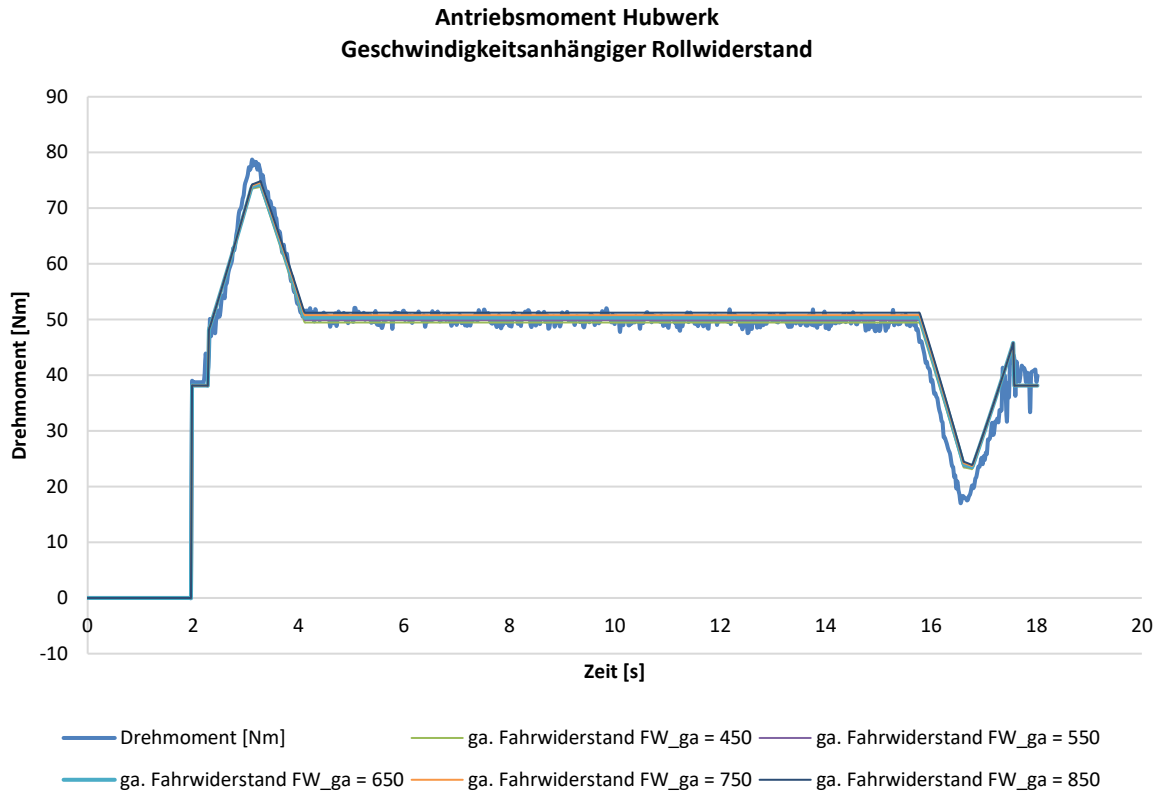


Abbildung 5-29: HW Kalibrierung geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand

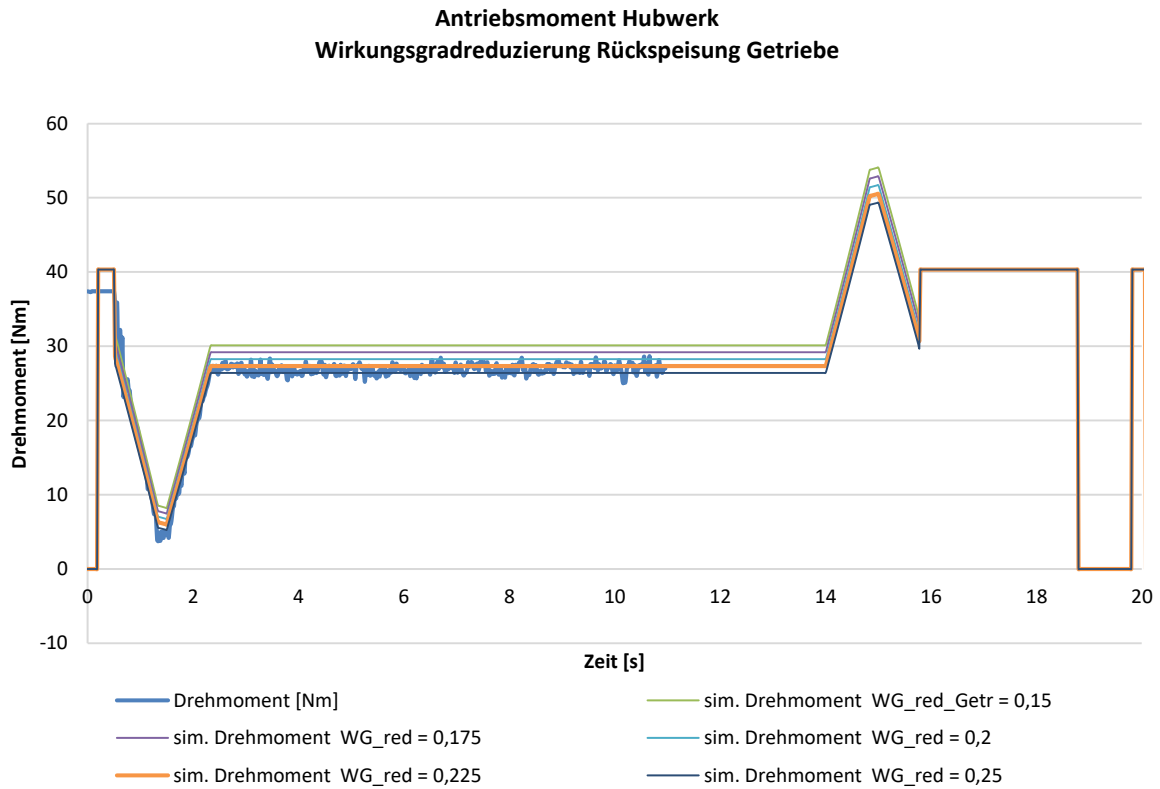


Abbildung 5-30: Antriebsmoment FW Kalibrierung Wirkungsgradreduzierung Rückspeisung Getriebe

Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei generatorischem Betrieb

In Abbildung 5-30 ist die Kalibrierung der Wirkungsgradreduzierung des Getriebes bei generatorischem Betrieb des APL abgebildet. Die Wirkungsgradreduzierung wurde von 0,05 in 0,05-Schritten auf 0,25 gesteigert. Wie bei dem AKL hat dieser Wert beim APL einen großen Einfluss auf das Antriebsmoment des Hubantriebs. Eine Reduzierung des Getriebewirkungsgrades bei generatorischem Betrieb von 0,225 wird für die weitere Simulation verwendet.

Wirkungsgrad des Antriebsmotors

In Abbildung 5-31 ist die Kalibrierung des Antriebswirkungsgrads für den Hubwerksantrieb bei einer Hubfahrt dargestellt. Der Wirkungsgrad von 0,89 ergibt die kleinste Summe der Abstandsquadrate. Für die Simulationen und die weiteren Validierungen wird dieser Wirkungsgrad für den Hubwerksantrieb verwendet.

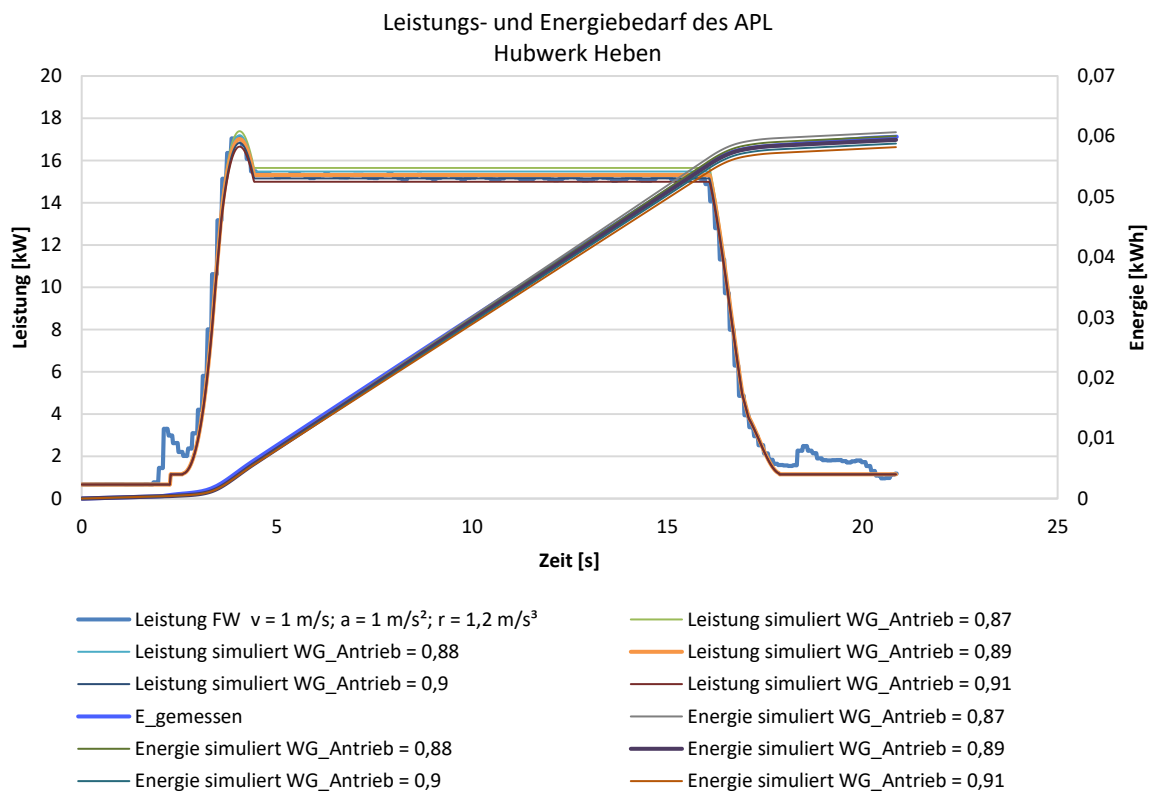


Abbildung 5-31: Leistungsbedarf HW Kalibrierung Wirkungsgrad Antrieb

Kalibrierung des Wirkungsgrads der Rückspeiseeinheit

Für die Kalibrierung des Wirkungsgrads der Rückspeiseeinheit wird der Leistungsbedarf einer Senkfahrt des APL aufgezeichnet. Bei dieser wird die Lageenergie des Hubwagens und ggf. der Nutzlast in elektrische Energie umgewandelt. Für die Kalibrierung

wird der Wirkungsgrad der Rückspeiseeinheit schrittweise von 0,9 in 0,25 Schritten auf 1 gesteigert. Anschließend wird das Simulationsergebnis mit dem gemessenen Leistungsbedarf des APL verglichen.

In Abbildung 5-32 sind die Ergebnisse der Simulation abgebildet. Wie zu sehen ist, kann der Leistungsbedarf der Messung selbst bei einer verlustfreien Energierückspeisung nicht nachgebildet werden. Um die Leistung bei dem Senken des Hubwagens nachbilden zu können, muss die Wirkungsgradreduzierung während der Rückspeisung des Getriebes angepasst werden. Um die zurückgewonnene elektrische Leistung während des Senkens zu erhöhen, wird der Leistungsverlust im Getriebe reduziert und eine Wirkungsgradreduzierung während der Rückspeisung des Getriebes von 0,2 angenommen.

In Abbildung 5-33 ist die Kalibrierung des Wirkungsgrades der Rückspeiseeinheit bei einer Wirkungsgradreduzierung während der Rückspeisung des Getriebes von 0,2 abgebildet. Im Gegensatz zur Abbildung 5-32 ist es möglich, den Leistungsbedarf des APL während des Senkvorgangs darzustellen. Der Wirkungsgrad der Rückspeiseeinheit erhöht sich in 0,01 Schritten von 0,96 auf 1. Die größte Übereinstimmung der simulierten und der gemessenen Kurve wird mit einem Wirkungsgrad von 0,99 erreicht. Dieser Wert wird für die weiteren Simulationen verwendet.

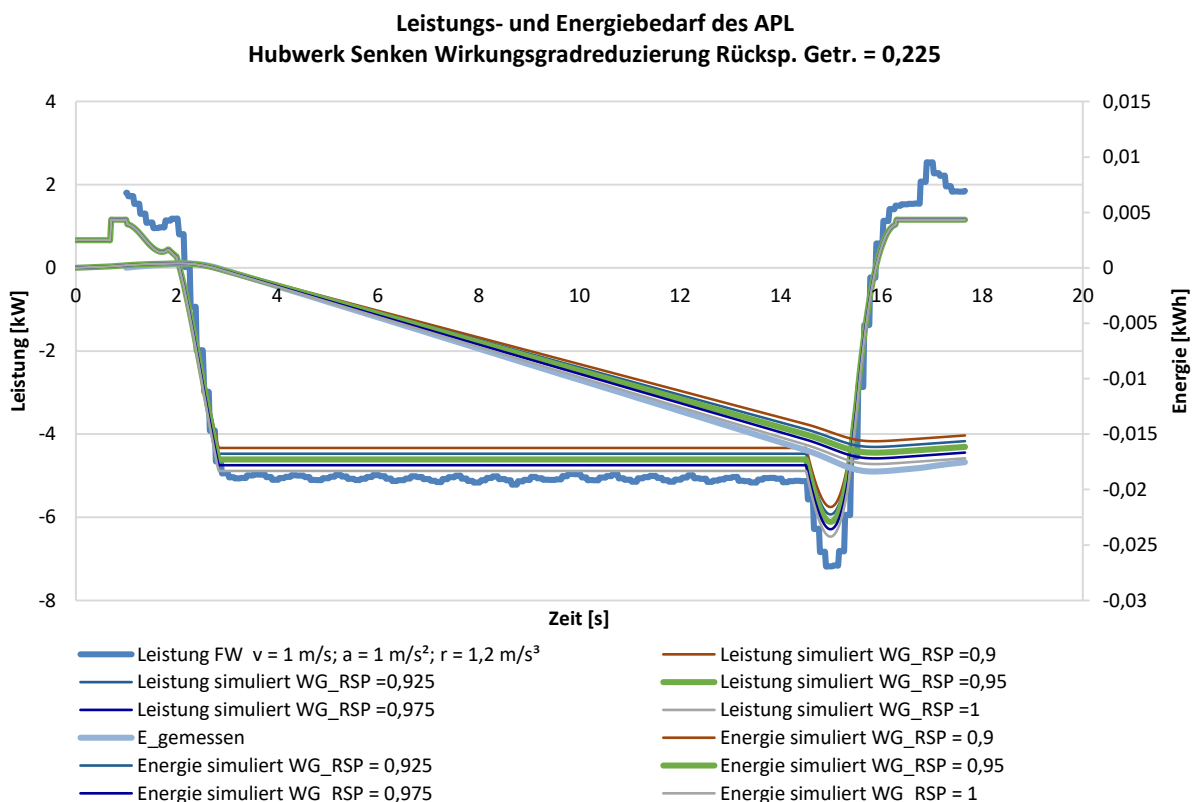


Abbildung 5-32: APL Kalibrierung Wirkungsgrad Rückspeiseeinheit $WG_Red_Getr = 0,225$

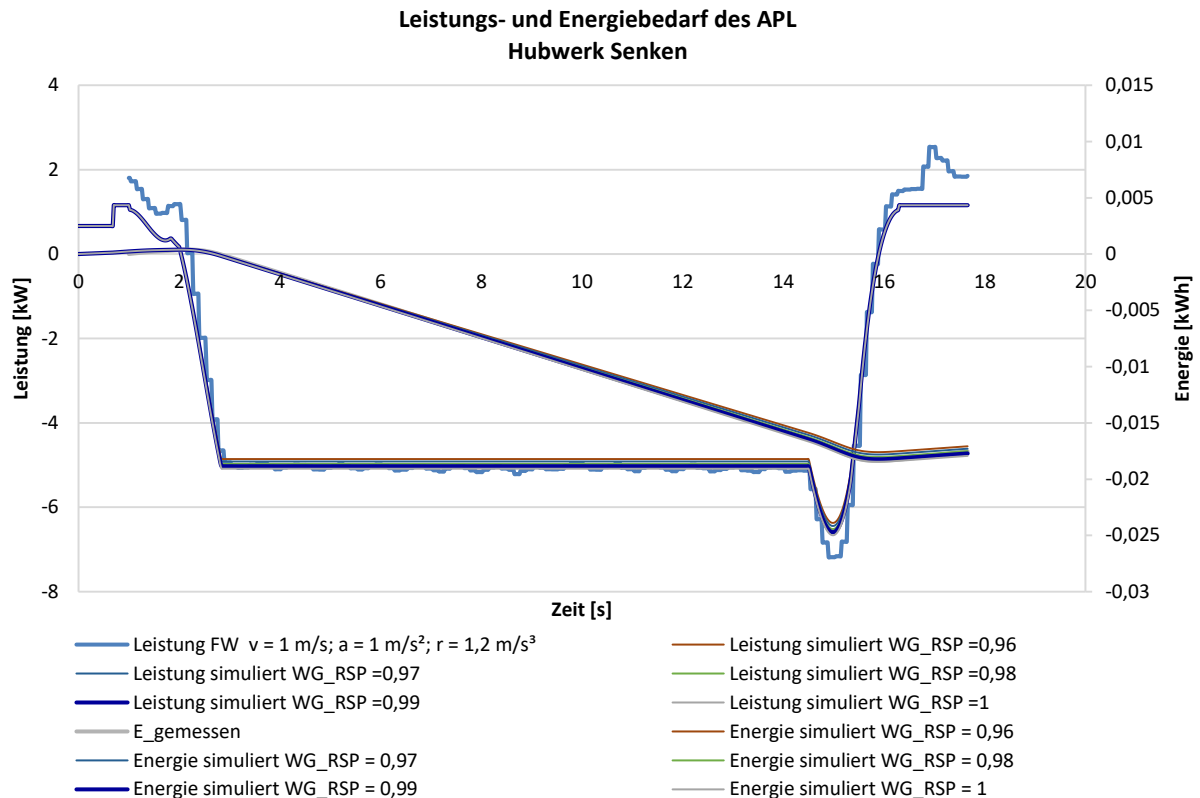


Abbildung 5-33: APL Kalibrierung Wirkungsgrad Rückspeiseeinheit WG_Red_Getr = 0,20

5.4 Validierung der Leistungsberechnung von einzelnen Fahrten des einzelnen RBG

In diesem Kapitel wird die Leistungsberechnung von einzelnen Fahrten des einzelnen RBG validiert. Es wird nachgewiesen, dass das Simulationsmodell den Leistungsbedarf für einzelne Fahrten des RBG nachbildet und genau genug berechnet. Hierfür werden Fahrten von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt mit einer definierten Zuladung durchgeführt und der Leistungsbedarf des RBG gemessen. Die Messdaten werden anschließend mit den Simulationsdaten verglichen. Bei einer ausreichend genauen Übereinstimmung ist die Validierung der Leistungsberechnung von einzelnen Fahrten einzelner RBG bestanden und mehrere RBG werden über einen längeren Zeitraum validiert.

Bei der Validierung werden erst Fahrten mit einer Bewegung in eine Richtung und dann kombinierte Fahrten mit Bewegungen in beide Richtungen validiert. Zu beachten ist, dass bei den Bewegungen entlang der Fahrachse immer eine Hubfahrt durchgeführt wird. Das Steuerungsprogramm unterfährt automatisch bei der Abholadresse die

Fachposition und fährt bei der Abgabeadresse automatisch die Einfahrhöhe der Fachposition an. Daraus resultiert bei einer Fahrt entlang der Fahrachse ein Hubvorgang, welcher bei der Validierung berücksichtigt ist.

In Abbildung 5-34 ist der Vergleich des gemessenen und des simulierten Leistungs- und Energiebedarfs des AKL dargestellt. Die Bewegung hat einen langen Fahrweg von ca. 27 m und einen sehr kurzen Hubweg von ca. 0,03 m. Wie zu sehen ist, wird der Leistungsbedarf des AKL vom Simulationsmodell sehr gut nachgebildet. Zwischen der 12. und der 14. Sekunde der Abbildung ist eine Abweichung im Verlauf der beiden Kurven zu sehen. Diese Abweichung resultiert aus den bereits in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Programmierfehlern. Der simulierte und der gemessene Energiebedarf weichen unter 1 % voneinander ab.

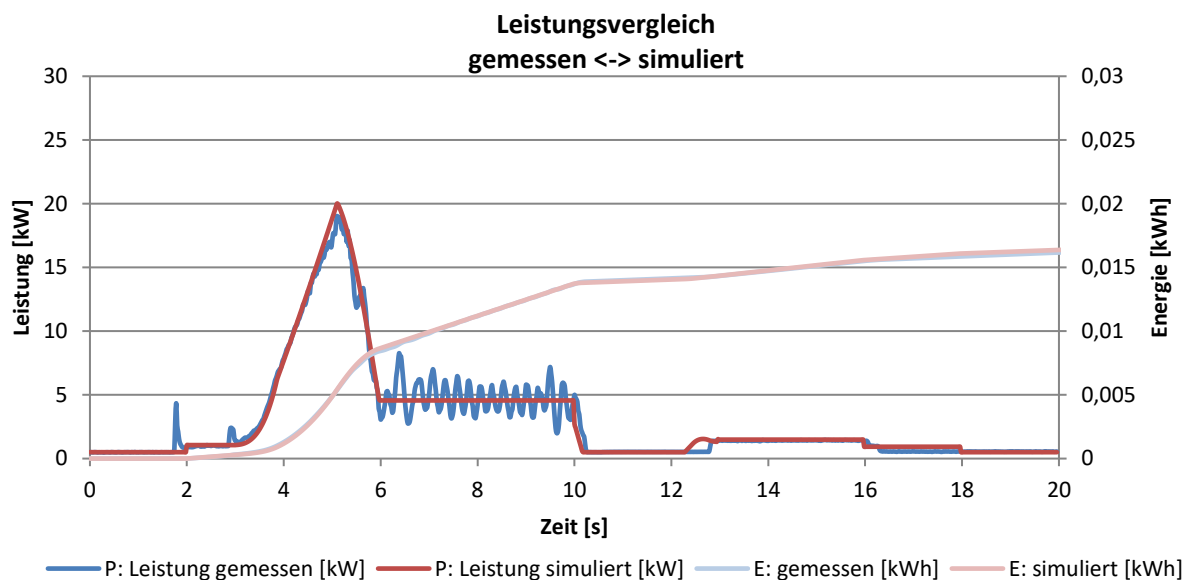


Abbildung 5-34: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL langer Fahrweg mit sehr kurzem Hubweg ohne Zuladung

In Abbildung 5-35 ist der Leistungs- und Energiebedarf des RBG bei einer langen Hubfahrt von ca. 7,5 m ohne Zuladung abgebildet. In der Abbildung ist zu sehen, dass das Simulationsmodell die gemessene Leistung gut nachbildet. Die Leistungsspitzen vor der Durchführung der Bewegung werden vernachlässigt. Die Hubbewegung in dieser Abbildung ist nach ungefähr acht Sekunden beendet. Der simulierte und der gemessene Energiebedarf weichen um 3,5 % ab.

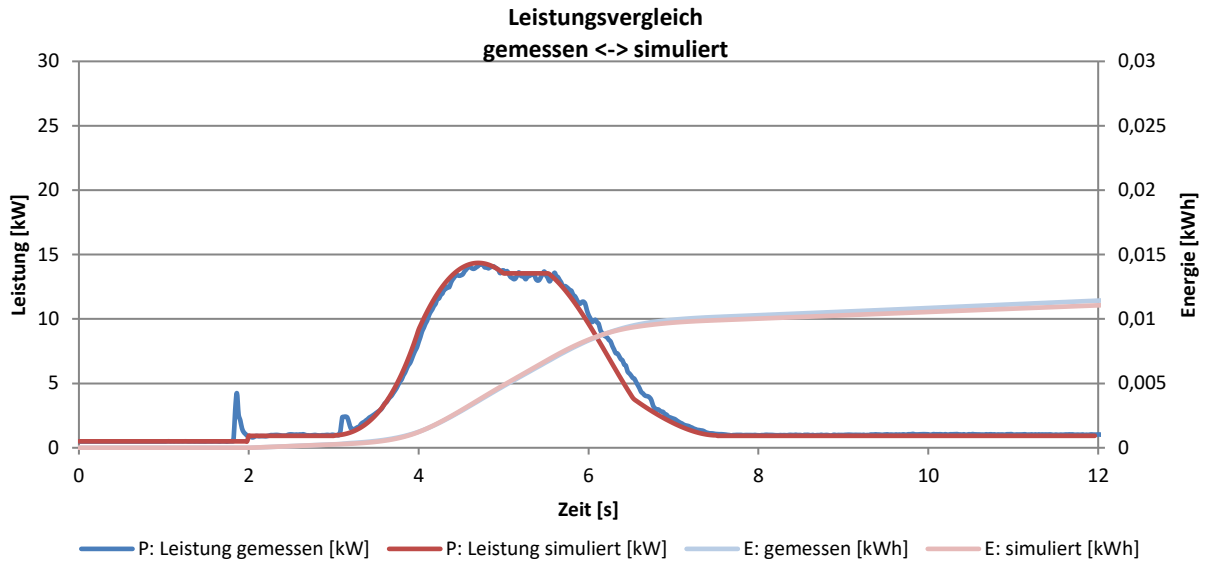


Abbildung 5-35: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL Langer Hubweg ohne Zuladung

In Abbildung 5-36 ist der Leistungs- und Energiebedarf eines AKL bei einem langen Fahrweg und einem langen Hubweg ohne Zuladung dargestellt. Der Fahrweg beträgt ca. 28 m und der Hubweg 7,6 m. Da die Fahrt fahrzeitkritisch ist und eine Hubfahrt durchgeführt wird, wird die Hubfahrt bei der einfachen Achssteuerung zum letzten möglichen Zeitpunkt gestartet. Die Abweichungen zwischen der 10. und der 12. Sekunde resultieren von den Berechnungsfehlern in der Steuerungssoftware. Der simulierte und der gemessene Energiebedarf weichen um 2,3 % voneinander ab.

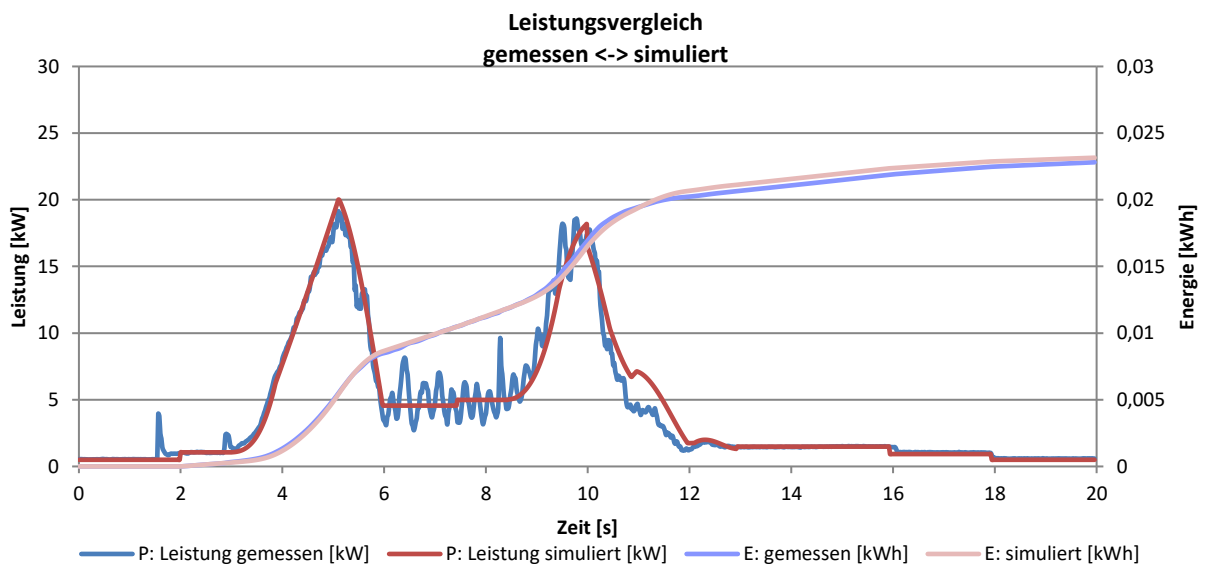


Abbildung 5-36: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL – Langer Fahrweg mit langem Hubweg ohne Zuladung; fahrwerkskritisch

In Abbildung 5-37 ist der Leistungs- und Energiebedarf eines AKL einer Fahrt mit langem Fahrweg und langer Senkbewegung dargestellt. Der Fahrweg beträgt ca. 28 m und der Weg der Senkbewegung ca. 7,6 m. Die Bewegung ist fahrwerkskritisch, wodurch bei der einfachen Achssteuerung beide Achsen gleichzeitig starten. Die Bewegungen sind bei ca. 13 Sekunden beendet. Wie zu sehen ist, bildet das Simulationsmodell den Energiebedarf des AKL gut nach. Der simulierte und der gemessene Energiebedarf weichen um 0,3 % voneinander ab.

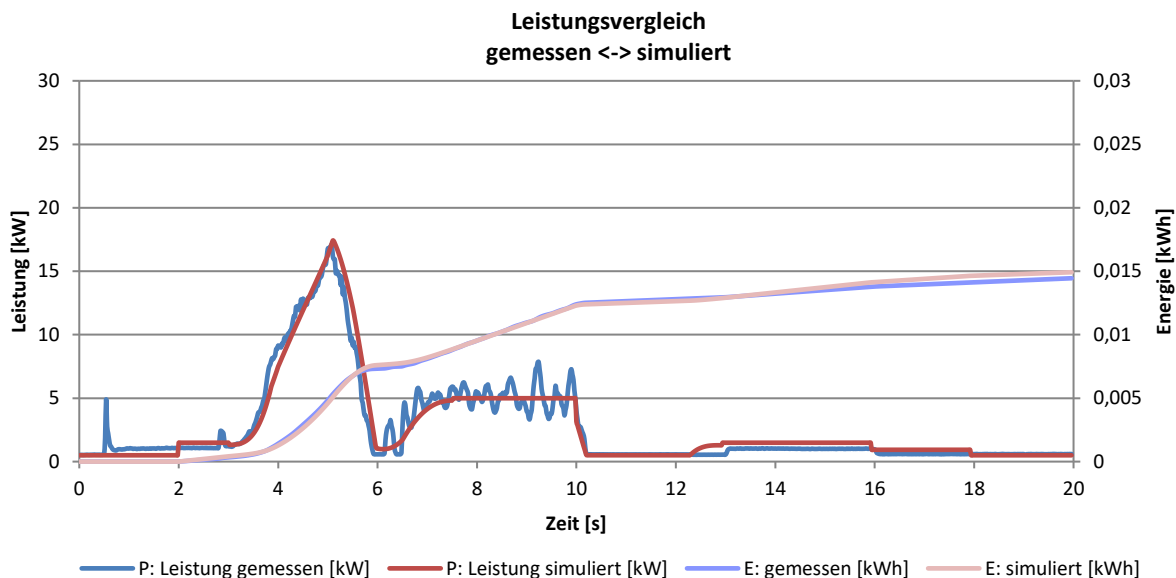


Abbildung 5-37: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL- Langer Fahrweg mit langer Senkbewegung ohne Zuladung; Fahrwerkskritisch

In Abbildung 5-38 und Abbildung 5-39 werden die Leistungs- und Energiebedarfsberechnung für das AKL validiert. Es sind kombinierte Fahrten mit einer Hub- und einer Senkbewegung, bei denen die Bewegungen beider Achsen ca. den gleichen Zeitbedarf haben. Bei beiden Abbildungen ist zu sehen, dass die Simulation die Messung gut nachbildet. Der simulierte und der gemessene Energiebedarf weichen bei Abbildung 5-38 um 5,9 % und bei Abbildung 5-39 um 2,1 % voneinander ab.

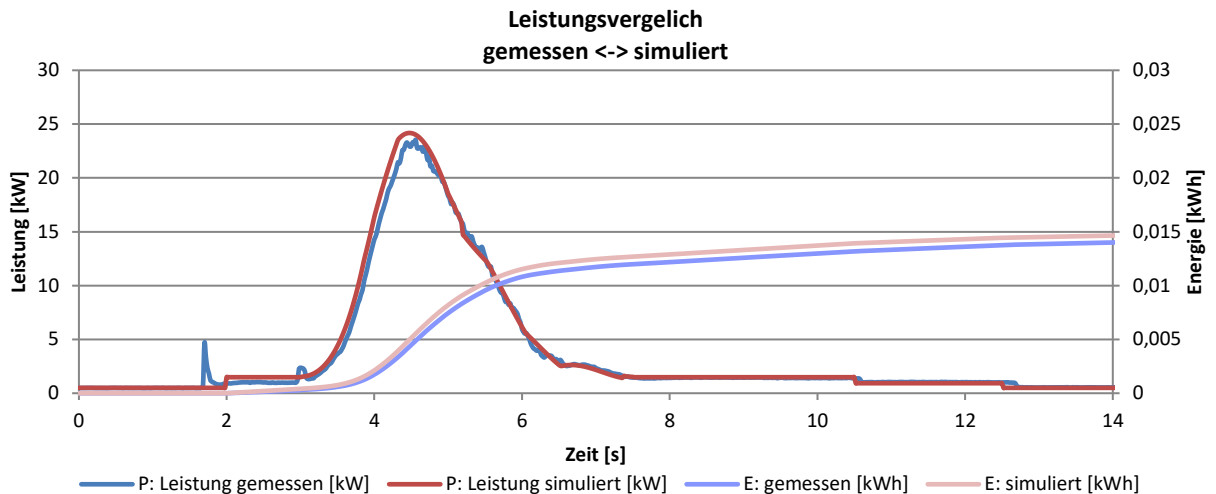


Abbildung 5-38: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL – Fahrweg mit Hubbewegung ohne Zuladung

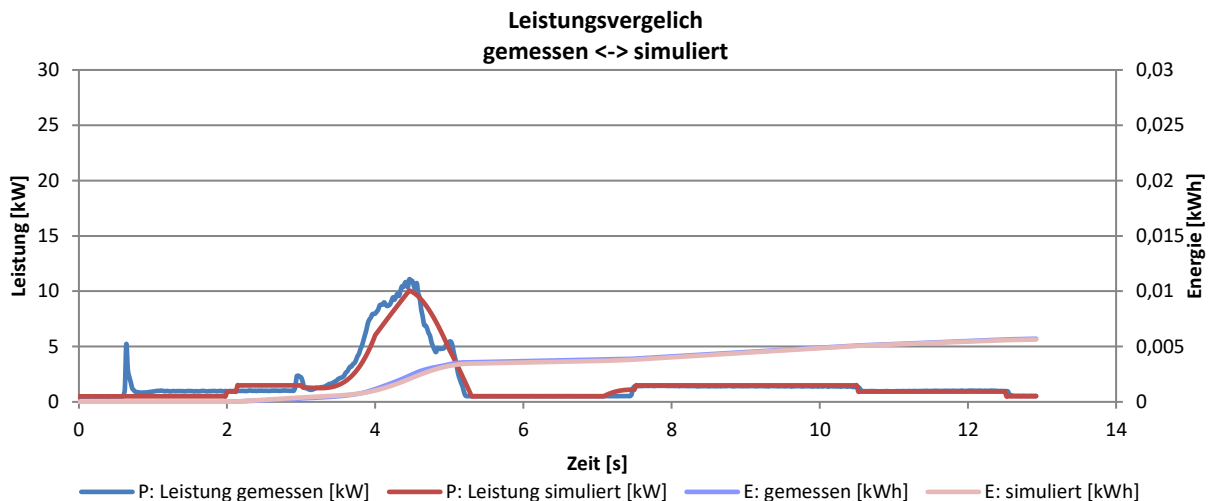


Abbildung 5-39: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL – Fahrweg mit Senkbewegung ohne Zuladung

In Abbildung 5-40, Abbildung 5-41 und Abbildung 5-42 sind die Validierungen der Leistungsberechnungen des Simulationsmodells bei unterschiedlichen Fahrten abgebildet. Die Fahrten finden jeweils mit 50 kg Zuladung statt. Dargestellt sind die Leistungs- und Energiebedarfe des AKL von einem langen Fahrweg mit einer kurzen Hubbewegung, von einer Hubbewegung und von einem langen Fahrweg mit einer langen Hubbewegung. Diese Vergleiche zeigen, dass das Simulationsmodell den Leistungsbedarf der Fahrten sehr genau nachbildet. Nach dem Validieren der Einzelfahrten, wird die Leistungsberechnung von mehreren parallelen RBG über einen längeren Zeitraum validiert. Der simulierte und der gemessene Energiebedarf weichen bei Abbildung 5-40 um 1,6 %, bei Abbildung 5-41 um 6,5 % und bei Abbildung 5-42 um 3 % voneinander ab.

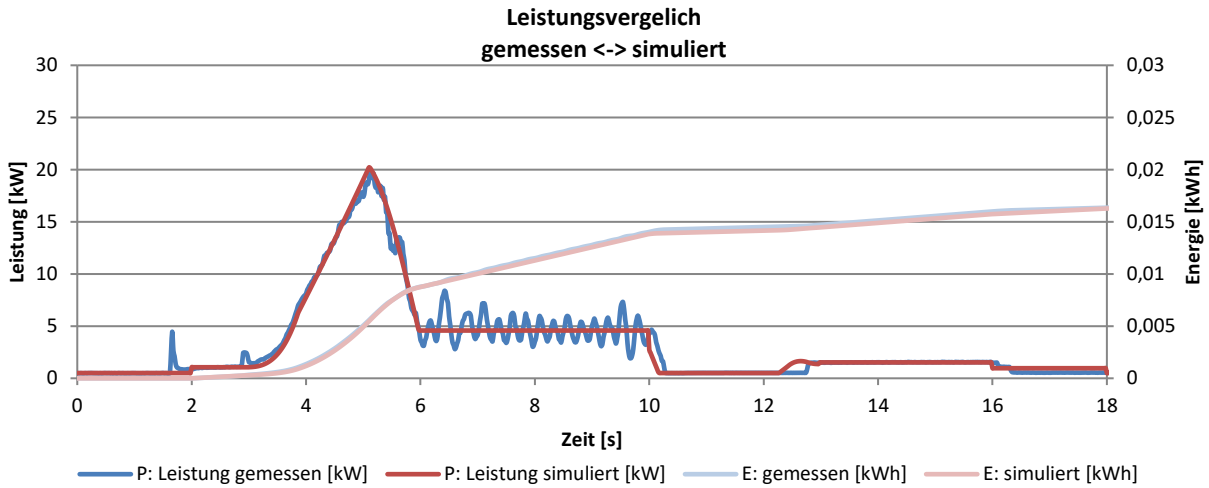


Abbildung 5-40: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL langer Fahrweg mit sehr kurzem Hubweg 50 kg Zuladung

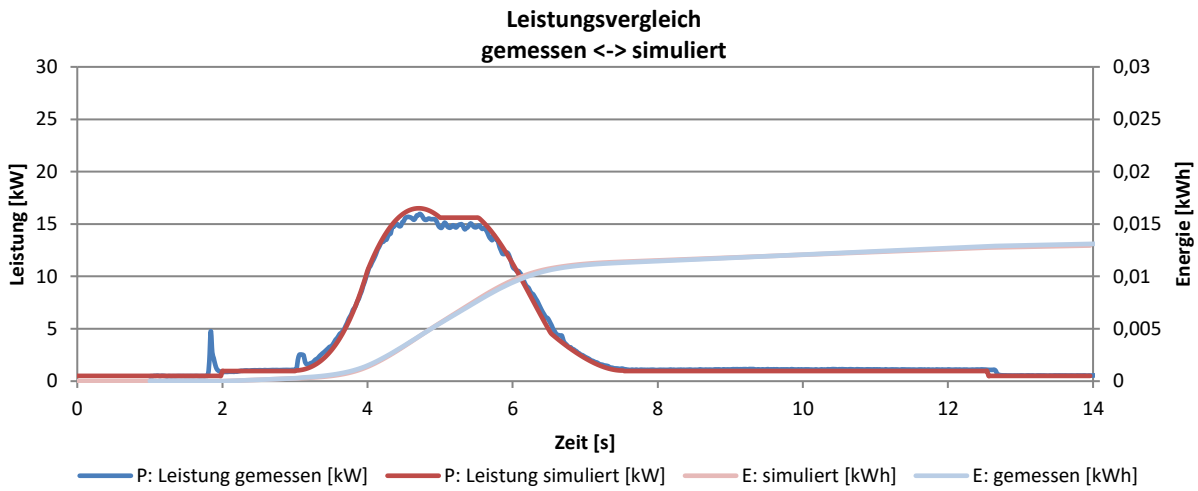


Abbildung 5-41: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL langer Hubweg 50 kg Zuladung

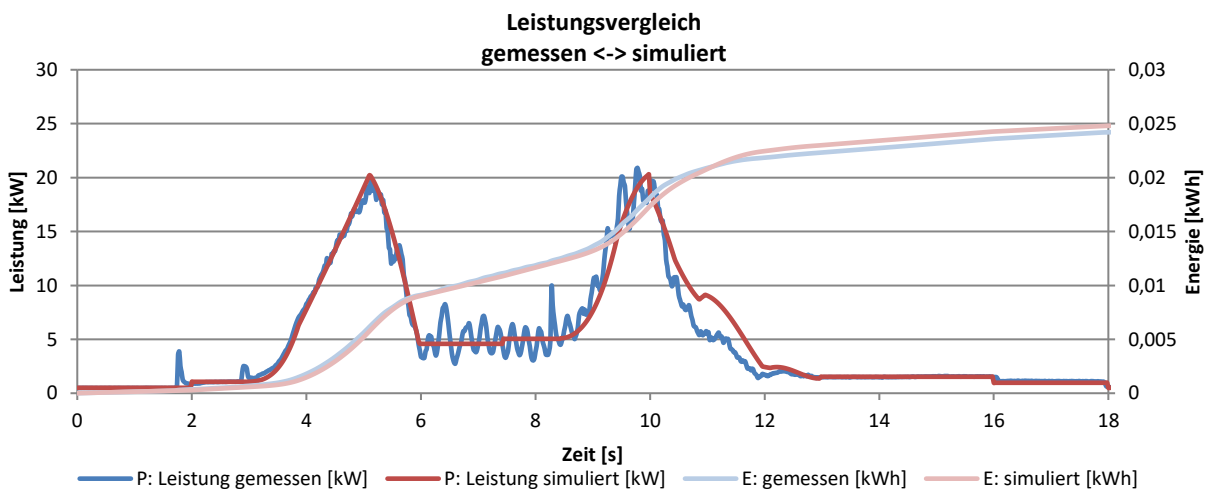


Abbildung 5-42: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL – Langer Fahrweg mit langem Hubweg 50 kg Zuladung; fahrwerkskritisch

In Abbildung 5-43 ist die Leistungsaufnahme eines APL für einen langen Fahrweg und einen langen Hubweg abgebildet. Der Fahrweg beträgt ca. 30,5 m und der Hubweg ca. 6,3 m. Die Bewegungen der Achsen bei diesem RBG werden immer sofort gestartet und es wird keine Optimierung der Startzeitpunkte vorgenommen. Die Simulation bildet den Leistungs- und damit den Energiebedarf des RBG sehr genau nach. Der gemessene und der simulierte Energiebedarf weichen bei dieser Fahrt um 2 % voneinander ab.

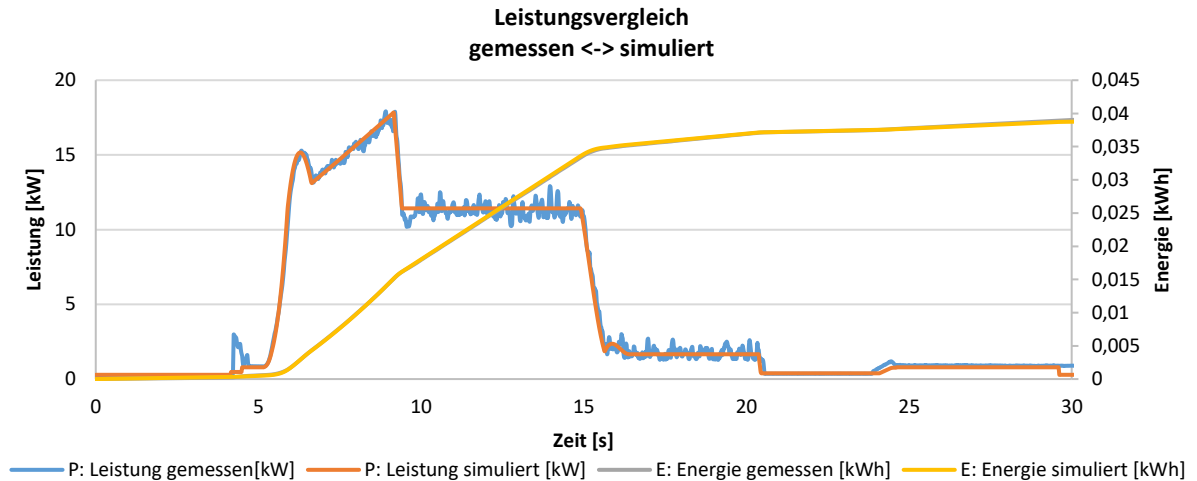


Abbildung 5-43: Validieren Leistungs- und Energiebedarf APL – langer Fahrweg mit langem Hubweg
0 kg Zuladung

In Abbildung 5-44 wird die gemessene und die simulierte Leistungsaufnahme eines APL bei einer Fahr- und Senkbewegung verglichen. Wie zu sehen ist, wird die gemessene Leistungsaufnahme gut nachgebildet. Die Abweichung des Energiebedarfs beträgt bei dieser Fahrbewegung ca. 15 %. Diese Abweichung kommt größtenteils durch die Leistungsaufnahme vor der eigentlichen Fahrt zustande.

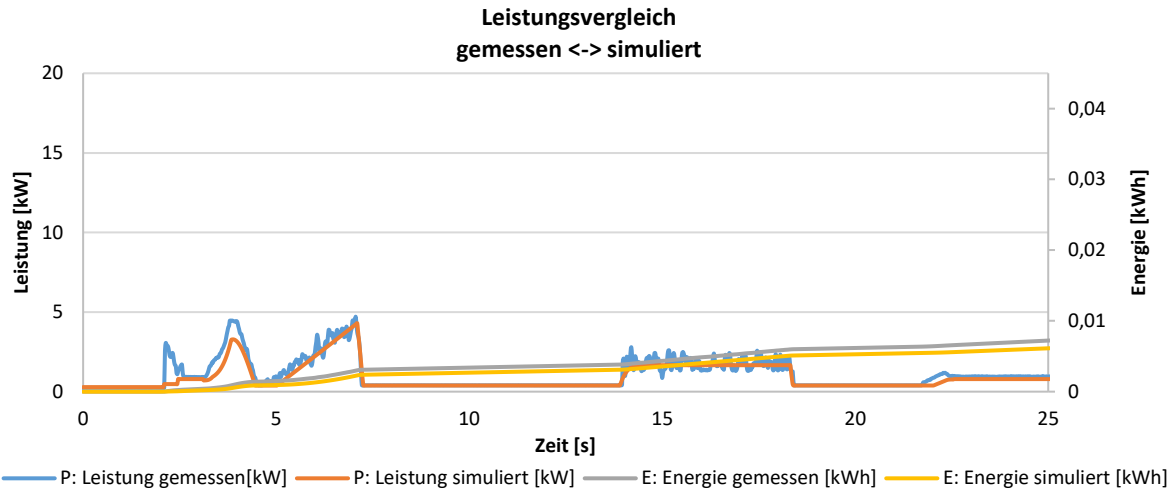


Abbildung 5-44: Validieren Leistungs- und Energiebedarf APL – langer Fahrweg mit langer Senkbewegung 0 kg Zuladung

In Abbildung 5-45 werden der gemessene und der simulierte Leistungsbedarf des APL für eine Fahrt mit einem kurzen Fahrweg und einem langen Hubweg verglichen. Der Leistungsbedarf wird genau genug nachgebildet, die Abweichung des Energiebedarfs beträgt ca. 1 %.

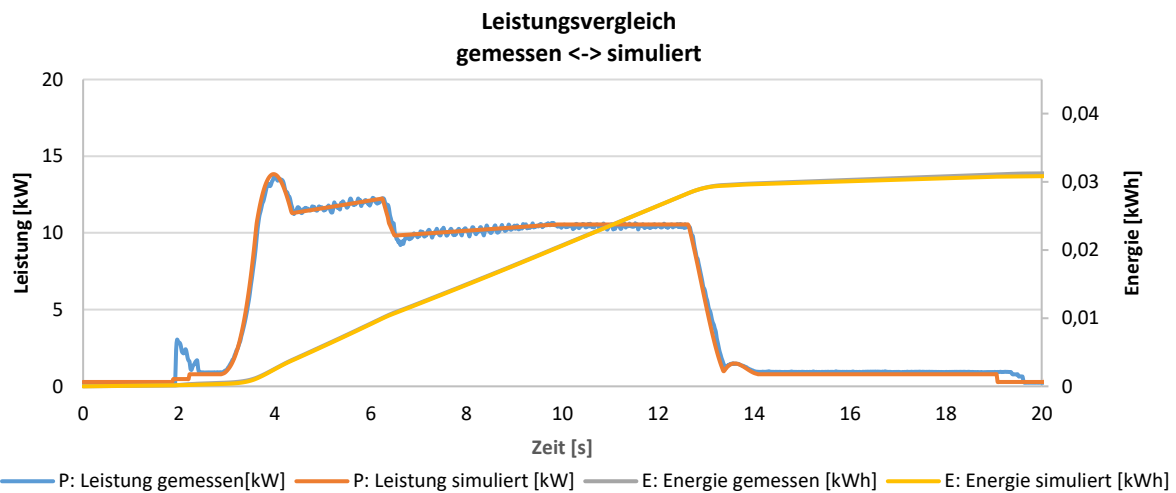


Abbildung 5-45: Validieren Leistungs- und Energiebedarf APL – kurzer Fahrweg mit langem Hubweg 0 kg Zuladung

In Abbildung 5-46 werden der gemessene und der simulierte Leistungsbedarf des APL für eine Fahrt mit einem kurzen Fahrweg und einem langen Hubweg verglichen. Der Leistungsbedarf wird genau genug nachgebildet und die Abweichung des Energiebedarfs beträgt ca. 7 %.

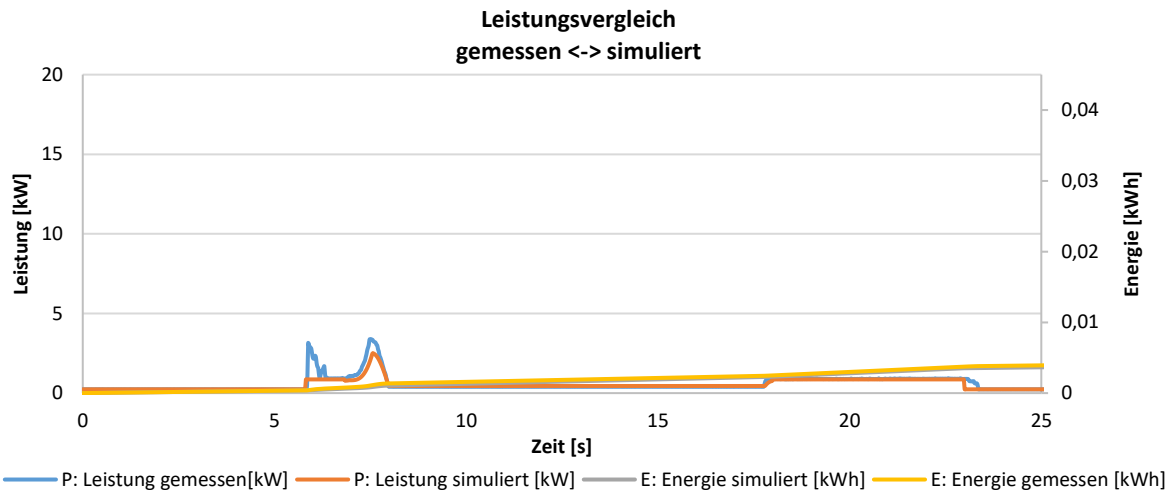


Abbildung 5-46: Validieren Leistungs- und Energiebedarf APL – kurzer Fahrweg mit langer Senkbewegung 0 kg Zuladung

Mit der Validierung der Leistungsberechnung einzelner Fahrten von einem RBG konnte nachgewiesen werden, dass das Simulationsmodell den Leistungsbedarf der RBG bei einzelnen Fahrten genau genug nachbildet. Nachdem die Leistungsberechnung von einzelnen Fahrten von jeweils einem RBG nachgewiesen ist, kann mit der Validierung von mehreren parallelen RBG fortgefahen werden.

5.5 Validierung der Leistungsberechnung von mehreren parallelen RBG über einen längeren Zeitraum

Im vorherigen Kapitel wurden die Leistungs- und Energiebedarfsberechnung der einzelnen Fahrten einzelner RBG validiert. Dieses Kapitel validiert die Leistungs- und Energiebedarfsberechnung mehrerer paralleler RBG über einen längeren Zeitraum. Für die Validierung wird die reale Leistungsaufnahme der RBG mit der berechneten verglichen. Ziel ist es, nachzuweisen, dass das Simulationsmodell die Auftragslisten chronologisch abarbeitet und der Leistungsbedarf der parallelen RBG nachgebildet wird.

Die elektrische Leistungsaufnahme wurde an den stationären Schaltschränken von existierenden Anlagen gemessen. In diesem Zeitraum wurden die Auftragslisten der RBG dokumentiert. Für die Validierung werden die Anlage nachgebildet, die RBG-Parameter eingestellt und die Auftragslisten den RBG zugeordnet. Die RBG-Modelle führen die Teilaufträge aus und berechnen den Leistungsbedarf.

Validiert wird eine Anlage mit drei an einen stationären Schaltschrank angeschlossenen RBG. Die RBG wurden in den vorherigen Kapiteln kalibriert und validiert. An diesem AKL wurden Messungen über eine Woche durchgeführt. Die Messwerte des in den stationären Schaltschrank verbauten Leistungsmessgerätes wurden viertelstündlich in eine Datenbank geschrieben.

In Abbildung 5-47 sind die simulierten und die gemessenen Leistungsmittelwerte abgebildet. Bei den Aufzeichnungen des LVS wurden aus technischen Gründen die Zuladungen der KLT nicht aufgezeichnet. Um den Einfluss der Zuladung zu untersuchen, wurde bei der Simulation der Leistungsmittelwerte die Zuladung in den Schritten 100 %, 75 %, 25 % und 0 % der maximalen Zuladung für diese KLT-Größe variiert. Es wird deutlich, dass die Simulationen den Verlauf der Messung sehr gut nachbilden und dass die Zuladung einen sehr kleinen Einfluss auf die Leistungsmittelwerte hat. Die nominale Abweichung ist in Abbildung 5-48 dargestellt. Die maximale Abweichung der Leistungsmittelwerte liegt in der untersuchten Woche bei 487 W somit prozentual bei maximal 7 %.

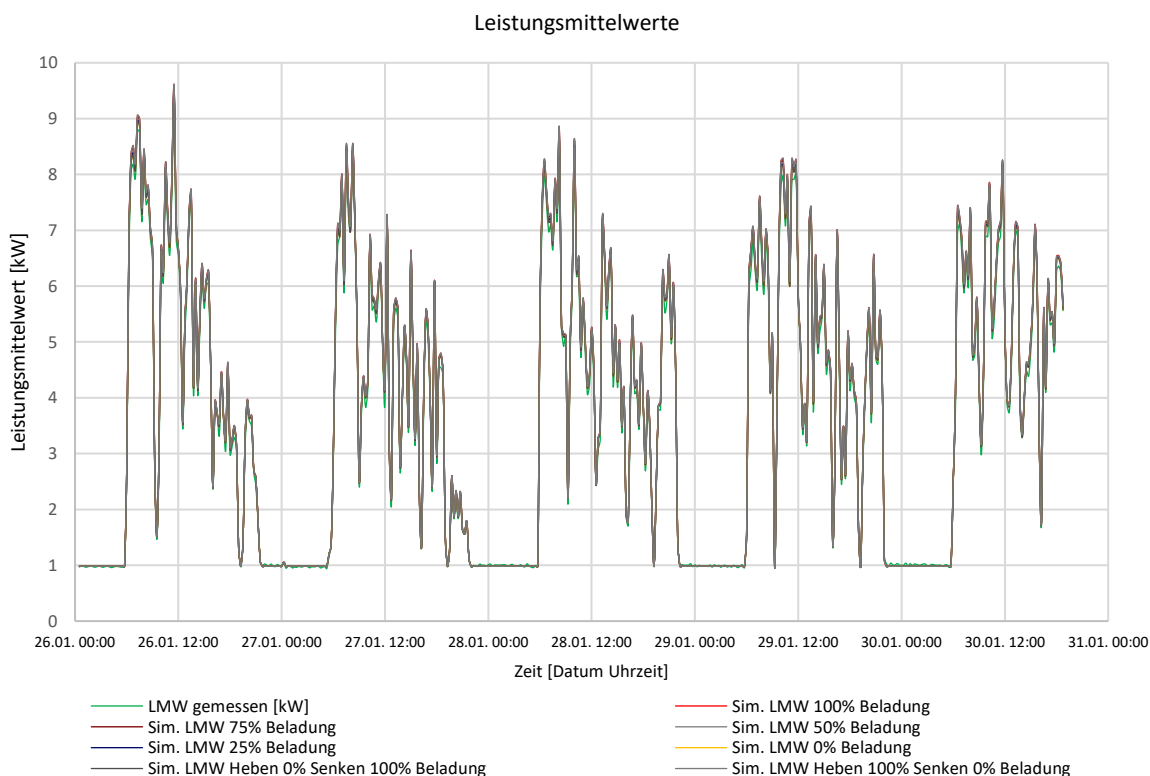


Abbildung 5-47: Validierung der Leistungsmittelwerte des AKL

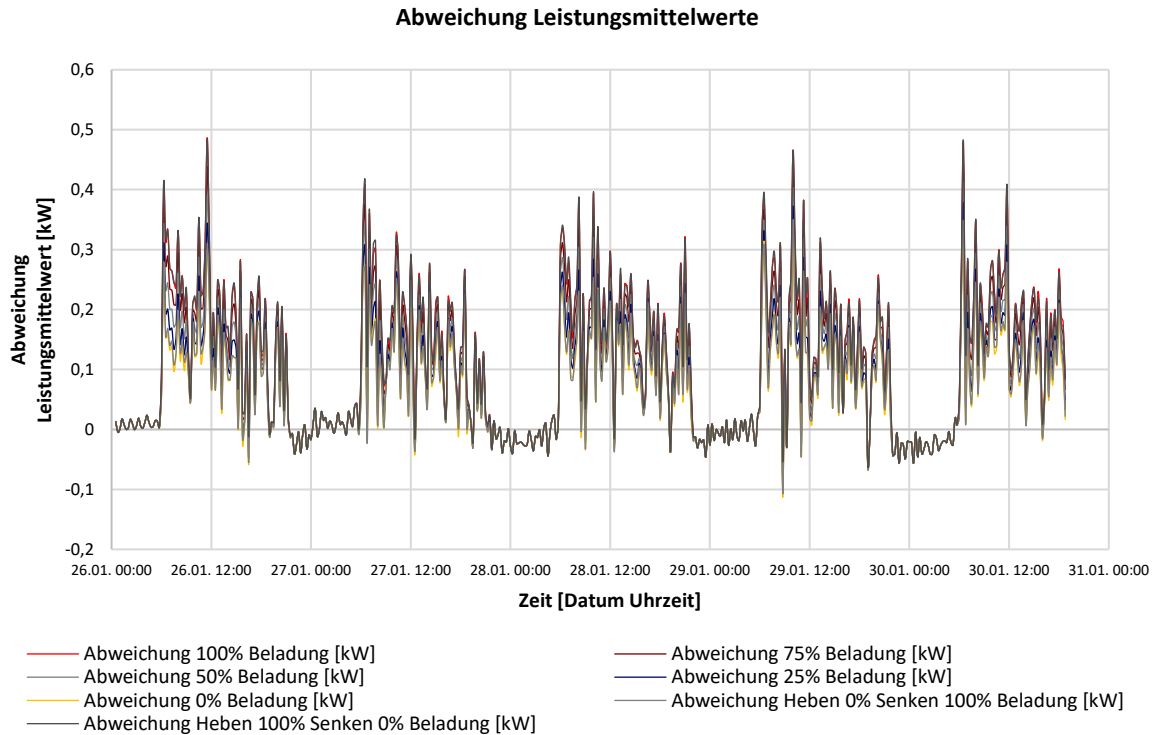


Abbildung 5-48: Abweichung Leistungsmittelwerte AKL

Tabelle 5-2: Vergleich der gemessenen und simulierten Leistungsmittelwerte eines dreigassigen AKL-Lagersystems

	100 % Beladung	75 % Beladung	50 % Beladung	25 % Beladung	0 % Beladung	Heben 0 % Beladung Senken 100 % Beladung	Heben 100 % Beladung Senken 0 % Beladung
Mittlere Abweichung [kW]	0,115	0,104	0,093	0,082	0,071	0,073	0,115
Maximale Abweichung [kW]	0,487	0,442	0,408	0,374	0,342	0,350	0,484
Minimale Abweichung [kW]	-0,059	-0,065	-0,081	-0,096	-0,112	-0,106	-0,059
Mittlere prozentuale Abweichung	3%	3%	3%	2%	2%	2%	3%
Maximale prozentuale Abweichung	7%	7%	7%	7%	6%	6%	7%
Minimale prozentuale Abweichung	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Leistungsbedarf der Anlage für eine Woche sehr genau nachgebildet wird. Wie bereits erwähnt ist es bei vielen Anlagen aus technischen Gründen nicht möglich, die Zuladung des RBG für die Simulation zu ermitteln, da ausschließlich eine Überlastkontrolle vorhanden ist. Abbildung 5-47 und

Abbildung 5-48 beinhalten die Simulationsergebnisse „...Heben 0 % Senken 100 % Beladung“. Bei dieser Simulation werden bei jedem beladenen Hubvorgang die Zuladung auf 0 % und bei jedem Senkvorgang die Zuladung auf 100 % der maximal möglichen Zuladung für diese KLT Größe gesetzt. Bei den Simulationsergebnissen „...Heben 100% Senken 0% Beladung“ sind beim Heben 100 % und beim Senken 0 % der Zuladung simuliert worden. Die mittleren Abweichungen der Messung liegen ca. 42 W auseinander. Diese Abweichung beweist, dass die Verteilung der Zuladung einen kleinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat.

5.6 Validierung der Funktionsweise des LM

Die Validierung des LM weist die ordnungsgemäße Funktion des LM und die Eignung des Modells zur Beantwortung der Forschungsfragen nach. Das LM verhindert die Verletzung der eingestellten Grenzen für die Leistungsspitze und die Lastgangspitze. Das LM verzögert bei Bedarf die Teilaufgaben der RBG, bis die Grenzen gewahrt werden können.

Eine Validierung mit Messdaten ist unmöglich, da das LM nicht existiert. Deshalb werden die korrekte Arbeits- und Funktionsweise des LM mittels Simulationsdaten nachgewiesen. Der Programmcode wird bei der Kompilierung von der Simulationsumgebung auf Fehler überprüft. Zum Nachweis wird geprüft, ob die Grenzen gewahrt und ob die virtuelle Leistungsvoraussage mit dem simulierten Leistungsbedarf der Anlage deckungsgleich sind. Ist dies der Fall, trifft das LM die Entscheidungen anhand des später eintretenden Leistungsbedarfs der Anlage.

Die Prüfung des LM teilt sich in die Prüfung und Wahrung der Leistungsspitze und des Leistungsmittelwerts. Für die Validierung der Arbeitsweise beim Prüfen des maximalen Leistungsbedarfs wird die Simulation vorerst mit einer sehr hohen Leistungsgrenze (im Folgenden „ohne Leistungsgrenze“ bezeichnet, ca. 1000 kW) und anschließend mit einer niedrigen Leistungsgrenze durchgeführt. Diese ist niedriger als der maximale Leistungsbedarf der Simulation ohne Leistungsgrenze. Wenn die Leistungsgrenze gewahrt wird, begrenzt das LM die Leistungsspitzen. Wird die Leistungsgrenze verletzt, liegt ein Fehler in der Implementierung vor. Bei der Prüfung der Wahrung des Leistungsmittelwerts wird analog vorgegangen. In einem weiteren Schritt wird die Leistungsvoraussage des LM mit dem simulierten Leistungsbedarf der gesamten Anlage verglichen. Vorhandene Abweichungen werden auf Fehler in der Funktionsweise oder Programmierung des LM überprüft.

In Abbildung 5-49 ist der Leistungsbedarf für drei parallele AKL abgebildet. Die maximale Leistungsspitze liegt bei der Simulation ohne Leistungsgrenze bei ca. 100 kW.

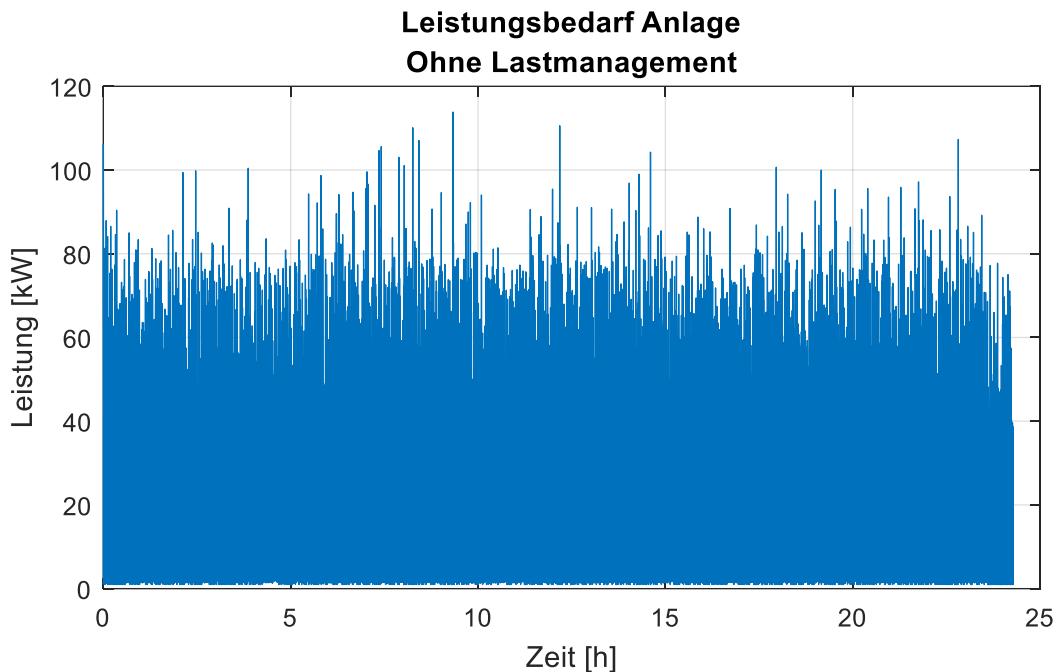


Abbildung 5-49: Leistungsbedarf 3 AKL ohne Leistungsgrenze oder Lastganggrenze

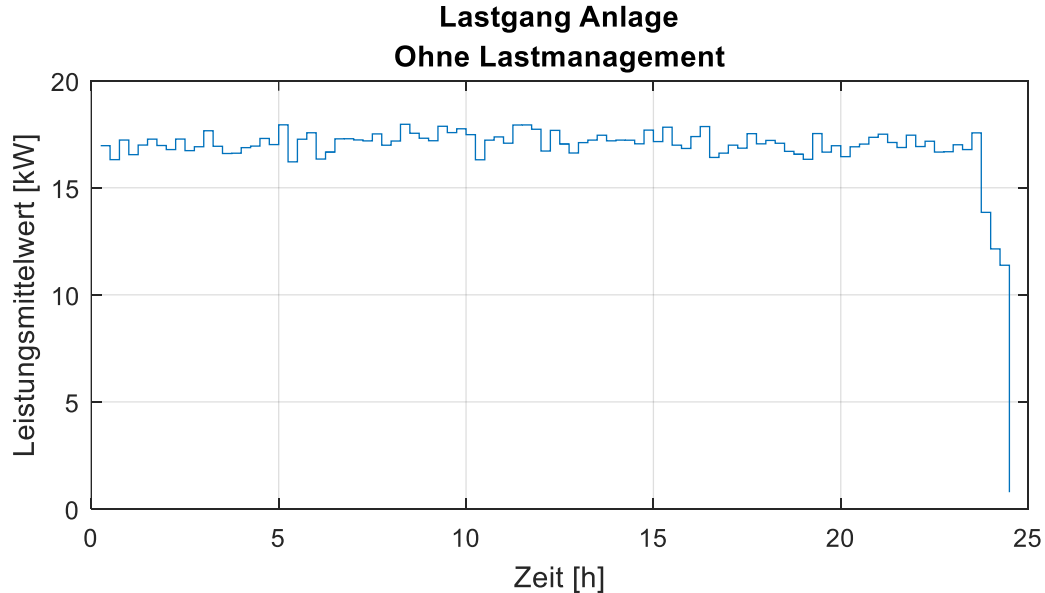


Abbildung 5-50: Leistungsmittelwerte für 3 AKL ohne Leistungsgrenze oder Lastganggrenze

Die Leistungsmittelwerte für diese Simulation sind in Abbildung 5-50 dargestellt. Der maximale Leistungsmittelwert liegt bei 17,96 kW. Für die Überprüfung der Funktionsweise des LM werden die Grenzen so ausgewählt, dass das LM mehr als einmal Teilaufträge verschieben muss. Aus diesem Grund wird für die Prüfung der Leistungs-

grenze diese für eine erste Simulation auf 80 kW und für eine zweite auf 60 kW festgelegt. Für den Leistungsmittelwert wird eine Grenze von 14 kW für die erste Prüfung und eine Grenze von 12 kW für die zweite Prüfung festgelegt.

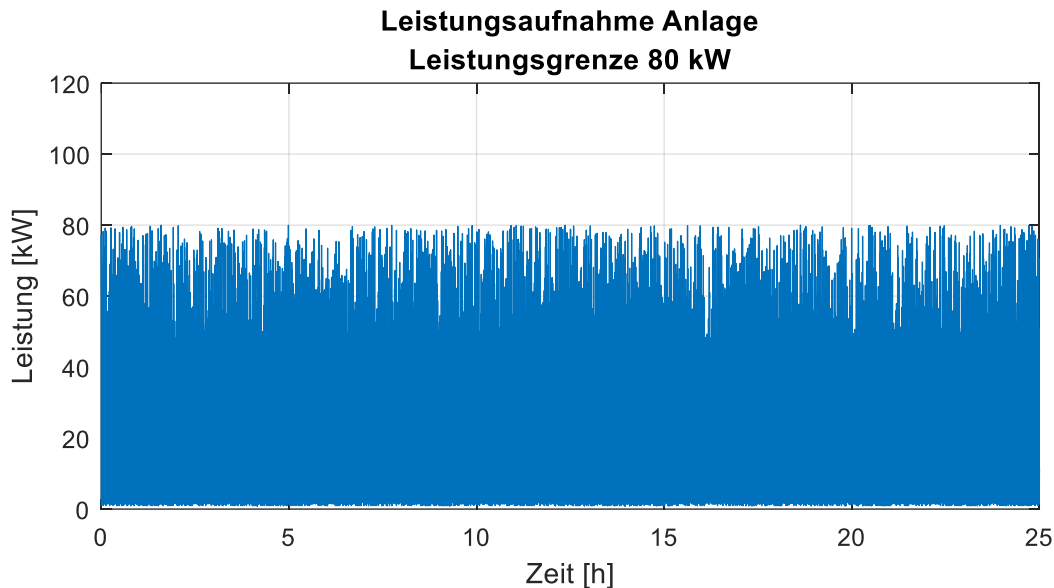


Abbildung 5-51: Leistungsbedarf 3 AKL mit einer Leistungsgrenze von 80 kW

Die Ergebnisse der Simulation mit der Leistungsgrenze von 80 kW sind in Abbildung 5-51 dargestellt. Wie zu sehen ist, wird die Leistungsgrenze von 80 kW optisch eingehalten. Bei einer genauen Betrachtung liegt der maximale Leistungsbedarf der Anlage teilweise minimal über der Leistungsgrenze.

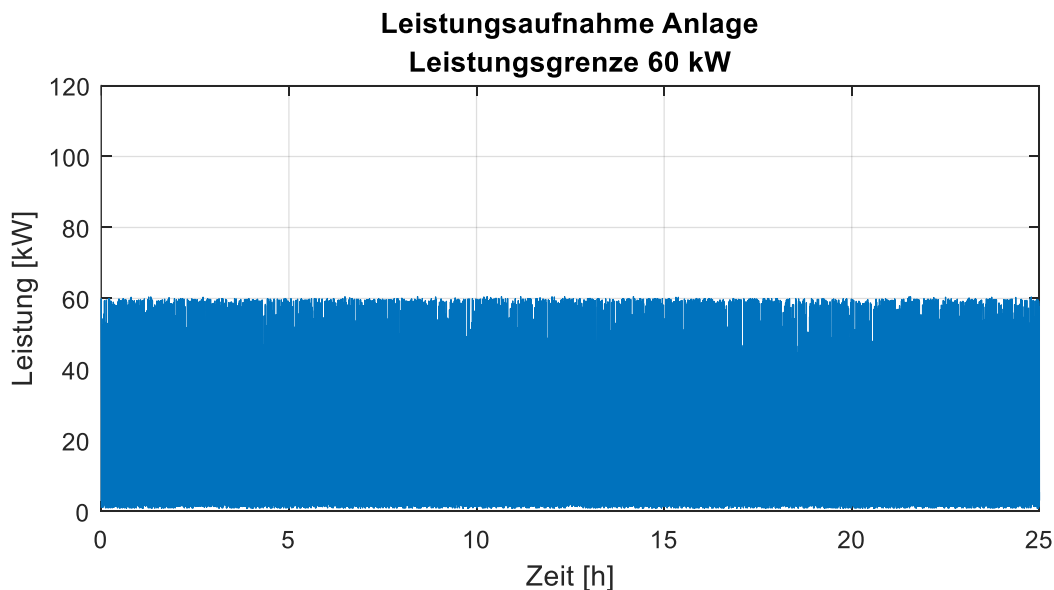


Abbildung 5-52: Leistungsbedarf 3 AKL mit einer Leistungsgrenze von 60 kW

Die Ergebnisse der Simulation mit der Leistungsgrenze von 60 kW sind in Abbildung 5-52 dargestellt. Die Leistungsgrenze wird teilweise minimal überschritten. Die Ursachen hierfür werden im folgenden Schritt ermittelt.

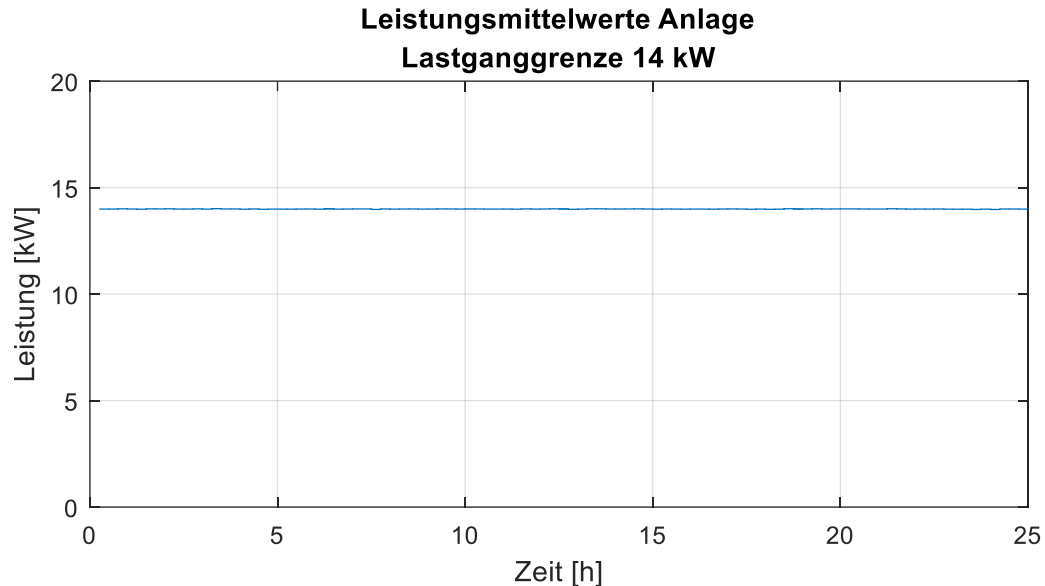


Abbildung 5-53: Leistungsbedarf 3 AKL mit einer Lastganggrenze von 14 kW

Der simulierte Lastgang der 3 AKL mit einer Lastganggrenze von 14 kW ist in Abbildung 5-53 dargestellt. Es ist zu sehen, dass das LM die die Leistungsmittelwerte, im Gegensatz zu dem Lastgang ohne LM (Abbildung 5-50), auf die Grenze begrenzt.

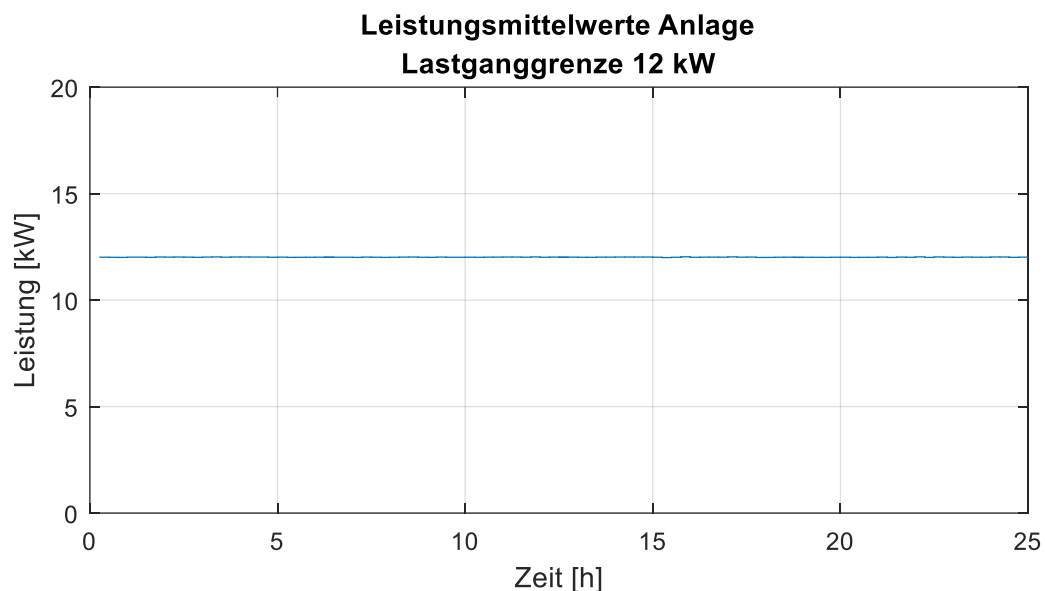


Abbildung 5-54: Leistungsbedarf 3 AKL mit einer Grenze für den Leistungsmittelwert von 12 kW

In Abbildung 5-54 ist der Lastgang der Simulation mit einer Grenze für den Leistungsmittelwert von 12 kW dargestellt. Wie in der Abbildung zu sehen ist, wird der Grenzwert mit dem LM über die gesamte Simulationszeit eingehalten.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das LM die gewünschte Funktion erfüllt. Im nächsten Schritt werden die Ursachen für die Überschreitungen ermittelt. Hierfür wird die Leistungsvoraussage des LM mit dem simulierten Leistungsbedarf verglichen. Abweichungen beider Kurven weisen auf Funktionsfehler des LM oder der Berechnung der Leistungsvoraussagen hin.

Der Vergleich des simulierten Leistungsbedarfs und der Leistungsvoraussage des LM ist in Abbildung 5-55 dargestellt. Diese beinhaltet die Leistungsvoraussagen, die Leistungsbedarfe und die Differenz zwischen der simulierten und virtuellen Leistung der Anlage. Die Leistungsvoraussagen und die Leistungsbedarfe teilen sich in die Angabe zur Anlage und die der einzelnen RBG. Die Differenz identifiziert die Abweichungen zwischen der Leistungsvoraussage (virtuell) und dem Leistungsbedarf (simuliert) der Anlage. Die durchschnittliche Differenz beträgt für diese Simulation -0,073 kW. Das sind -0,22 kWh und bei einem gesamten Energiebedarf von 43,25 kWh für den Simulationslauf eine Abweichung von 0,51 %.

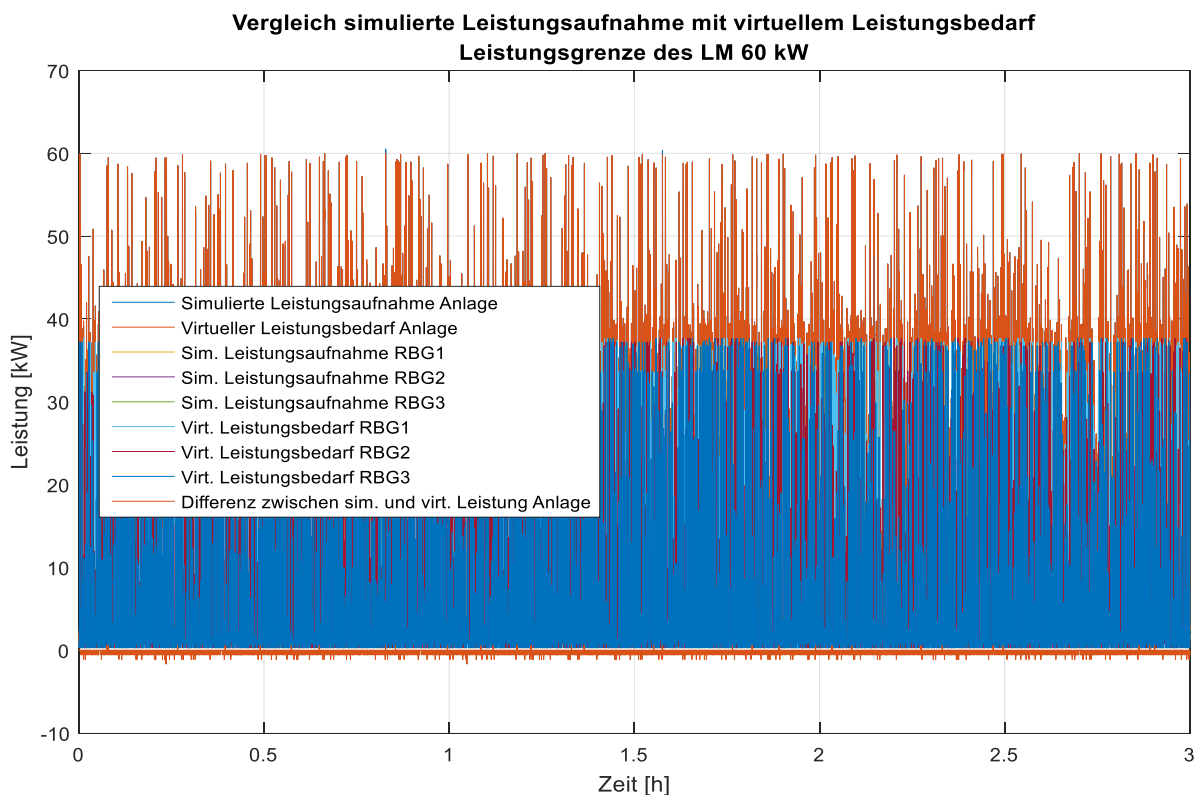


Abbildung 5-55: Vergleich des Leistungsbedarfs und der Leistungsvoraussage der Anlage und der RBG

In Abbildung 5-56 ist zu sehen, dass der Betrag der Abweichungen kleiner ist als 2 kW. Dies deutet auf eine sehr genaue Übereinstimmung der Kurven hin. Des Weiteren sind die meisten Abweichungen negativ. Das bedeutet in diesem Fall, dass in der Leistungsvoraussage ein höherer Leistungswert berechnet als simuliert wurde. In diesen Situationen wurde vom Lastmanagement ein höherer Leistungsbedarf vorausgesagt, als in der Simulation aufgetreten ist. Dies führt dazu, dass die verfügbare elektrische Leistung nicht vollständig ausgenutzt wird. Bei positiven Differenzen ist der Leistungsbedarf während der Simulation höher als der vom LM vorausgesagte. Im schlimmsten Fall könnte in einer solchen Situation die Leistungsgrenze überschritten werden. Aus diesem Grund wird im folgenden Schritt die Ursache für die Abweichungen an den Stellen 1 und 2 analysiert. Dafür werden die simulierten Leistungsbedarfe und die Leistungsvoraussagen der einzelnen RBG an beiden Stellen miteinander verglichen und auf Abweichungen untersucht.

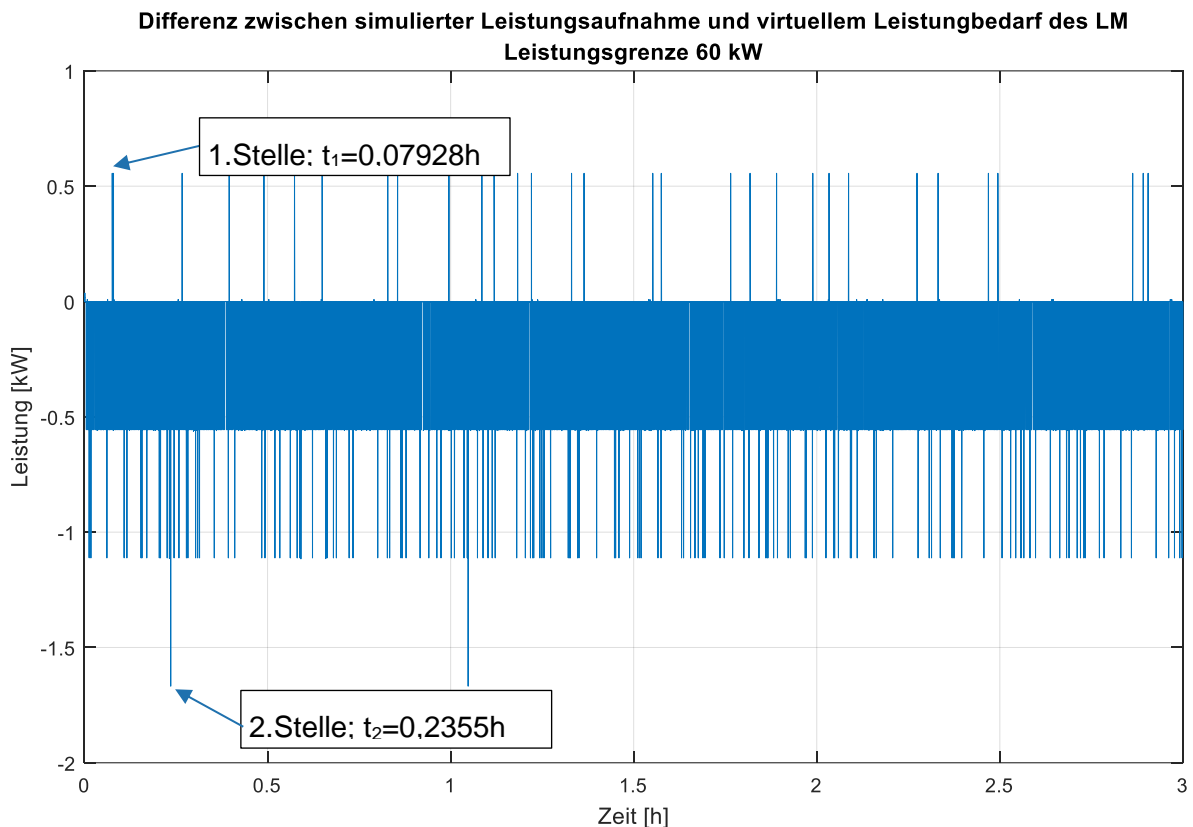


Abbildung 5-56: Differenz zwischen Leistungsbedarf und Leistungsvoraussage LM für die Anlage, Leistungsgrenze 60 kW

An der 1. Stelle ergibt sich eine positive Differenz zwischen dem simulierten Leistungsbedarf und der virtuellen Leistungsvoraussage des LM. Die 1. Stelle tritt nach 0,07928 Stunden der Simulationszeit auf. Der simulierte Leistungsbedarf der Anlage ist an der Untersuchungsstelle $t_1 = 0,07928 h$ in der Spitze ca. 0,556 kW größer als die virtuelle

Leistungsvoraussage des LM. Die Analyse der 1. Stelle ist in Abbildung 5-57 dargestellt. Die erste Abbildung zeigt die simulierte Leistungsaufnahme der Anlage und den virtuellen Leistungsbedarf der Anlage, der vom Lastmanagement berechnet wurde. In der zweiten Abbildung wird die Differenz zwischen der simulierten Leistungsaufnahme und dem virtuellen Leistungsbedarf dargestellt. In der dritten bis fünften Abbildung werden die simulierten Leistungsaufnahmen den virtuellen Leistungsbedarfen der einzelnen RBG gegenübergestellt.

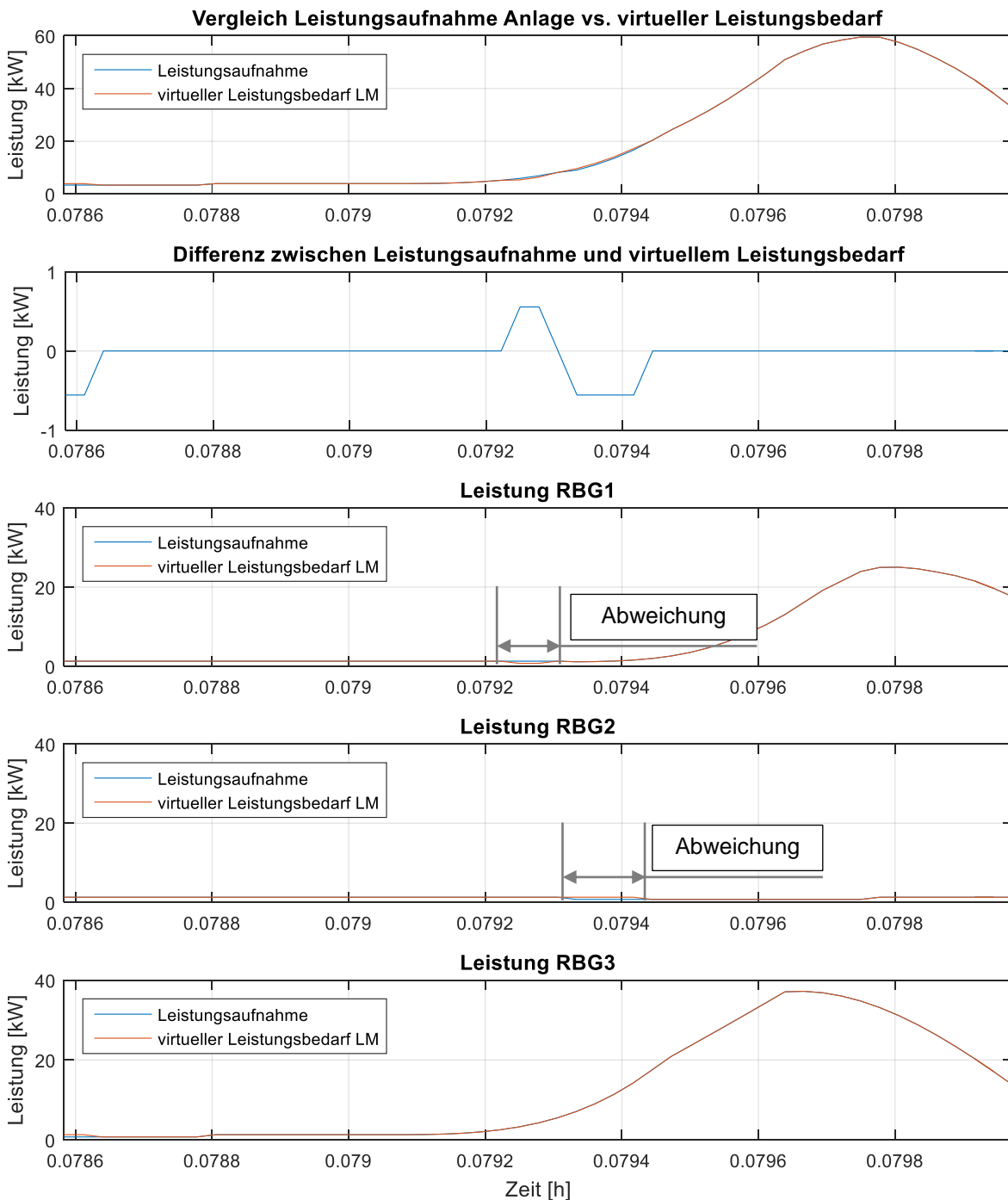


Abbildung 5-57: Verifizieren der Arbeitsweise des LM; Zeitpunkt $t_1 = 0,07928$ h

Im Vergleich der Leistungsaufnahme mit dem virtuellen Leistungsbedarf ist zwischen dem Zeitpunkt 0,0792 h und ca. dem Zeitpunkt 0,07945 h eine Abweichung der beiden Kurven zu sehen. Die Abweichung zwischen den beiden Kurven hat eine Dauer von ca. 0,6 s und ist 0,2 s positiv und 0,4 s negativ. Der Wert der positiven Abweichung beträgt 0,56 kW und hat eine Dauer von 0,2 s. Die negative Abweichung hat eine Dauer von 0,4 s und beträgt 0,56 kW. Für die Analyse der Ursache der Abweichung werden im Folgenden die simulierten Leistungsaufnahmen und die virtuellen Leistungsbedarfe der RBG miteinander verglichen.

In Abbildung 5-57 wird in der dritten Darstellung „Leistung RBG1“ die simulierte Leistungsaufnahme mit dem virtuellen Leistungsbedarf des RBG 1 abgebildet. Wie zu sehen ist, weichen die Kurven im Zeitraum von ca. 0,0792 h bis ca. 0,0793 h voneinander ab. Bei einer genaueren Untersuchung dieses Zeitraums hat sich herausgestellt, dass zu diesem Zeitpunkt eine Anfrage dieses RBG aktiv war. Die Leistungsaufnahme des RBG ist bei geöffneter Bremse höher, da der Antrieb magnetisiert und ein Moment aufgebaut wird. Bei den virtuellen Leistungsvoraussagen der Teilaufträge der RBG wird die Bremse ausschließlich für die Bremseneinfallzeit offen gehalten. Nicht berücksichtigt wird, dass die Bremse während der aktiven Anfrage offen gehalten wird. Aus diesem Grund ist die simulierte Leistungsaufnahme der Anlage zu diesem Zeitpunkt höher als der virtuelle Leistungsbedarf.

In der Abbildung des zweiten RBG ist eine Abweichung zwischen dem Zeitpunkt ca. 0,0793 h und dem Zeitpunkt ca. 0,07945 h zu sehen. Hier handelt es sich um eine negative Abweichung. Diese entstehen, wenn bei der Simulation der realen Anlage die Bremse früher geschlossen wird, als es von der Leistungsvoraussage berechnet wird. Die Begründung für diesen Fall wird bei der Untersuchung der 2. Stelle beschrieben. Bei dem RBG 3 weicht der virtuelle Leistungsbedarf nicht von der simulierten Leistungsaufnahme ab.

Die 2. Stelle aus Abbildung 5-56 wird detailliert in Abbildung 5-58 dargestellt. Im Vergleich der simulierten Leistungsaufnahme mit dem virtuellen Leistungsbedarf des LM der Anlage tritt eine negative Abweichung von 1,0 s auf. 0,4 s beträgt die Abweichung ca. -0,556 kW, 0,4 s beträgt sie ca. -1,112 kW und 0,2 s beträgt sie ca. -1,668 kW. Bei einer Betrachtung der Leistung des RBG1 weichen die beiden Kurven von ca. dem Zeitpunkt 0,23545 h bis ca. zu dem Zeitpunkt 0,23565 h voneinander ab. Die Differenz ist ca. -0,556 kW.

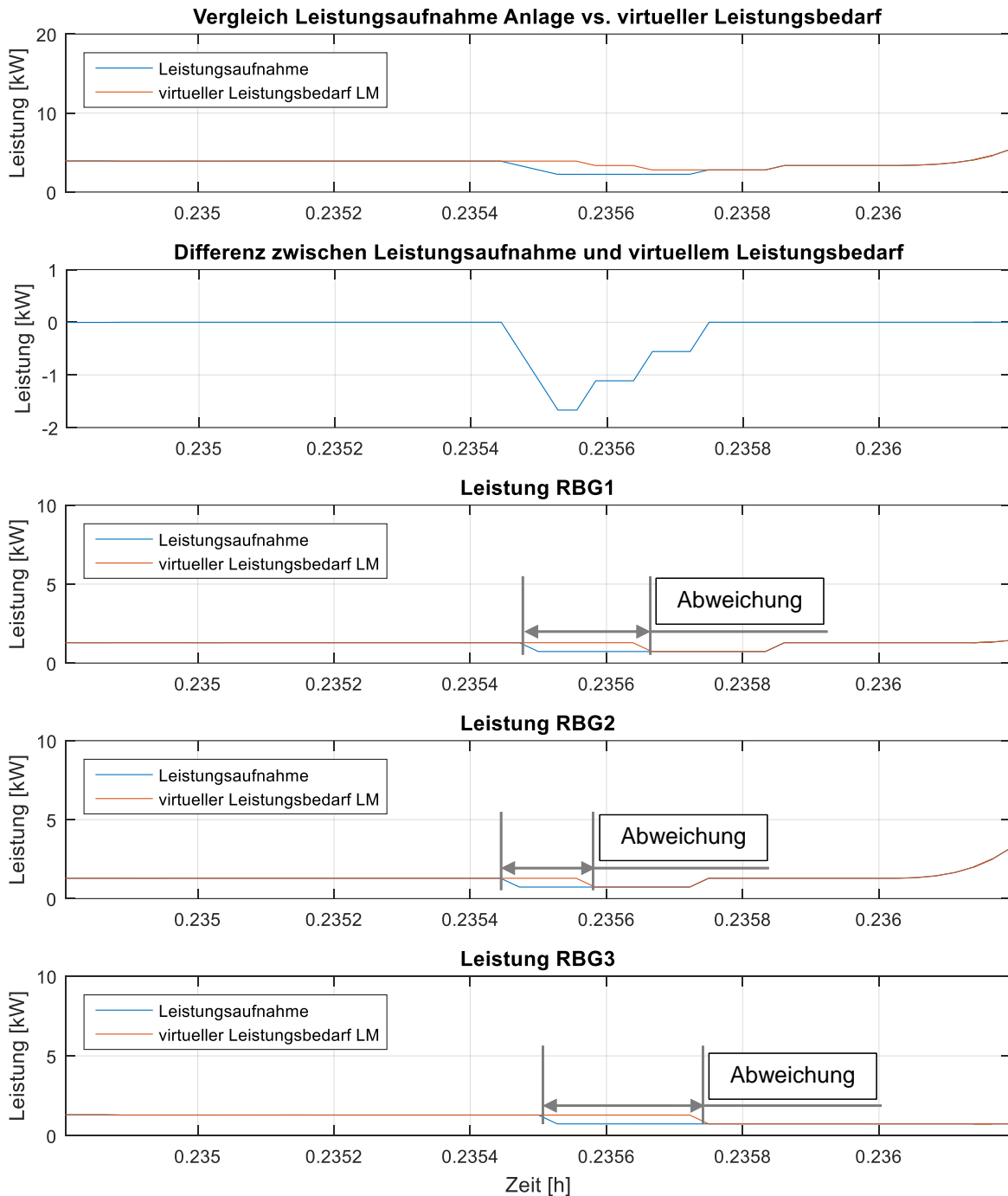


Abbildung 5-58: Verifizieren der Arbeitsweise des LM zum Zeitpunkt $t_1 = 0,2355 \text{ h}$

Die Abweichung resultiert aus unterschiedlichen Bremsenzuständen. Bei der simulierten Leistungsaufnahme des RBG 1 schließt die Fahrwerksbremse zum Start der Abweichung. Beim virtuellen Leistungsbedarf schließt die Fahrwerksbremse später. Dieser Zustand resultiert aus der Systematik der Berechnung des virtuellen Leistungsbedarfs. Für diese wird der Zustand des RBG erfasst und mit diesem der virtuelle Leistungsbedarf für den Teilauftrag berechnet. Der Zustand der Bremsen wird als „offen“ oder „geschlossen“ erfasst. Dabei wird nicht erfasst, wie viel Zeit der Bremsenwartezeit

bereits abgelaufen ist. Bei der virtuellen Leistungsberechnung des LM fängt die Bremsenwartezeit wieder bei null an. Damit kommt es vor, dass eine der Bremsen einen Simulationsschritt nach der Freigabe einfällt und die simulierte Leistungsaufnahme 4,9 s vom virtuellen Leistungsbedarf abweicht.

Bei RBG 2 und RBG 3 liegt bei den Abweichungen die gleiche Situation vor. Bei beiden Abweichungen sind die Zustände der Bremsen in der simulierten Leistungsaufnahme und dem virtuellen Leistungsbedarf unterschiedlich. Bei RBG 2 entsteht dadurch eine Abweichung in einer Länge von 0,5 s und bei RBG 3 in einer Länge von 0,9 s.

5.7 Zusammenfassung Verifikation und Validierung

In diesem Kapitel wurden die Verifikation und Validierung des Simulationsmodells beschrieben. Mit der Verifikation und Validierung wird überprüft und dargestellt, dass das Simulationsmodell für die Beantwortung der Forschungsfragen geeignet ist. Die wird in den Schritten „Verifikation“, „Datenerfassung“, „Kalibrierung und Validierung der RBG-Parameter“, „Validierung der Leistungsberechnung von einzelnen Fahrten“, „Validierung der Leistungsberechnung von mehreren parallelen RBG über einen längeren Zeitraum“ und der „Validierung der Funktionsweise des LM“ durchgeführt. In den Schritten wird anhand von Messungen an realen Anlagen nachgewiesen, dass das Simulationsmodell den Leistungsbedarf der realen Anlage ausreichend genau berechnet. Die Arbeitsweise des LM kann nicht mit Daten einer realen Anlage validiert werden, da das LM bisher nicht existiert. Die korrekte Arbeitsweise und der Funktionsumfang des LM ist anhand von Simulationsdaten nachgewiesen worden. Aufgetreten sind negative und positive Leistungsunterschiede. Beide resultieren aus der Abbildung des Bremsenzustandes. Die negative Abweichung tritt pro RBG auf und beträgt bei den untersuchten AKL 0,56 kW. Bei der Freigabe des Teilauftrags geht das LM von einem höheren Leistungsbedarf aus als tatsächlich benötigt wird und nutzt damit die Leistungsgrenze nicht aus. Bei einer positiven Abweichung wird die Bremse des RBG vom Lastmanagement gehalten, um ein ungewolltes Einfallen zu verhindern. Hierdurch kann bei den untersuchten AKL eine Abweichung von 0,56 kW entstehen. Um diesen Wert kann im schlimmsten Fall die Leistungsgrenze überschritten werden. Gleichzeitig kann die positive Abweichung bei mehreren RBG nicht vorkommen, da das LM das Signal zum Halten der Bremse ausschließlich einem RBG sendet.

Für die Prüfung der Lastganggrenze sind die Abweichungen zwischen der Leistungsaufnahme und der Leistungsvoraussage nicht relevant. Die kumulierte Abweichung

beträgt ca. 0,5 % der Energiebedarfsberechnung. Die Validierung ist somit positiv abgeschlossen und die Forschungsfragen können mit dem Simulationsmodell beantwortet werden.

6 Simulation und Ergebnisse

Dieses Kapitel beschreibt die Planung, Durchführung und Auswertung der Simulationsexperimente. Ziel ist es, mittels Simulation die Auswirkung der verschiedenen Leistungs- und Lastganggrenzen des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung unterschiedlicher Lagersysteme zu quantifizieren. Die Experimentplanung „... hat zum Ziel, die oft sehr große Zahl der möglichen Simulationsläufe in Bezug auf die konkrete Zielsetzung auf das notwendige und sinnvolle Maß zu reduzieren, ohne die Anforderung der Statistik an die Datenqualität und -quantität zu verletzen“ [VDI-3633c]. Folglich wird in der Experimentplanung festgelegt, wie die Forschungsfrage mit den Simulationsergebnissen beantwortet wird und wie viele Simulationsläufe für eine sichere Aussage durchgeführt werden müssen. Hierfür werden die Einflussgrößen und deren Stufen für die Simulation ermittelt, deren Effekt bewertet und auf Basis dessen die signifikanten Einflussgrößen für die Simulation ausgewählt. Abhängig vom Effekt bzw. Wechselwirkung der Einflussgrößen auf die Zielgrößen ergibt sich die Anzahl der Simulationsläufe.

Das Modellverhalten wird mit Hilfe von Simulationsexperimenten untersucht. Bei diesen werden systematisch die Eingangsparameter variiert, um die Auswirkungen dieser auf die Ausgangsparameter zu ermitteln. Die Eingangsparameter sind die RBG-Parameter, das Anlagenlayout und die Einstellungen des LM. Die Ausgangsparameter sind die Durchsatzleistung und der Energiebedarf des Lagersystems.

Die Auswertung der Ergebnisse folgt auf die Simulationsexperimente. Die Ergebnisse werden interpretiert und Aussagen zu den Forschungsfragen abgeleitet.

6.1 Grundlagen der Versuchsplanung und Varianzanalyse

Bevor die Durchführung der Versuchsplanung beschrieben wird, werden in diesem Kapitel die Grundlagen dieser und die Varianzanalyse in Anlehnung an *Kleppmann* beschrieben [Kle-2016]. Eine Zielgröße (Y) beschreibt das Ergebnis der Simulation, wie in diesem Fall die Durchsatzleistung des Lagersystems. Die Zielgrößen werden möglicherweise von den Einflussgrößen beeinflusst. Die Einflussgrößen für den Versuch werden als Faktoren (X_i) bezeichnet. Die Faktoren werden bei den Versuchen ($n = 1, \dots, N$) variiert. Die Werte für die Faktoren sind die Faktorstufen ($g = 1, \dots, G$). Die Faktoren selbst werden nach Ihrer Art unterschieden. Es gibt quantitative (nume-

rische) und qualitative (kategorische) Faktoren. Quantitative Faktoren sind Zahlenwerte einer Skala wie bspw. die Anzahl an RBG oder die Leistungsgrenze. Die qualitativen Faktoren sind Namen, Beschreibungen oder Bezeichnungen, die keiner Skala unterliegen (bspw. AKL oder APL; „Mit Zwischenkreiskopplung“ oder „Mit Energierückspeisung“).

Der Einfluss bzw. die Wirkung eines Faktors auf das Ergebnis bzw. das System wird als Effekt (E_i) bezeichnet. Dieser gibt an, „um wie viel sich die Mittelwerte der Versuchsergebnisse bei der einen Faktorstufe (bspw. $g = 1$) von denen der anderen (bspw. $g = 2$) unterscheiden“ [Kle-2016, S. 330]. Der Effekt berechnet sich aus der Differenz der Mittelwerte \bar{y}_g der unterschiedlichen Faktorstufen g :

$$E_i = \bar{y}_{g=2} - \bar{y}_{g=1} = \frac{\sum_{j=1}^{J_2} y_{g=2,j}}{J_2} - \frac{\sum_{j=1}^{J_1} y_{g=1,j}}{J_1} \quad (6-1)$$

Die Anzahl der Versuche pro Faktorstufe J_i ist bei den in dieser Dissertation angewandten Versuchsplänen gleich ($J_1 = J_2$). Dargestellt werden die Effekte in Effekt-Diagrammen. In diesen sind auf der horizontalen Achse die Faktoren mit den jeweiligen Faktorstufenwerten oder den Faktorstufenkodierungen (bspw. „-“ für untere und „+“ für obere Stufe) aufgeführt. Auf der vertikalen Achse ist der Wert der Zielgröße aufgetragen. In Abbildung 6-1 sind die Haupteffekte dreier Faktoren und einige deren Wechselwirkungen dargestellt. Die Faktoren „A“, „B“ und „C“ haben einen positiven Haupteffekt auf die Zielgröße „Reichweite“. Eine Wechselwirkung beschreibt, wie der Effekt des einen Faktors von der Faktoreinstellung des anderen Faktors abhängt. Bei parallel verlaufenden Linien existiert keine Wechselwirkung zwischen den Faktoren.

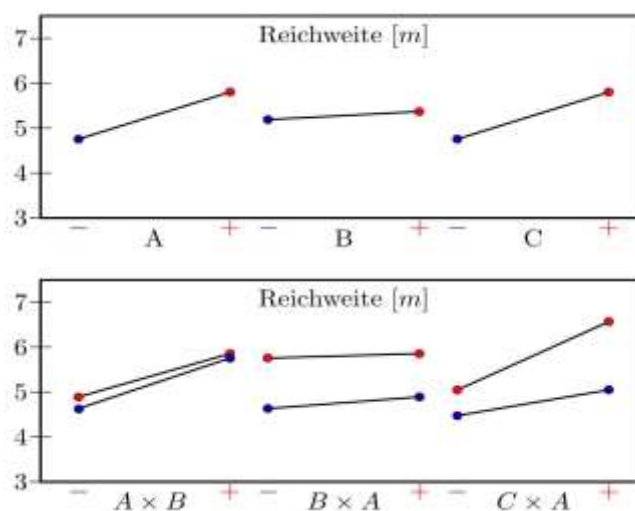


Abbildung 6-1: Effekt-Diagramm für die Haupteffekte (oben) und für einige deren Wechselwirkungen (unten, Farbe ist die Faktorstufe des 2. Faktors) [Sie-2010, S. 22]

Für die Versuchsplanung und die Auswertung wird in dieser Dissertation das Statistikprogramm Minitab verwendet. Mit diesem werden Screening-Versuchspläne erstellt und diese anschließend mittels Varianzanalyse (ANalysis Of VAriance, ANOVA) ausgewertet. Screening-Versuchspläne werden für die grobe Untersuchung der Haupteffekte und der niedrigen Wechselwirkungen von vielen Faktoren verwendet. Das Ergebnis beschreibt welche Faktoren signifikant sind und welche nicht signifikant sind und ausgesiebt werden können. Mit einer ANOVA werden die Versuchsergebnisse ausgewertet, die Wahrscheinlichkeitswerte für die Effekte berechnet und zwischen wahren und scheinbaren Effekten unterschieden [Sie-2010]. Wahre Effekte sind reproduzierbar und beschreiben, wie sich eine Eingangsgröße auf die Ausgangsgröße(n) des Systems auswirkt. Ein scheinbarer Effekt ist dem Zufall geschuldet und ist nicht reproduzierbar. Neben der Unterscheidung der Effekte kann mittels Varianzanalyse eine Aussage über die Güte des Modells getroffen werden. Zum besseren Verständnis wird nachfolgend das Grundprinzip der ANOVA grob beschrieben.

Bei der Varianzzerlegung wird die Variation in die Faktoreffekte (Variation zwischen den Gruppen) und die Variation innerhalb der Gruppen („Rauschen“) eingeteilt [Sie-2010]. Mit Hilfe dieser Zerlegung wird festgestellt, ob und welche Effekte zufällig auftreten oder signifikant sind.

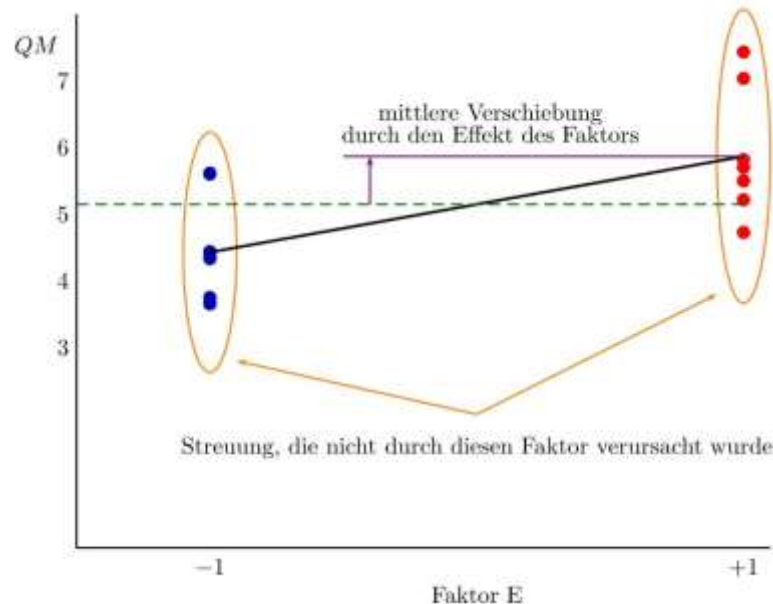


Abbildung 6-2: Unterteilung der Streuung in Streuung, die durch den Faktor verursacht wurde und Streuung, die nicht von diesem Faktor verursacht wurde [Sie-2010, S. 70]

Im ersten Schritt wird die Summe der quadrierten Abweichungen TSS (Total Sum of Squares) der Versuche berechnet. Sie wird aus der Anzahl der Versuche n_r , den Ergebnissen des jeweiligen Versuchs y_i und dem Gesamtmittelwert der Versuchsergebnisse \bar{y} berechnet:

$$TSS = \sum_{i=1}^{n_r} (y_i - \bar{y})^2 \quad (6-2)$$

Die Summe der quadrierten Abweichungen setzt sich aus der Summe der quadrierten Abweichungen zwischen den Faktorstufen SSB (Sum of Squares Between Groups), die durch die Faktoreffekte entstehen, und die Summe der quadrierten Abweichungen innerhalb der Faktorstufen SSW (Sum of Squares Within Groups), die nicht durch die Faktoren entstehen, zusammen. Damit ist nach *Siebertz et al.* [Sie-2010]:

$$TSS = SSB + SSW \quad (6-3)$$

Die Summe der quadrierten Abweichungen innerhalb der Faktorstufen SSW berechnet sich aus den Versuchsergebnissen der jeweiligen Faktorstufen y_{gk} und den Gruppenmittelwerten der jeweiligen Faktorstufen \bar{y}_g :

$$SSW = \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K (y_{gk} - \bar{y}_g)^2 \quad (6-4)$$

Die Summe der quadrierten Abweichungen zwischen den Faktorstufen berechnet sich folgenderweise:

$$SSB = \sum_{g=1}^G K * (\bar{y}_g - \bar{y})^2 \quad (6-5)$$

Zur Bewertung der Signifikanz eines Effekts oder einer Wechselwirkung wird die Testgröße $F_{Prüfi}$ ermittelt. Aus dieser leitet sich ab, ob es sich um einen wahren Effekt handelt. Mittels Vergleich dieser Testgröße mit dem F-Wert für die geforderte Wahrscheinlichkeit leitet sich die Signifikanz des Effekts ab. Die Testgröße berechnet sich aus der mittleren quadratischen Abweichungen MS (Mean Squares) des Faktors und der des Fehlers.

$$F_{Prüfi} = \frac{MS_i}{MS_{Fehler}} \quad (6-6)$$

Die mittleren quadratischen Abweichungen MS_i (Mean Squares) setzen die Summe der quadrierten Abweichungen SSB_i in Relation zu den Freiheitsgraden DF_i (degrees of freedom) des Faktors bzw. der Wechselwirkung:

$$MS_i = \frac{SSB_i}{DF_i} \quad (6-7)$$

Die Freiheitsgrade des Modellparameters DF_i berechnen sich aus der Anzahl der Faktorstufen G folgenderweise:

$$DF_i = G - 1 \quad (6-8)$$

Die Freiheitsgrade für den Versuchsplan DF_{VP} berechnen sich aus der Anzahl der Versuche n_r :

$$DF_{VP} = n_r - 1 \quad (6-9)$$

Nachdem die Freiheitsgrade für die Modellparameter DF_i und für den Versuchsplan DF_{VP} berechnet wurden, werden die Freiheitsgrade des Fehlers DF_F berechnet. Dem Fehler werden die nicht durch die Modellparameter bzw. die Wechselwirkungen verwendeten Freiheitsgrade zugeschrieben. Sie berechnen sich mit der Anzahl der berechneten Haupteffekte und Wechselwirkungen MP zu:

$$DF_F = DF_{VP} - \sum_{i=1}^{MP} DF_i \quad (6-10)$$

Der F-Wert für die Wahrscheinlichkeit wird aus Tabellen entnommen. Wenn die Testgröße größer ist als der F-Wert für die geforderte Wahrscheinlichkeit, kann die Nullhypothese verworfen werden. Diese besagt, dass die Ergebnisse durch Zufall zustande gekommen sind und die Eingangparameter keinen Einfluss auf das Ergebnis haben. In vielen Fällen wird die Signifikanz anhand des F-Werts $f_{DF_i;DF_F;WS}$ für die Wahrscheinlichkeit WS wie in Tabelle 6-1 eingeteilt [Kle-2016]. In dieser Arbeit wird eine Wahrscheinlichkeit von 95 % gefordert.

Tabelle 6-1: Einteilung der Signifikanz der F-Werte [Kle-2016]

$F_{DF_i;DF_F;WS}$	Signifikanzniveau	
	$F_{Test} \leq F_{DF_i;DF_F;0,95}$	- Kein Hinweis auf einen Unterschied
$F_{DF_i;DF_F;0,95}$	$F_{DF_i;DF_F;0,95} < F_{Test} \leq F_{DF_i;DF_F;0,99}$	* Indifferent
$F_{DF_i;DF_F;0,99}$	$F_{DF_i;DF_F;0,99} < F_{Test} \leq F_{DF_i;DF_F;0,999}$	** Signifikanter Unterschied
$F_{DF_i;DF_F;0,999}$	$F_{DF_i;DF_F;0,999} < F_{Test}$	*** Hochsignifikanter Unterschied

Zusätzlich wird für die Beurteilung der Signifikanz der p-Wert verwendet. Dieser wird vom Statistik-Programm Minitab berechnet und ausgegeben. Der p-Wert ist die statistische Irrtumswahrscheinlichkeit. Der p-Wert gibt an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass der Effekt rein zufällig ist. Die Einteilung der Signifikanz der p-Werte ist in Tabelle 6-2 dargestellt. Bei einer geforderten Wahrscheinlichkeit von 5 % ist das Ergebnis signifikant, wenn der p-Wert kleiner als 0,05 ist.

Tabelle 6-2: Bewertung der Signifikanz von p-Werten [Kle-2016]

$p - Wert$	Signifikanzniveau	
$p - Wert \geq 0,05$	-	Kein Hinweis auf einen Unterschied
$0,05 > p - Wert \geq 0,01$	*	Indifferent
$0,01 > p - Wert \geq 0,001$	**	Signifikanter Unterschied
$0,001 > p - Wert$	***	Hochsignifikanter Unterschied

Bei einer Untersuchung kann es vorkommen, dass nicht alle Faktoren berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird das Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet. Es gibt an, welcher Anteil der Gesamtvariabilität der Daten durch die untersuchten Faktoren erklärt werden kann:

$$R^2 = \frac{SSB}{TSS} = 1 - \frac{SSW}{TSS} \quad (6-11)$$

Das Bestimmtheitsmaß ist abhängig von der Restvarianz bzw. dem Fehler (SSW). Dieser sinkt mit einer steigenden Anzahl an untersuchten Parametern automatisch. Um Fehleinschätzungen auf Grund des Bestimmtheitsmaßes zu vermeiden, wird deshalb zusätzlich das adjustierte Bestimmtheitsmaß R_{adj}^2 berechnet. Dieses gibt unter Berücksichtigung der Anzahl der geschätzten Modellkonstanten n_m die „Effizienz“ des Modells wieder. Die geschätzten Modellkonstanten werden aus den insgesamt verfügbaren Messungen n_r geschätzt [Sie-2010, S. 118]. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß R_{adj}^2 bestimmt sich zu:

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{\frac{SSW}{n_r - n_m}}{\frac{TSS}{n_r - 1}} = 1 - \frac{n_r - 1}{n_r - n_m} * (1 - R^2) \quad (6-12)$$

In den Tabellen und Diagrammen von Minitab werden teilweise t-Werte dargestellt. Der t-Wert ist eine Teststatistik für den t-Test. Bei diesem wird der t-Wert des Faktors mit dem theoretischen t-Wert für die Vertrauenswahrscheinlichkeit verglichen. Ist der Betrag des t-Werts für den Faktor größer als der theoretische t-Wert, kann die Nullhypothese H_0 verworfen werden, d. h., der Effekt ist für diese Vertrauenswahrscheinlichkeit signifikant. Ist der Betrag des t-Werts kleiner oder gleich dem theoretischen t-Wert, wird H_0 nicht verworfen. Der theoretische t-Wert wird aus der Tabelle in Abbildung A-2 in Abhängigkeit der Freiheitsgrade entnommen. Der t-Wert des Faktors t_i berechnet sich aus dem Standardfehler des Faktors i oder der Wechselwirkung i $SeKoeff_i$ folgenderweise:

$$t_i = \frac{Koeff_i}{SeKoeff_i} \quad (6-13)$$

Bei orthogonalen Versuchsplänen ist der Standardfehler für alle Faktoren gleich und berechnet sich zu:

$$SeKoeff_i = \sqrt{\frac{\frac{SSW}{DF_{SSW}}}{n_r}} \quad (6-14)$$

6.1.1 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse ist ein sehr häufig eingesetztes Analyseverfahren, um den Zusammenhang zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen zu ermitteln [Bac-2016, S. 63]. Bei einer Regressionsanalyse wird die Kausalbeziehung zwischen der oder den Einflussgrößen X und der Zielgröße Y untersucht. Größtenteils werden lineare Zusammenhänge untersucht, bei geeigneter Transformation können auch nichtlineare Zusammenhänge untersucht werden [Kle-2016, S. 183]. Bei der einfachen linearen Regression ist der Ansatz für die Regressionsgerade \hat{Y} [Kle-2016]folgender:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 * X \quad (6-15)$$

b_1 ist der Regressionskoeffizient und b_0 das konstante Glied. Alle Versuchsergebnisse y_n befinden sich um die Residualgrößen e (im Folgenden Residuen genannt) entfernt von der Regressionsgerade \hat{Y} :

$$y_i = \hat{Y} + e = b_0 + b_1 * X + e \quad (6-16)$$

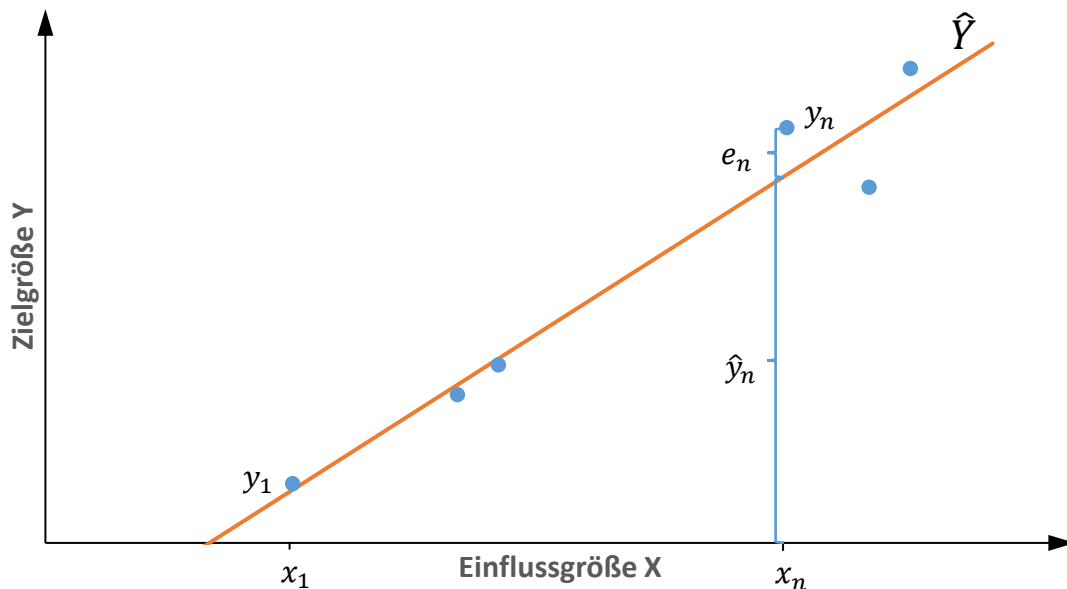


Abbildung 6-3: Streudiagramm mit Regressionsgerade und Residuum

Residuen e der einzelnen Messung sind der senkrechte Abstand des Versuchsergebnisses y_n zur Regressionsgeraden (siehe Abbildung 6-3). Diese Residuen entstehen durch systematische Einflussgrößen, die nicht erfasst wurden, zufällige Einflussgrößen, die nicht erfasst werden können, oder Mess- oder Beobachtungsfehler. Sie berechnen sich zu:

$$e_n = y_n - b_0 + b_1 * x_n \quad (6-17)$$

Mit einer Regressionsanalyse wird die Regressionsgerade gesucht, bei der die Summe der Quadrate der Residuen minimal ist. Dieses Kleinst-Quadrate-Kriterium wird folgenderweise formuliert:

$$\sum_{n=1}^N e_n^2 = \sum_{n=1}^N (y_n - (b_0 + b_1 * x_n))^2 \rightarrow \min \quad (6-18)$$

Der Regressionskoeffizient b_1 und das konstante Glied b_0 der Regressionsgeraden berechnen sich zu:

$$b_1 = \frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})}{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2} \quad (6-19)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (6-20)$$

Im vorliegenden Fall ist die Zielgröße Y von vielen unabhängigen Einflussgrößen X_i abhängig, weshalb die multiple Regression angewandt wird. Der Regressionsansatz ist folgender:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_i x_i + \dots + b_I x_I \quad (6-21)$$

Die Regressionsparameter b_i werden wie bei der einfachen linearen Regression ermittelt, indem die Summe der Abstandquadrate minimiert wird. Die Zielfunktion der multiplen Regressionsanalyse ist mit den Werten der Residualgröße e_n , der abhängigen Variablen y_n und der unabhängigen Variablen x_{in} , dem konstanten Glied b_0 , den Regressionskoeffizienten b_i , der Zahl der unabhängigen Variablen I und der Zahl der Versuche N somit:

$$\sum_{n=1}^N e_n^2 = \sum_{n=1}^N (y_n - (b_0 + b_1 x_{1n} + b_2 x_{2n} + \dots + b_i x_{in} + \dots + b_I x_{In}))^2 \rightarrow \min \quad (6-22)$$

Mit dieser Regressionsgleichung wird das Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet. Wie bei der Varianzanalyse gibt es an, welcher Anteil der Streuung an der Gesamtstreuung erklärbar ist. Das Bestimmtheitsmaß berechnet sich folgenderweise:

$$R^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (\hat{y}_n - \bar{y})^2}{\sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2} \quad (6-23)$$

Neben dem Bestimmtheitsmaß wird vom Statistikprogramm auch das korrigierte Bestimmtheitsmaß R_{korr}^2 angegeben, welches sich mit der Zahl der Regressoren I , der Zahl der Beobachtungswerte N und der Zahl der Freiheitsgrade $N - I - 1$ berechnet:

$$R_{korr}^2 = R^2 - \frac{I(1 - R^2)}{N - I - 1} \quad (6-24)$$

Zusätzlich kann mit dem Standardfehler der Schätzung s die Güte der ermittelten Regressionsgerade überprüft werden. Dieser gibt den mittleren Fehler bei der Berechnung der Zielgrößen Y unter Verwendung der Regressionsfunktion an.

$$s = \sqrt{\frac{\sum e_n^2}{N - I - 1}} \quad (6-25)$$

Neben der Regression und dem Standardfehler werden die Regressionsparameter auf die Nullhypothese $H_0: b_i = 0$ getestet. Für diesen wird der empirische t-Wert t_{empi} berechnet und dessen Betrag mit dem theoretischen t-Wert aus der t-Verteilung verglichen. Ist der Betrag größer als der theoretische t-Wert, wird die Nullhypothese H_0 verworfen. Ist er gleich oder kleiner, wird H_0 nicht verworfen. Der empirische t-Wert t_{empi} berechnet sich aus dem Regressionskoeffizienten b_i und dessen Standardfehler s_{b_i} :

$$t_{empi} = \frac{b_i}{s_{b_i}} \quad (6-26)$$

6.2 Planung der Simulationsexperimente

„Die Planung der Simulationsexperimente hat im Wesentlichen die Aufgabe, die zu variierenden Parameterwerte zu definieren und als Reihenfolge so zu systematisieren, dass das Simulationsziel mit möglichst wenigen Simulationsläufen erreicht wird“ [VDI-3633b, S. 35]. Bei einfachen Systemen ist die Planung der Simulationsexperimente unkompliziert, da alle Kombinationen der Eingangsgrößen simuliert werden. Bei zunehmender Komplexität, Anzahl an Eingangsgrößen und Stufen dieser steigt der Aufwand. Für eine zielorientierte Planung der Simulationsexperimente werden Methoden der statistischen Experimentplanung verwendet, um die Anforderungen der Statistik an die Menge, Qualität und Aussagekraft der Daten auch dann...“ zu erfüllen, „...wenn nicht alle denkbaren Parameterkonstellationen geprüft werden können“ [VDI-3633c].

Im Einzelnen geht es nach [VDI-3633c] bei der statistischen Experimentplanung um die Festlegung

- der Anzahl der erforderlichen Simulationsläufe,
- der Stufenkombinationen (Einstellungen) der in den Experimenten zu untersuchenden Einflussgrößen (unabhängige Variablen),

- der Simulationsdauer,
- der Messzeitpunkte und Messintervalle.

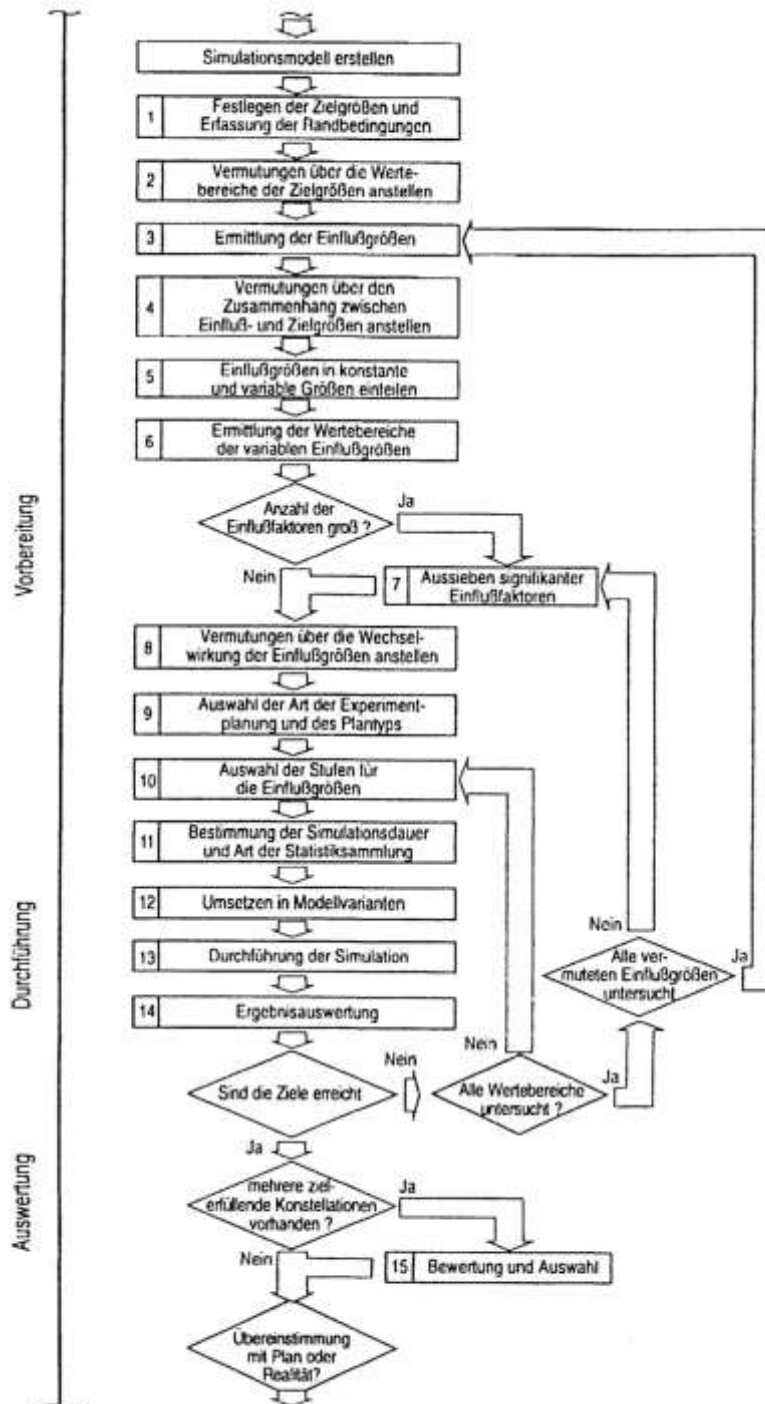


Abbildung 6-4: Ablauf der statistischen Experimentplanung [VDI-3633c]

Die Vorgehensweise bei einer statistischen Experimentplanung nach [VDI-3633c] ist in Abbildung 6-4 dargestellt. Die Experiment- bzw. Versuchsplanung wird in dieser Arbeit auf die folgenden Schritte reduziert bzw. zusammengefasst:

1. Festlegen der Zielgrößen und Erfassung der Randbedingungen
2. Vermutungen über die Wertebereiche der Zielgrößen anstellen
3. Ermittlung der möglichen Einflussgrößen und Abschätzung deren Auswirkungen auf die Zielgrößen
4. Ermittlung der Wertebereiche der variablen Einflussgrößen
5. Aussieben signifikanter Einflussfaktoren und Abschätzen der Wechselwirkung der Einflussgrößen
6. Auswahl der Art der Experimentplanung des Plantyps und der Stufen für die Einflussgrößen
7. Bestimmung der Simulationsdauer und Art der Statistiksammlung
8. Umsetzen in Modellvarianten und Durchführung der Simulation
9. Ergebnisauswertung

6.2.1 Festlegen der Zielgrößen und Erfassung der Randbedingungen

Ein Teil der Zielgrößen für die Experimentplanung wurden bereits bei der Entwicklung des Simulationsmodells definiert. Diese Zielgrößen sind:

- Lastgangkurve
- Die Lastgangkurve ist der mittlere Leistungsbedarf der simulierten RBG in 15-Minuten-Intervallen.
- Leistungsbedarf
- Der Leistungsbedarf ist die elektrische Leistungsaufnahme der simulierten RBG und wird vom Simulationsmodell als Verlauf mit einer Schrittweite von 0,1 Sekunden ausgegeben.
- Durchsatzleistung
- Die Durchsatzleistung wird für jedes RBG als Fortschritt in der Auftragsliste als Einlagerungen, als Auslagerungen und als Umlagerungen ausgegeben.

Im nächsten Schritt werden die möglichen Einflussgrößen auf diese Zielgrößen ermittelt und deren Effekt auf die Zielgrößen abgeschätzt.

6.2.2 Ermittlung der möglichen Einflussgrößen und Abschätzung deren Auswirkungen auf die Zielgrößen

In diesem Kapitel werden die möglichen Einflussgrößen für die Simulation ermittelt und deren Auswirkungen auf die Zielgrößen abgeschätzt. Die Einflussgrößen sind die Werte, die das Ergebnis der Zielgrößen beeinflussen. Die möglichen Einflussgrößen für das Simulationsmodell sind:

- Geräteart (APL/AKL)
- Anzahl der Gassen
- Gerätegewicht
- Hubgewicht
- Leistungsgrenze
- Lastganggrenze
- Dynamikparameter (Geschwindigkeit, Beschleunigung)
- Wegoptimierung (ohne oder mit ABC-Zonierung und Einlager- und Umlageroptimierung)
- Zuladung
- Achskopplung
- Achssteuerungsstrategie
- Regalabmessungen

Nachdem die möglichen Einflussgrößen ermittelt sind, werden die Auswirkungen auf die Zielgrößen abgeschätzt. Die Geräteart ist eine Einflussgröße, und da die verschiedenen Gerätearten AKL und APL unterschiedliche, eigenständige Systemlösungen sind, werden sie im Folgenden getrennt voneinander untersucht. Die Einteilung der Auswirkung wird in die Stufen „schwachen Einfluss“ (schwach), „mittleren Einfluss“ (mittel) und „starken Einfluss“ (stark) eingeteilt. Die Einflussgrößen und deren abgeschätzte Auswirkungen werden in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 6-3: Voraussichtliche Auswirkungen der Eingangsgrößen und Einteilung in konstante und variable Eingangsgrößen (abhängig von anderen Eingangsgrößen)*

	Lastgang	Leistungs- spitze	Durchsatz	Konstant/ Variabel
Anzahl der Gassen	Stark	Stark	Stark	Variabel
Gerätegewicht	Mittel	Stark	Schwach	Konstant*
Hubgewicht	Mittel	Stark	Schwach	Konstant*
Leistungsgrenze	Schwach	Stark	Schwach	Variabel

	Lastgang	Leistungs- spitze	Durchsatz	Konstant/ Variabel
Lastganggrenze	Stark	Schwach	Stark	Variabel
Dynamikparameter	Mittel	Mittel	Stark	Variabel
Wegoptimierung	Mittel	Mittel	Stark	Variabel
Zuladung pro LE	Schwach	Schwach	Schwach	Variabel
Gewichtsverteilung	Schwach	Schwach	Schwach	Konstant
Achskopplung	Mittel	Mittel	Schwach	Variabel
Achssteuerungsstrategie	Schwach	Mittel	Schwach	Variabel
Regalabmessungen	Stark	Schwach	Stark	Variabel
Weitere RBG-Parameter	Mittel	Mittel-Stark	schwach	Konstant*

In der letzten Spalte der Tabelle 6-3 ist die Einteilung der Eingangsgrößen in variable oder konstante Eingangsgrößen dokumentiert. Bei den variablen Eingangsgrößen soll der Effekt auf die Zielgrößen untersucht werden. Bei den konstanten Eingangsgrößen wird der Effekt des Eingangsparameters auf die Ausgangsparameter untersucht und anschließend eine Stufe für die Parametervariation ausgewählt. Die Eingangsgrößen „Gerätgewicht“, „Hubgewicht“ und „weitere RBG-Parameter“ sind abhängig von Systemeigenschaften. Das Gerätgewicht und teilweise das Hubwagengewicht ist abhängig vom Gerätetyp, von den Dynamikparametern, der Zuladung und der Regalhöhe. Die weiteren RBG-Parameter sind abhängig vom Gerätetyp, von den Dynamikparametern, der Zuladung und der Regalhöhe. Zusätzlich sind sie abhängig von den Konstruktionsprinzipien und den verwendeten Materialien und Komponenten.

6.2.3 Ermittlung der Wertebereiche der variablen Eingangsgrößen

Nachdem die Eingangsgrößen definiert sind, wird der Wertebereich der variablen Einflussgrößen festgelegt. Die Zuladung von AKL ist geringer und die Dynamik höher als bei APL. Zusätzlich sind die Abmessungen der LE von APL viel größer, was zu höheren und längeren Regalen und damit zu längeren Fahrwegen führt.

Die Parameter werden in dieser Studie in festgelegten Grenzen variiert, um deren Auswirkung auf die Durchsatzleistung, die Leistungsspitze und den Lastgang zu bestimmen. Die Wertebereiche für die Eingangsgrößen der AKL sind in Tabelle 6-4 und die der APL in Tabelle 6-5 abgebildet:

Tabelle 6-4: Wertebereiche der variablen Eingangsgrößen vom AKL

Anzahl der Gassen	2	3	5	10		
Relative Leistungsgrenze	100 %	80 %	60 %	40 %	35 %	30 %
Relative Lastganggrenze	100 %	80 %	60 %	40 %	35 %	30 %
Dynamikparameter AKL	1	2	3			
Fahrgeschwindigkeit [m/s]	6	5	4			
Fahrbeschleunigung [m/s ²]	3	3	3			
Hubgeschwindigkeit [m/s]	3	2,5	2			
Hubbeschleunigung [m/s ²]	3	3	3			
Wegoptimierung	Ohne		ABC-Zonierung, ELO/ULO			
Zuladung pro LE [kg]	0	25	50			
Achskopplung	Zwischenkreiskopplung		Energierückspeiseeinheit			
Achssteuerungsstrategie	Einfache Achssteuerung		Erweiterte Achssteuerung			
Regaldimension [HxL]	7x20		14x80			

Tabelle 6-5: Wertebereiche der variablen Eingangsgrößen vom APL

Anzahl der Gassen	2	3	5	10		
Relative Leistungsgrenze	100 %	80 %	60 %	40 %	35 %	30 %
Relative Lastganggrenze	100 %	80 %	60 %	40 %	35 %	30 %
Dynamikparameter APL	1	2	3			
Fahrgeschwindigkeit [m/s]	3	2,5	2			
Fahrbeschleunigung [m/s ²]	0,5	0,5	0,5			
Hubgeschwindigkeit [m/s]	1	0,75	0,5			
Hubbeschleunigung [m/s ²]	1	1	1			
Wegoptimierung	Ohne		ABC-Zonierung, ELO/ULO			
Zuladung pro LE [kg]	0	200	500	1000		
Achskopplung	Zwischenkreiskopplung		Energierückspeiseeinheit			
Achssteuerungsstrategie	Einfache Achssteuerung		Erweiterte Achssteuerung			
Regaldimension [HxL]	15x40		35x100			

Auf Grund der großen Anzahl der variablen Eingangsparameter und deren Stufen ist die Anzahl der Simulationen für die vollständig faktorielle Versuchsplanung zu umfangreich. Um den Simulationsaufwand zu reduzieren, werden im nächsten Schritt mittels Aussieben von Faktoren die signifikanten Faktoren für die Simulation ermittelt.

6.2.4 Aussieben signifikanter Einflussfaktoren mit Hilfe von Screening-Versuchsplänen

Zur Ermittlung der relevanten Einflussgrößen sind vollständig faktorielle Versuchspläne bei einer großen Anzahl an Einflussfaktoren sehr aufwändig. Bei den dargestellten Faktoren und Faktorstufen werden bei einer vollständig faktoriellen Versuchsplangung bei den AKL 20736 und bei den APL 27648 Faktorstufenkombinationen simuliert. Um die Faktorstufenkombinationen zu reduzieren, werden Screening-Versuchspläne (screening = aussieben) verwendet. Mit diesen können die relevanten Einflussgrößen und deren Auswirkung auf die Zielgrößen mit reduziertem Aufwand ermittelt werden.

Ein Screening-Versuchsplan ist ein abgewandelter, vollständig faktorieller Versuchsplan. Bei einem vollständig faktoriellen Versuchsplan werden neben den Effekten der Faktoren die Wechselwirkungen untersucht. Mit einer zunehmenden Anzahl an Faktoren müssen viele „höhere“ Wechselwirkungen (Drei- und Mehr-Faktor-Wechselwirkungen) untersucht werden. Da diese größtenteils vernachlässigbar sind, werden bei Screening-Versuchsplänen anstelle dieser vernachlässigbaren Wechselwirkungen weitere Faktoren untersucht. Dadurch bleibt die Anzahl der Faktorstufenkombinationen gleich und die Anzahl der Faktoren wird erhöht.

Auf Grund der Zuordnung der neuen Faktoren entstehen Versuchspläne mit sogenannten vermengten Effekten. Diese sind daran zu erkennen, dass mehrere Spalten in den Versuchsplantabellen identisch sind. Bei vermengten Effekten kann nicht eindeutig festgestellt werden, durch welchen Faktor oder welche Faktor-Wechselwirkung der Effekt zustande kam. Deswegen ist bei der Erstellung des Versuchsplans wichtig, dass der Effekt des einzelnen Faktors mit einem „höheren“ Wechselwirkungseffekt vermengt wird. Die Vermengung mit einer Zwei-Faktor-Wechselwirkung sollte vermieden werden, da diese relevant sein kann und damit der Effekt nicht eindeutig dem Faktor bzw. der Faktor-Wechselwirkung zugeordnet werden kann.

Für den Screening-Versuchsplan sind die Faktoren und die Faktorstufen aus der Tabelle 6-6 festgelegt. Diese neun Faktoren werden in jeweils zwei Faktorstufen untersucht. Die Leistungsgrenze und die Lastganggrenze werden berechnet. Die Leistungsspitze ist abhängig von der maximalen Leistung des RBG mit dieser Parametereinstellung. Zur Bestimmung der Leistungsspitze wird aus den Leistungsvoraussagen für die Auftragslisten die Fahrt mit der maximalen Leistung ausgewählt. Aus dieser berechnet sich die Grenze für die Leistungsspitze. Zu diesem werden die Grundleistungsbedarfe aller anderen Komponenten summiert. Dies ist die minimale Grenze, da bei einem niedrigeren Grenzwert für die Leistungsspitze nicht jeder Teilauftrag ausgeführt werden könnte. Der Grenzwert für die Leistungsspitze (GWLSP) berechnet sich aus der

maximalen Leistung der Leistungsvoraussagen für die Fahrten $P_{maxFahrts}$, der relativen Leistungsgrenze LSP , der Anzahl der RBG n_{RBG} und den Grundverlusten der restlichen Komponenten P_{VGi} :

$$GWLSP = P_{maxFahrts} + (n_{RBG} - 1) * LSP * P_{maxFahrts} + \sum P_{VGi} \quad (6-27)$$

Für die Berechnung des Grenzwerts für die Lastganggrenze $GWLG$ werden für die Simulation mit deaktiviertem LM die Leistungsmittelwerte berechnet. Für die Berechnung werden Referenzszenarien definiert und der durchschnittliche Energiebedarf des Lagersystems bei der generierten Auftragslast simuliert. Mit dem maximalen Leistungsmittelwert des zugehörigen Referenzszenarios wird die Lastganggrenze berechnet. Diese Grenze wird unabhängig von der Auftragszusammensetzung der jeweiligen Simulation verwendet. Der Grenzwert für die Lastganggrenze $GWLG$ berechnet sich aus dem maximalen Leistungsmittelwert der Anlage bei deaktiviertem LM P_{MWmax} und der relativen Lastganggrenze LGG folgenderweise:

$$GWLG = P_{MWmax} * LGG \quad (6-28)$$

Die Faktoren Anzahl der Gassen, Wegoptimierung, Auftragszusammensetzung, Zuladung und Regaldimension werden bei der Auftragslistenerstellung berücksichtigt. Für jede einzigartige Kombination dieser Faktorstufen werden eigene Auftragslisten erzeugt. Die Anzahl der Gassen ist in unterschiedlichen Modellen hinterlegt. Die Dynamikparameter, die Achskopplung und die Achssteuerungsstrategie sind Eingangsparameter für das Simulationsmodell.

Tabelle 6-6: Faktoren und Faktorstufen für den Screening-Versuchsplan der AKL

Faktorstufe/Faktor	-1	1
Anzahl der Gassen	2	10
Relative Leistungsgrenze (LSP)	20 %	2000 %
Relative Lastganggrenze (LGG)	20 %	2000 %
Dynamikparameter AKL	1	2
Fahrgeschwindigkeit [m/s]	6	4
Fahrbeschleunigung [m/s ²]	3	3
Hubgeschwindigkeit [m/s]	3	2
Hubbeschleunigung [m/s ²]	3	3
Wegoptimierung	Ohne	ABC-Zonierung, ELO/ULO
Zuladung pro LE [kg]	0	100
Achskopplung	Zwischenkreiskopplung	Energierückspeiseeinheit
Achssteuerungsstrategie	Einfache Achssteuerung	Erweiterte Achssteuerung

Regaldimension [HxL]

7x20

14x80

Der Screening-Versuchsplan für das AKL und die oben beschriebenen Faktoren und Faktorstufen sind in Tabelle 6-7 abgebildet. Die Fahrbewegungen und LAM-Zyklen der RBG werden über alle Simulationen mehrfach mit den gleichen Parametern ausgeführt. Zur Verkürzung der Simulationszeit werden die Leistungsvoraussagen für die Teilaufträge vor den Simulationsläufen berechnet. Die Leistungsvoraussage von mehrfach durchgeführten Teilaufträgen wird damit einmalig berechnet. Diese werden in einer Tabelle hinterlegt und während des Simulationslaufs bei der Bearbeitung der Freigabe aus diesen abgerufen. Die Leistungsvoraussagen von Fahrbewegungen sind von den Dynamikparametern, der Zuladung, der Achskopplung, der Achssteuerungsstrategie, dem RBG-Gewicht und der Strecke abhängig. Die einzigartigen Kombinationen dieser Parameter werden im Vorfeld der Simulation ermittelt und die Leistungsvoraussagen berechnet. In Tabelle 6-7 ist der Screening-Versuchsplan für die AKL dargestellt:

Tabelle 6-7: Screening Versuchsplan für AKL

Stdfolge	Anzahl Gas-sen	LSP	LGG	DynParam	Weg-optimi-erung	Zuladung	Achskopplung	AchsSt	Regal
1	2	20 %	20 %	1	Ohne	0	ERS	Erweitert	14x80
2	10	20 %	20 %	1	Ohne	0	ZK	Einfach	14x80
3	2	2000 %	20 %	1	Ohne	0	ZK	Erweitert	14x80
4	10	2000 %	20 %	1	Ohne	0	ERS	Einfach	14x80
5	2	20 %	2000 %	1	Ohne	0	ZK	Einfach	7x20
6	10	20 %	2000 %	1	Ohne	0	ERS	Erweitert	7x20
7	2	2000 %	2000 %	1	Ohne	0	ERS	Einfach	7x20
8	10	2000 %	2000 %	1	Ohne	0	ZK	Erweitert	7x20
9	2	20 %	20 %	2	Ohne	0	ZK	Erweitert	7x20
10	10	20 %	20 %	2	Ohne	0	ERS	Einfach	7x20
11	2	2000 %	20 %	2	Ohne	0	ERS	Erweitert	7x20
12	10	2000 %	20 %	2	Ohne	0	ZK	Einfach	7x20
13	2	20 %	2000 %	2	Ohne	0	ERS	Einfach	14x80
14	10	20 %	2000 %	2	Ohne	0	ZK	Erweitert	14x80
15	2	2000 %	2000 %	2	Ohne	0	ZK	Einfach	14x80
16	10	2000 %	2000 %	2	Ohne	0	ERS	Erweitert	14x80
17	2	20 %	20 %	1	ABCELOULO	0	ERS	Einfach	7x20
18	10	20 %	20 %	1	ABCELOULO	0	ZK	Erweitert	7x20
19	2	2000 %	20 %	1	ABCELOULO	0	ZK	Einfach	7x20
20	10	2000 %	20 %	1	ABCELOULO	0	ERS	Erweitert	7x20
21	2	20 %	2000 %	1	ABCELOULO	0	ZK	Erweitert	14x80
22	10	20 %	2000 %	1	ABCELOULO	0	ERS	Einfach	14x80
23	2	2000 %	2000 %	1	ABCELOULO	0	ERS	Erweitert	14x80
24	10	2000 %	2000 %	1	ABCELOULO	0	ZK	Einfach	14x80
25	2	20 %	20 %	2	ABCELOULO	0	ZK	Einfach	14x80
26	10	20 %	20 %	2	ABCELOULO	0	ERS	Erweitert	14x80
27	2	2000 %	20 %	2	ABCELOULO	0	ERS	Einfach	14x80
28	10	2000 %	20 %	2	ABCELOULO	0	ZK	Erweitert	14x80
29	2	20 %	2000 %	2	ABCELOULO	0	ERS	Erweitert	7x20
30	10	20 %	2000 %	2	ABCELOULO	0	ZK	Einfach	7x20
31	2	2000 %	2000 %	2	ABCELOULO	0	ZK	Erweitert	7x20
32	10	2000 %	2000 %	2	ABCELOULO	0	ERS	Einfach	7x20
33	2	20 %	20 %	1	Ohne	100	ERS	Einfach	7x20
34	10	20 %	20 %	1	Ohne	100	ZK	Erweitert	7x20

35	2	2000 %	20 %	1	Ohne	100	ZK	Einfach	7x20
36	10	2000 %	20 %	1	Ohne	100	ERS	Erweitert	7x20
37	2	20 %	2000 %	1	Ohne	100	ZK	Erweitert	14x80
38	10	20 %	2000 %	1	Ohne	100	ERS	Einfach	14x80
39	2	2000 %	2000 %	1	Ohne	100	ERS	Erweitert	14x80
40	10	2000 %	2000 %	1	Ohne	100	ZK	Einfach	14x80
41	2	20 %	20 %	2	Ohne	100	ZK	Einfach	14x80
42	10	20 %	20 %	2	Ohne	100	ERS	Erweitert	14x80
43	2	2000 %	20 %	2	Ohne	100	ERS	Einfach	14x80
44	10	2000 %	20 %	2	Ohne	100	ZK	Erweitert	14x80
45	2	20 %	2000 %	2	Ohne	100	ERS	Erweitert	7x20
46	10	20 %	2000 %	2	Ohne	100	ZK	Einfach	7x20
47	2	2000 %	2000 %	2	Ohne	100	ZK	Erweitert	7x20
48	10	2000 %	2000 %	2	Ohne	100	ERS	Einfach	7x20
49	2	20 %	20 %	1	ABCELOULO	100	ERS	Erweitert	14x80
50	10	20 %	20 %	1	ABCELOULO	100	ZK	Einfach	14x80
51	2	2000 %	20 %	1	ABCELOULO	100	ZK	Erweitert	14x80
52	10	2000 %	20 %	1	ABCELOULO	100	ERS	Einfach	14x80
53	2	20 %	2000 %	1	ABCELOULO	100	ZK	Einfach	7x20
54	10	20 %	2000 %	1	ABCELOULO	100	ERS	Erweitert	7x20
55	2	2000 %	2000 %	1	ABCELOULO	100	ERS	Einfach	7x20
56	10	2000 %	2000 %	1	ABCELOULO	100	ZK	Erweitert	7x20
57	2	20 %	20 %	2	ABCELOULO	100	ZK	Erweitert	7x20
58	10	20 %	20 %	2	ABCELOULO	100	ERS	Einfach	7x20
59	2	2000 %	20 %	2	ABCELOULO	100	ERS	Erweitert	7x20
60	10	2000 %	20 %	2	ABCELOULO	100	ZK	Einfach	7x20
61	2	20 %	2000 %	2	ABCELOULO	100	ERS	Einfach	14x80
62	10	20 %	2000 %	2	ABCELOULO	100	ZK	Erweitert	14x80
63	2	2000 %	2000 %	2	ABCELOULO	100	ZK	Einfach	14x80
64	10	2000 %	2000 %	2	ABCELOULO	100	ERS	Erweitert	14x80

Das Ergebnis der Simulationsläufe ist die prozentuale Reduzierung der Durchsatzleistung pro Gasse in der Stunde. Um die Reduzierung zu berechnen, werden alle zusätzlich ohne Energiebroker durchgeführt. Die prozentuale Reduzierung der Durchsatzleistung ΔDSL wird anschließend aus der simulierten Durchsatzleistung mit aktiviertem Lastmanagement DSL_{mLM} und deaktiviertem Lastmanagement DSL_{oLM} berechnet:

$$\Delta DSL = 1 - \frac{DSL_{mLM}}{DSL_{oLM}} [\%] \quad (6-29)$$

Die Ergebnisse der Varianzanalyse des Screening-Versuchsplans AKL sind in der Tabelle 6-8 dargestellt.

Tabelle 6-8: Ergebnisse des Screening-Versuchsplans AKL ($R^2=99,8\%$, $R^2_{adj} = 99,7\%$)

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert	Signifikanz
Modell	24	8,16772	0,34032	970,36	0,000	***
Linear	9	8,14246	0,90472	2579,62	0,000	***
Anzahl Gassen	1	0,05899	0,05899	168,20	0,000	***
LSP	1	0,00499	0,00499	14,24	0,001	**
LGG	1	8,04867	8,04867	22949,13	0,000	***
DynParam	1	0,00003	0,00003	0,08	0,778	-
Wegoptimierung	1	0,01151	0,01151	32,81	0,000	***

Zuladung	1	0,00019	0,00019	0,55	0,462	-
Achskopplung	1	0,00398	0,00398	11,35	0,002	**
AchsSt	1	0,00023	0,00023	0,64	0,427	-
Regal	1	0,01387	0,01387	39,54	0,000	***
2-Faktor-Wechselwirkungen	15	0,02526	0,00168	4,80	0,000	***
Anzahl Gassen*LSP	1	0,00470	0,00470	13,41	0,001	**
Anzahl Gassen*LGG	1	0,00005	0,00005	0,13	0,717	-
LSP*LGG	1	0,00257	0,00257	7,31	0,010	*
LSP*DynParam	1	0,00006	0,00006	0,17	0,685	-
LSP*Wegoptimierung	1	0,00059	0,00059	1,69	0,201	-
LSP*Zuladung	1	0,00002	0,00002	0,06	0,813	-
LSP*Achskopplung	1	0,00178	0,00178	5,08	0,030	*
LSP*AchsSt	1	0,00003	0,00003	0,09	0,763	-
LSP*Regal	1	0,00012	0,00012	0,34	0,564	-
LGG*DynParam	1	0,00013	0,00013	0,36	0,553	-
LGG*Wegoptimierung	1	0,01043	0,01043	29,74	0,000	***
LGG*Zuladung	1	0,00000	0,00000	0,00	0,985	-
LGG*Achskopplung	1	0,00335	0,00335	9,57	0,004	**
LGG*AchsSt	1	0,00000	0,00000	0,01	0,925	-
LGG*Regal	1	0,00143	0,00143	4,06	0,051	-
Fehler	39	0,01368	0,00035			
Gesamt	63	8,18140				

In Tabelle 6-8 der Varianzanalyse sind die Ergebnisse der Faktoreffekte und die Effekte der 2-Faktor-Wechselwirkungen der relativen Leistungsgrenze (LSP) und der relativen Lastganggrenze (LGG) dargestellt. Die Signifikanz der Effekte ist in der Spalte „Signifikanz“ dokumentiert. Wie zu sehen ist, sind von den neun Effekten der Faktoren sechs und von den 13 untersuchten Zwei-Faktor-Wechselwirkungen drei signifikant. Da in der Tabelle nicht alle Wechselwirkungen der Faktoren aufgeführt sind, wird überprüft, ob nicht berücksichtigte Faktoren oder Wechselwirkungen einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis haben. Um dies zu bewerten, wird das Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet.

In Abbildung 6-5 ist das Pareto-Diagramm der Faktoren und Wechselwirkungen aus Tabelle 6-8 abgebildet. Dieses zeigt deren standardisierte Effekte in Form von horizontalen Balken. Die Länge der Balken deutet die jeweilige Stärke des Effekts an. Da ein Fehlerterm in der Varianzanalyse vorhanden ist, sind die standardisierten Effekte dargestellt. Der standardisierte Effekt ist der t-Wert aus der Tabelle 6-9. Im Pareto-Diagramm ist eine senkrechte gestrichelte rote Linie mit dem Wert „2,0“ dargestellt. Diese markiert das Signifikanzniveau von 95 %. Alle über diese Linie herausragenden Faktoren und Wechselwirkungen widerlegen die Nullhypothese H_0 , dass der jeweilige Faktor bzw. die Wechselwirkung keinen Einfluss auf das Versuchsergebnis haben.

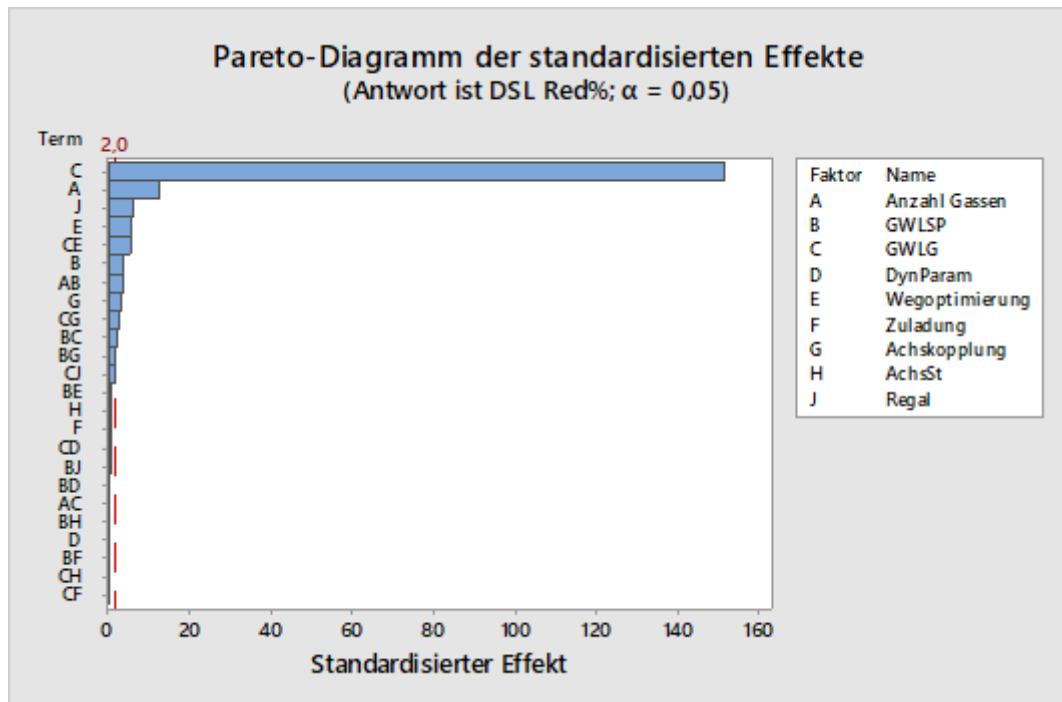


Abbildung 6-5: Pareto-Diagramm der Effekte des Screening-Versuchsplans AKL

Tabelle 6-9: Koeffizienten und Effekte der Faktoren des Screening-Versuchsplans AKL

Term	Effekt	Koef	SE Koef	t-Wert	p-Wert
Konstante		0,42549	0,00234	181,76	0,000
Anzahl Gassen	0,06072	0,03036	0,00234	12,97	0,000
LSP	-0,01767	-0,00883	0,00234	-3,77	0,001
LGG	-0,70925	-0,35463	0,00234	-151,49	0,000
DynParam	-0,00133	-0,00067	0,00234	-0,28	0,778
Wegoptimierung	-0,02682	-0,01341	0,00234	-5,73	0,000
Zuladung	0,00348	0,00174	0,00234	0,74	0,462
Achskopplung	-0,01577	-0,00789	0,00234	-3,37	0,002
AchsSt	-0,00376	-0,00188	0,00234	-0,8	0,427
Regal	-0,02944	-0,01472	0,00234	-6,29	0,000
Anzahl Gassen*LSP	-0,01715	-0,00857	0,00234	-3,66	0,001
Anzahl Gassen*LGG	-0,00171	-0,00085	0,00234	-0,36	0,717
LSP*LGG	-0,01266	-0,00633	0,00234	-2,7	0,010
LSP*DynParam	-0,00191	-0,00096	0,00234	-0,41	0,685
LSP*Wegoptimierung	0,00609	0,00304	0,00234	1,3	0,201
LSP*Zuladung	-0,00112	-0,00056	0,00234	-0,24	0,813
LSP*Achskopplung	-0,01056	-0,00528	0,00234	-2,25	0,030
LSP*AchsSt	0,00142	0,00071	0,00234	0,3	0,763
LSP*Regal	-0,00272	-0,00136	0,00234	-0,58	0,564
LGG*DynParam	-0,0028	-0,0014	0,00234	-0,6	0,553
LGG*Wegoptimierung	0,02553	0,01277	0,00234	5,45	0,000
LGG*Zuladung	0,00009	0,00004	0,00234	0,02	0,985
LGG*Achskopplung	0,01448	0,00724	0,00234	3,09	0,004

LGG*AchsSt	0,00044	0,00022	0,00234	0,09	0,925
LGG*Regal	0,00944	0,00472	0,00234	2,02	0,051

Das Ziel des Screening-Versuchsplans ist es, die Faktoren mit den größten signifikanten Effekten aus allen Faktoren heraus zu sieben. Um die Qualität und die Erklärungskraft des Modells mit den verbleibenden Faktoren nachzuweisen, werden das Bestimmtheitsmaß und das adjustierte Bestimmtheitsmaß nach der jeweiligen Faktorelimination berechnet. Bei der Elimination wird bei den höheren Mehrfach-Wechselwirkungen begonnen. Ein nicht signifikanter Parameter, der in einer signifikanten Wechselwirkung auftaucht, darf nicht eliminiert werden. Dies wird nach *Siebertz et al.* [Sie-2010] „Bewahren der hierarchischen Integrität“ des Modells bezeichnet.

Die Effekte und die Signifikanz der Faktoren und Wechselwirkungen sind in Tabelle 6-8, Tabelle 6-9 und Abbildung 6-5 dargestellt. Beim Aussieben werden Faktoren betrachtet, die mit den Grenzen des LM eine signifikante Wechselwirkung aufweisen. Die anderen 2-Faktor-Wechselwirkungen werden vernachlässigt, da sie keinen Einfluss auf den Einsatz des LM aufweisen. Die signifikanten 2-Faktor-Wechselwirkungen sind:

- Anzahl Gassen und relative Leistungsgrenze (Anzahl Gassen*LSP)
- Relative Leistungsgrenze und relative Lastganggrenze (LSP*LGG)
- Relative Leistungsgrenze und Achskopplung (LSP*Achskopplung)
- Relative Lastganggrenze und Wegoptimierung (LGG*Wegoptimierung)
- Relative Lastganggrenze und Achskopplung (LGG*Achskopplung)

Die nicht signifikanten Wechselwirkungen sind zwischen:

- der relativen Leistungsgrenze und den Dynamikparametern (LSP*DynParam)
- der relativen Leistungsgrenze und der Zuladung (LSP*Zuladung)
- der relativen Leistungsgrenze und der Achssteuerung (LSP*AchsSt)
- der relativen Leistungsgrenze und der Regalabmessung (LSP*Regal)
- der relativen Lastganggrenze und den Dynamikparametern (LGG*DynParam)
- der relativen Lastganggrenze und der Zuladung (LGG*Zuladung)
- der relativen Lastganggrenze und der Achssteuerung (LGG*AchsSt)
- der relativen Lastganggrenze und der Regalabmessung (LGG*Regal)

Diese Wechselwirkungen werden deshalb aus der Untersuchung entfernt und das Bestimmtheitsmaß und das adjustierte Bestimmtheitsmaß für die Varianzanalyse mit den

reduzierten Wechselwirkungen erneut berechnet. Die Ergebnisse der Varianzanalyse sind in der Tabelle 6-10 abgebildet.

Tabelle 6-10: Ergebnis Screening-Versuchsplan mit reduzierten 2-Faktor-Wechselwirkungen ($R^2 = 99,8\%$; $R_{adj}^2 = 99,7\%$)

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert	Signifi- kanz
Modell	14	8,1653	0,58324	1774,94	0,000	***
Linear	9	8,14246	0,90472	2753,30	0,000	***
Anzahl Gassen	1	0,05899	0,05899	179,53	0,000	***
LSP	1	0,00499	0,00499	15,20	0,000	***
LGG	1	8,04867	8,04867	24494,28	0,000	***
DynParam	1	0,00003	0,00003	0,09	0,770	-
Wegoptimierung	1	0,01151	0,01151	35,02	0,000	***
Zuladung	1	0,00019	0,00019	0,59	0,447	-
Achskopplung	1	0,00398	0,00398	12,11	0,001	**
AchsSt	1	0,00023	0,00023	0,69	0,411	-
Regal	1	0,01387	0,01387	42,20	0,000	***
2-Faktor-Wechselwirkungen	5	0,02284	0,00457	13,90	0,000	***
Anzahl Gassen*LSP	1	0,0047	0,0047	14,31	0,000	***
LSP*LGG	1	0,00257	0,00257	7,81	0,007	**
LSP*Achskopplung	1	0,00178	0,00178	5,43	0,024	*
LGG*Wegoptimierung	1	0,01043	0,01043	31,74	0,000	***
LGG*Achskopplung	1	0,00335	0,00335	10,21	0,002	**
Fehler	49	0,01610	0,00033			
Gesamt	63	8,18140				

Neben der Signifikanz werden die Effekte auf ihre Größe untersucht. Faktoren bzw. 2-Faktor-Wechselwirkungen (2FWW), die einen vernachlässigbaren Einfluss auf das LM haben, werden in der Hauptuntersuchung nicht berücksichtigt, da sie den Simulationsumfang unnötig erhöhen. Die Effekte der 2FWW sind in der Tabelle 6-9 dokumentiert und die Wechselwirkungsdiagramme der signifikanten 2FWW in Abbildung 6-6 dargestellt. Alle der signifikanten 2FWW haben einen Effekt auf die Durchsatzleistung unter 5 %.

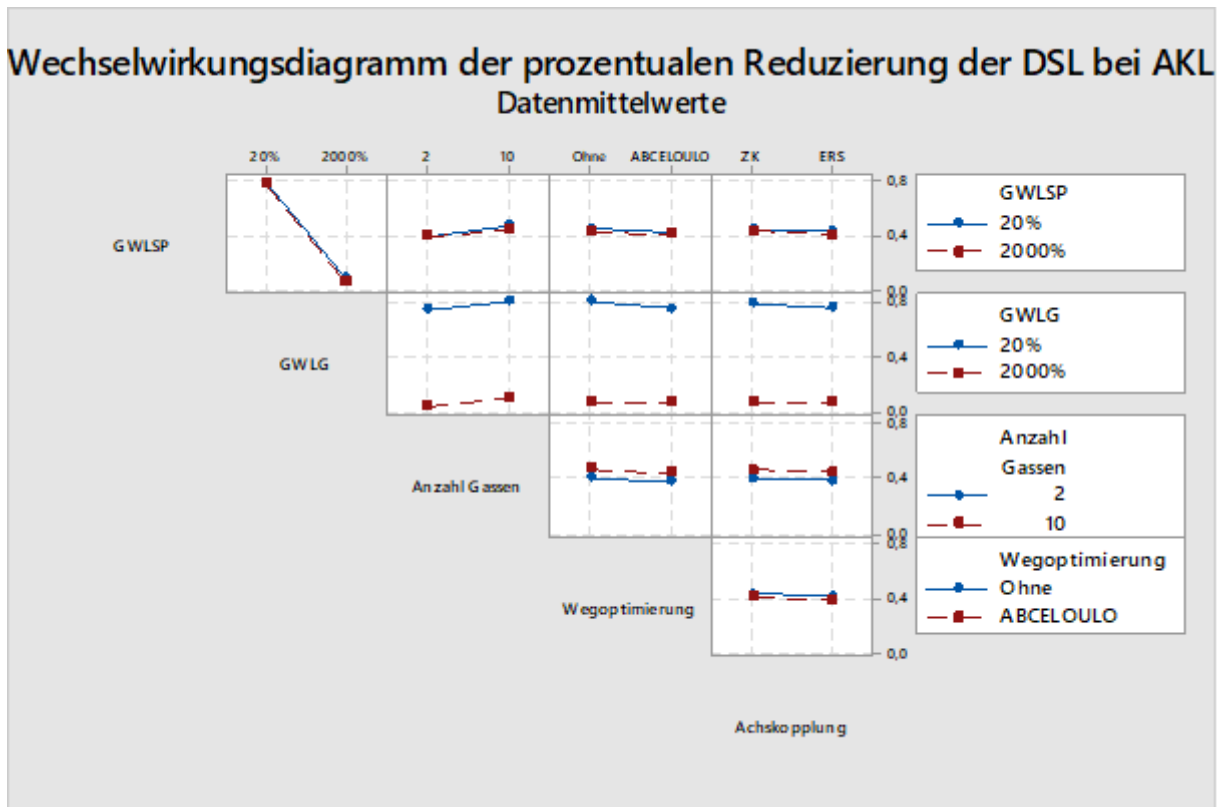


Abbildung 6-6: Wechselwirkungsdiagramm der prozentualen Reduzierung der Durchsatzleistung bei AKL

Zwischen der Anzahl der Gassen und der relativen Leistungsgrenze besteht eine signifikante 2FWW. Diese sagt aus, dass durch die relative Leistungsgrenze die Durchsatzleistung bei 10 Gassen um ca. 3,5 % stärker reduziert wird als bei 2 Gassen. Das ist nachvollziehbar, da die Wahrscheinlichkeit, dass sich mehrere Leistungsspitzen überlagern, bei 10 Gassen höher ist als bei 2 Gassen und somit das LM mehr Teilaufträge verzögern muss. Diese 2FWW wird in der Hauptuntersuchung weiter untersucht.

Eine weitere signifikante 2FWW ist zwischen der relativen Leistungsgrenze und der relativen Lastganggrenze. Aufgrund der Lastganggrenze bei 20 % werden die RBG beim Erreichen der Grenze angehalten. Die Verzögerungen durch die Leistungsgrenze sind kurzzeitig und wirken sich auf den Ausführungszeitpunkt und nicht auf den Energiebedarf für den Teilauftrag aus. Die Verschiebung des Teilauftrags wird in der Pause der RBG kompensiert. Beide Faktoren und die 2FWW werden weiter in der Hauptuntersuchung untersucht, da sie die Einstellparameter des LM sind.

Die Achskopplung steht in Wechselwirkung mit der relativen Leistungsgrenze und der relativen Lastganggrenze. Die Wechselwirkung mit der Leistungsgrenze bedeutet, dass die Reduzierung der Durchsatzleistung bei einer relativen Leistungsgrenze von 2000 % bei ERS um ca. 2,1 % geringer ist als bei einer Grenze von 20 %. Zusätzlich

ist die Reduzierung der Durchsatzleistung bei ERS bei beiden Grenzen für die Leistungsspitze niedriger als die bei ZK. Dieser Effekt ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht erklärbar. Eine Erklärung könnte die 2FWW mit der relativen Lastganggrenze liefern. Die Reduzierung der Durchsatzleistung ist bei einer Lastganggrenze von 2000 % bei ZK und ERS nahezu identisch. Bei einer Lastganggrenze von 20 % fällt die Reduzierung der Durchsatzleistung bei ERS um ca. 2,9 % geringer aus als bei ZK. Der durchschnittliche Energiebedarf pro Fahrt ist geringer bei einer ERS, wodurch bei gleicher Lastganggrenze mehr Fahrten durchgeführt werden können.

Die letzte 2FWW ist die Wechselwirkung zwischen der relativen Lastganggrenze und der Wegoptimierung. Bei einer Lastganggrenze von 20 % ist Reduzierung der Durchsatzleistung ohne Wegoptimierung um ca. 2,6 % größer als bei Verwendung der Wegoptimierung. Auf Grund des geringen Effekts der Wegoptimierung und da die Wegoptimierung eine Strategie des LVS ist, wird die Wegoptimierung in der Hauptuntersuchung nicht weiter untersucht. Damit sind die 2FWW für die Hauptuntersuchung des AKL festgelegt:

- Anzahl Gassen und relative Leistungsgrenze (LSP)
- Relative Leistungsgrenze (LSP) und relative Lastganggrenze (LGG)
- Relative Leistungsgrenze (LSP) und Achskopplung
- Relative Lastganggrenze (LGG) und Achskopplung

Nach der Eliminierung der 2FWW wird mit den Faktoren fortgefahren. Neben der Signifikanz ist es wichtig, die Effekte auf ihre Plausibilität zu beurteilen. Die Effekte der Faktoren sind in Tabelle 6-10 dokumentiert bzw. als Faktordiagramme in Abbildung 6-7 dargestellt.

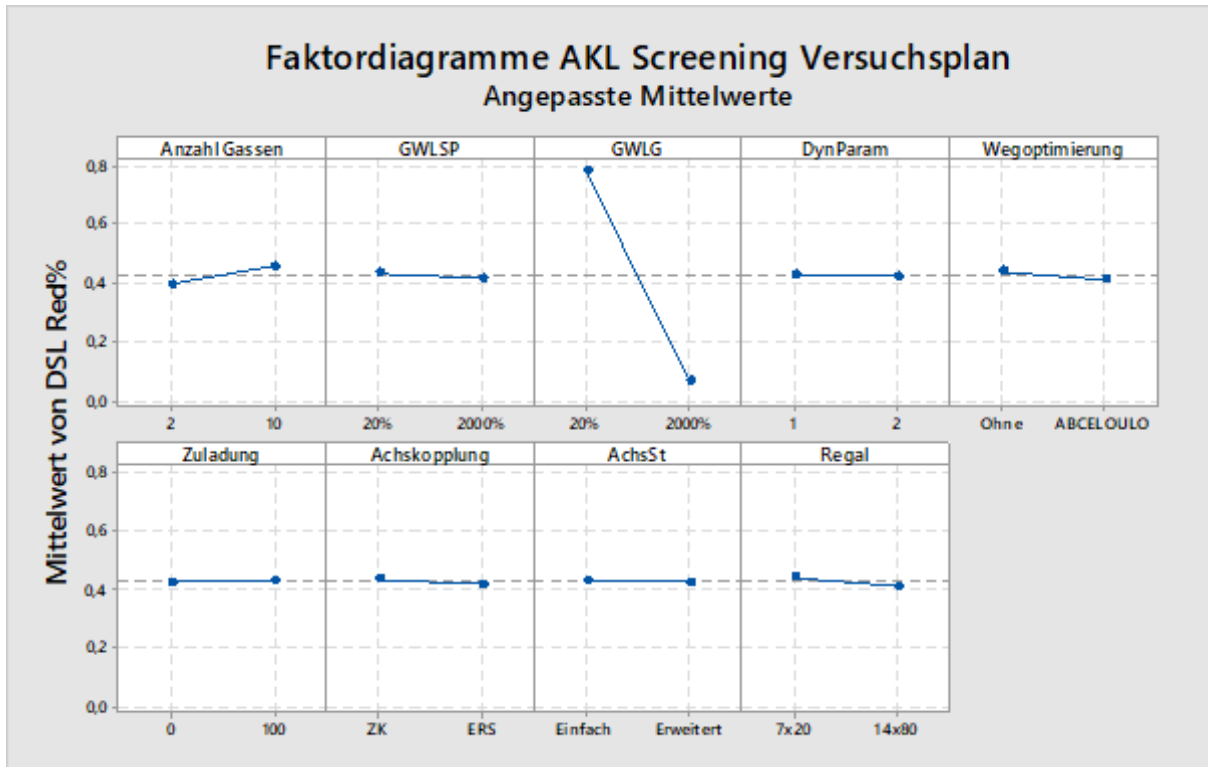


Abbildung 6-7: Faktordiagramme der Faktoren des AKL-Screening-Versuchsplans

Die signifikanten Faktoren sind:

- Anzahl Gassen
- Relative Leistungsgrenze (LSP)
- Relative Lastganggrenze (LGG)
- Wegoptimierung
- Achskopplung
- Regaldimension

Wie im Faktordiagramm zu sehen, erhöht die Anzahl der Gassen die Reduzierung der Durchsatzleistung um ca. 6,1 %. Diese Reduzierung erklärt sich durch die sequenzielle Freigabeanfragebearbeitung des LM. Während eine Anfrage bearbeitet wird, kann keine andere bearbeitet werden. Bei einer höheren Anzahl an Gassen erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass eine Anfrage die Anfrage anderer RBG blockiert. Dadurch steigt die Reduzierung der Durchsatzleistung bei einer steigenden Anzahl an Gassen. Die Anzahl der Gassen wird in der Hauptuntersuchung nachgeprüft.

Die Faktoren LSP und LGG sind die Einstellparameter des Lastmanagements. Deswegen werden beide Faktoren in der Hauptuntersuchung weiter geprüft. Der Effekt der LSP ist mit 1,8 % gering. Das bedeutet, dass die Leistungsspitze begrenzt mit einem 204

geringen Verlust an Durchsatzleistung stark reduziert werden kann. Wenn die LGG von 2000 % auf 20 % reduziert wird, sinkt die Durchsatzleistung um ca. 70,9 %.

Die Wegoptimierung wird auf Grund der Abhängigkeit von der LVS-Strategie nicht weiter untersucht.

Die Achskopplung erhöht bei einem Wechsel von der ZK zur ERS den Mittelwert der Durchsatzleistung um ca. 1,6 %. Da die Achskopplung in Wechselwirkung mit beiden Grenzen des Lastmanagements steht, wird diese in der Hauptuntersuchung als Faktor aufgenommen.

Die Regaldimensionen sind der letzte signifikante Faktor. Bei einem größeren Regal sinkt die Reduzierung der Durchsatzleistung um ca. 2,9 %. Bei einem Regal mit kleineren Abmessungen erhöht sich die Anzahl der Anfragen pro Zeiteinheit. Dadurch hat der feste Zeitbedarf für die Bearbeitung der Freigabe der Teilaufträge einen erhöhten Zeitanteil bei der Simulation, was die Durchsatzleistung reduziert. Gleichzeitig erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass die Freigabeanfragebearbeitung eines RBG die eines anderen verzögert. Die Regaldimensionen werden als Faktor in die Hauptuntersuchung aufgenommen.

Die nicht signifikanten Faktoren werden aus dem Versuchsplan entfernt, da sie weder einen signifikanten Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben noch in den signifikanten 2-Faktor-Wechselwirkungen auftauchen.

Tabelle 6-11: Ergebnis des AKL-Screening-Versuchsplan mit reduzierten Faktoren und 2-Faktor-Wechselwirkungen ($R^2 = 99,5\%$; $R^2_{adj} = 99,5\%$)

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert	Signifi- kanz
Modell	9	8,14291	0,90477	1269,55	0,000	***
Linear	5	8,13051	1,62610	2281,70	0,000	***
Anzahl Gassen	1	0,05899	0,05899	82,78	0,000	***
LSP	1	0,00499	0,00499	7,01	0,011	*
LGG	1	8,04867	8,04867	11293,68	0,000	***
Achskopplung	1	0,00398	0,00398	5,58	0,022	*
Regal	1	0,01387	0,01387	19,46	0,000	***
2-Faktor-Wechselwirkungen	4	0,01241	0,0031	4,35	0,004	**
Anzahl Gassen*LSP	1	0,0047	0,0047	6,60	0,013	*
LSP*LGG	1	0,00257	0,00257	3,60	0,063	-
LSP*Achskopplung	1	0,00178	0,00178	2,50	0,120	-
LGG*Achskopplung	1	0,00335	0,00335	4,71	0,034	*
Fehler	54	0,03848	0,00071			
Gesamt	63	8,18140				

Das Ergebnis des Screening Versuchsplans für das AKL ist, dass die folgenden Faktoren in der Hauptuntersuchung untersucht werden:

- Anzahl Gassen
- Relative Leistungsgrenze (LSP)
- Relative Lastganggrenze (LGG)
- Achskopplung
- Regaldimension

Nachdem die signifikanten Faktoren und 2-Faktor-Wechselwirkungen (Tabelle 6-11) für die Hauptuntersuchung der AKL ermittelt sind, werden im nächsten Schritt die signifikanten Faktoren für die APL ermittelt.

Der Screening-Versuchsplan der APL ist in der Tabelle D-2 dargestellt. In Tabelle 6-12 und Tabelle 6-13 sind die Ergebnisse des Screening-Versuchsplans der APL dokumentiert. Mit diesen Ergebnissen werden, wie bei den AKL, die Faktoren für die Simulation ausgewählt, um den Simulationsaufwand bei der folgenden Hauptuntersuchung zu reduzieren. Das Bestimmtheitsmaß ist durch das Aussieben der Faktoren und Wechselwirkungen von $R^2 = 99,8\%$ auf $R^2 = 99,5\%$ und das adjustierte Bestimmtheitsmaß von $R_{adj}^2 = 99,7\%$ auf $R_{adj}^2 = 99,5\%$ gesunken. Über 99 % der Streuung können durch die verbleibenden Faktoren erklärt werden.

Tabelle 6-12: Ergebnisse des Screening-Versuchsplans APL ($R^2=99,9\%$, $R_{adj}^2 = 99,84\%$)

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert	Signifikanz
Modell	24	8,79613	0,36651	1634,06	0,000	***
Linear	9	8,76363	0,97374	4341,39	0,000	***
Gassen	1	0,00705	0,00705	31,45	0,000	***
LSP	1	0,00010	0,00010	0,44	0,510	-
LGG	1	8,73069	8,73069	38925,65	0,000	***
DynParam	1	0,00055	0,00055	2,46	0,125	-
Zuladung	1	0,00559	0,00559	24,92	0,000	***
Wegopt	1	0,00701	0,00701	31,24	0,000	***
Achskoppl	1	0,00571	0,00571	25,44	0,000	***
AchstSt	1	0,00391	0,00391	17,45	0,000	***
Regal	1	0,00302	0,00302	13,44	0,001	**
2-Faktor-Wechselwirkungen	15	0,03251	0,00217	9,66	0,000	***
Gassen*LSP	1	0,00001	0,00001	0,03	0,870	-
Gassen*LGG	1	0,00662	0,00662	29,49	0,000	***
LSP*LGG	1	0,00000	0,00000	0,01	0,916	-
LSP*DynParam	1	0,00020	0,00020	0,88	0,354	-
LSP*Zuladung	1	0,00000	0,00000	0,00	0,966	-

LSP*Wegopt	1	0,00004	0,00004	0,20	0,659	-
LSP*Achskoppl	1	0,00030	0,00030	1,33	0,256	-
LSP*AchstSt	1	0,00011	0,00011	0,47	0,496	-
LSP*Regal	1	0,00002	0,00002	0,11	0,745	-
LGG*DynParam	1	0,00071	0,00071	3,18	0,082	-
LGG*Zuladung	1	0,00443	0,00443	19,74	0,000	***
LGG*Wegopt	1	0,00869	0,00869	38,76	0,000	***
LGG*Achskoppl	1	0,00649	0,00649	28,94	0,000	***
LGG*AchstSt	1	0,00342	0,00342	15,24	0,000	***
LGG*Regal	1	0,00147	0,00147	6,55	0,014	*
Fehler	39	0,00875	0,00022			
Gesamt	63	8,80488				

Tabelle 6-13: Koeffizienten und Effekte der Faktoren des Screening Versuchsplans APL

Term	Effekt	Koef	SE Koef	t-Wert	p-Wert
Konstante		0,38263	0,00187	204,39	0,000
Gassen	0,021	0,0105	0,00187	5,61	0,000
LSP	-0,00249	-0,00125	0,00187	-0,67	0,510
LGG	-0,73869	-0,36935	0,00187	-197,30	0,000
DynParam	0,00588	0,00294	0,00187	1,57	0,125
Zuladung	0,01869	0,00935	0,00187	4,99	0,000
Wegopt	-0,02093	-0,01046	0,00187	-5,59	0,000
Achskoppl	-0,01888	-0,00944	0,00187	-5,04	0,000
AchstSt	-0,01564	-0,00782	0,00187	-4,18	0,000
Regal	-0,01373	-0,00686	0,00187	-3,67	0,001
Gassen*LSP	-0,00062	-0,00031	0,00187	-0,16	0,870
Gassen*LGG	-0,02033	-0,01017	0,00187	-5,43	0,000
LSP*LGG	0,0004	0,0002	0,00187	0,11	0,916
LSP*DynParam	-0,00351	-0,00176	0,00187	-0,94	0,354
LSP*Zuladung	-0,00016	-0,00008	0,00187	-0,04	0,966
LSP*Wegopt	-0,00166	-0,00083	0,00187	-0,44	0,659
LSP*Achskoppl	-0,00432	-0,00216	0,00187	-1,15	0,256
LSP*AchstSt	0,00257	0,00129	0,00187	0,69	0,496
LSP*Regal	0,00123	0,00061	0,00187	0,33	0,745
LGG*DynParam	-0,00667	-0,00334	0,00187	-1,78	0,082
LGG*Zuladung	-0,01663	-0,00832	0,00187	-4,44	0,000
LGG*Wegopt	0,02331	0,01165	0,00187	6,23	0,000
LGG*Achskoppl	0,02014	0,01007	0,00187	5,38	0,000
LGG*AchstSt	0,01462	0,00731	0,00187	3,90	0
LGG*Regal	0,00958	0,00479	0,00187	2,56	0,014

Als Erstes werden die 2FWW in signifikante und nicht signifikante 2FWW eingeteilt. Die signifikanten 2FWW sind zwischen:

- der Anzahl der Gassen und der relativen Lastganggrenze (Gassen*LGG)
- der relativen Lastganggrenze und der Zuladung (LGG*Zuladung)
- der relativen Lastganggrenze und der Wegoptimierung (LGG*Wegopt)
- der relativen Lastganggrenze und der Achskopplung (LGG*Achskoppl)
- der relativen Lastganggrenze und der Achssteuerung (LGG*AchsSt)
- der relativen Lastganggrenze und dem Regal (LGG*Regal)

Die Wegoptimierung wird analog zu den AKL nicht weiter untersucht, da diese LVS-abhängig ist. Die restlichen 2FWW zwischen der relativen Leistungsgrenze bzw. der relativen Lastganggrenze und den anderen Faktoren sind nicht signifikant und werden aus der Untersuchung entfernt. Mit den verbleibenden Faktoren und Wechselwirkungen wird die Varianzanalyse erneut durchgeführt und das Bestimmtheitsmaß sowie das adjustierte Bestimmtheitsmaß berechnet. Die Wechselwirkung zwischen der relativen Lastganggrenze und dem Regal (LGG*Regal) ist nach der Eliminierung nicht mehr signifikant und wird eliminiert. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle abgebildet:

Tabelle 6-14: Ergebnis APL Screening Versuchsplan mit reduzierten 2-Faktor-Wechselwirkungen
($R^2 = 99,77\%$; $R_{adj}^2 = 99,71\%$)

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert	Signifi- kanz
Modell	13	8,78458	0,67574	1664,28	0,000	***
Linear	9	8,76363	0,97374	2398,22	0,000	***
Gassen	1	0,00705	0,00705	17,37	0,000	***
LSP	1	0,0001	0,0001	0,24	0,623	-
LGG	1	8,73069	8,73069	21502,86	0,000	***
DynParam	1	0,00055	0,00055	1,36	0,249	-
Zuladung	1	0,00559	0,00559	13,77	0,001	**
Wegopt	1	0,00701	0,00701	17,26	0,000	***
Achskoppl	1	0,00571	0,00571	14,05	0,000	***
AchstSt	1	0,00391	0,00391	9,64	0,003	**
Regal	1	0,00302	0,00302	7,43	0,009	**
2-Faktor-Wechselwirkungen	4	0,02095	0,00524	12,90	0,000	***
Gassen*LGG	1	0,00662	0,00662	16,29	0,000	***
LGG*Zuladung	1	0,00443	0,00443	10,90	0,002	**
LGG*Achskoppl	1	0,00649	0,00649	15,99	0,000	***
LGG*AchstSt	1	0,00342	0,00342	8,42	0,006	**
Fehler	50	0,02030	0,00041			
Gesamt	63	8,80488				

Neben der Signifikanz werden die Effekte auf ihre Größe untersucht. Faktoren bzw. 2-Faktor-Wechselwirkungen, die einen vernachlässigbaren Einfluss auf das LM haben, werden in der Hauptuntersuchung nicht berücksichtigt, da sie den Simulationsaufwand unnötig erhöhen. Die Effekte der 2FWW sind in der Tabelle 6-15 dokumentiert und die Wechselwirkungsdiagramme der signifikanten 2FWW in Abbildung 6-8 dargestellt. Die Effekte der 2FWW unterscheiden sich von den Ergebnissen der AKL. Die 2FWW der APL werden im Folgenden einzeln beurteilt:

Zwischen der Anzahl der Gassen und der relativen Lastganggrenze besteht die 2FWW mit dem stärksten Effekt. Wie in Abbildung 6-8 zu sehen, reduziert sich bei 10 Gassen die Durchsatzleistung ca. 4 % stärker als bei 2 Gassen. Eine Erklärung für diesen Effekt lässt sich nicht herleiten. Da der Effekt dieser Wechselwirkung groß ist, wird er in der Hauptuntersuchung geprüft.

Tabelle 6-15: Koeffizienten und Effekte der Faktoren des Screening-Versuchsplans APL

Term	Effekt	Koef	SE Koef	t-Wert	p-Wert
Konstante		0,38263	0,00252	151,91	0
Gassen	0,021	0,0105	0,00252	4,17	0
LSP	-0,00249	-0,00125	0,00252	-0,49	0,623
LGG	-0,73869	-0,36935	0,00252	-146,64	0
DynParam	0,00588	0,00294	0,00252	1,17	0,249
Zuladung	0,01869	0,00935	0,00252	3,71	0,001
Wegopt	-0,02093	-0,01046	0,00252	-4,15	0
Achskoppl	-0,01888	-0,00944	0,00252	-3,75	0
AchstSt	-0,01564	-0,00782	0,00252	-3,1	0,003
Regal	-0,01373	-0,00686	0,00252	-2,73	0,009
Gassen*LGG	-0,02033	-0,01017	0,00252	-4,04	0
LGG*Zuladung	-0,01663	-0,00832	0,00252	-3,3	0,002
LGG*Achskoppl	0,02014	0,01007	0,00252	4	0
LGG*AchstSt	0,01462	0,00731	0,00252	2,9	0,006

Die nächste 2FWW ist zwischen der relativen Lastganggrenze und der Zuladung. Bei einer höheren Zuladung erhöht sich die Reduzierung der Durchsatzleistung. Mit einer höheren Zuladung steigt der Anteil an potentieller Energie, die in das Lager eingebracht wird. Da diese ausschließlich bei einer ERS zurückgewonnen wird, erhöht sich der mittlere Energiebedarf pro Fahrt über alle Szenarien und somit können weniger Fahrten bei der gleichen Lastganggrenze ausgeführt werden.

Eine weitere signifikante 2FWW ist zwischen der relativen Lastganggrenze und der Achskopplung. Bei einer ERS erhöht sich die Durchsatzleistung bei gleicher Lastganggrenze. Mit einer ERS sinkt im Gegensatz zu einer ZK der mittlere Energiebedarf pro Fahrt und es können mehr Fahrten bei gleicher Lastganggrenze ausgeführt werden.

Dasselbe gilt für die letzte signifikante 2FWW zwischen der relativen Lastganggrenze und der Achssteuerung. Mit der Erweiterten Achssteuerung wird der mittlere Energiebedarf pro Fahrt reduziert. Damit können bei der gleichen Lastganggrenze mehr Fahrten durchgeführt werden und die Durchsatzleistung steigt.

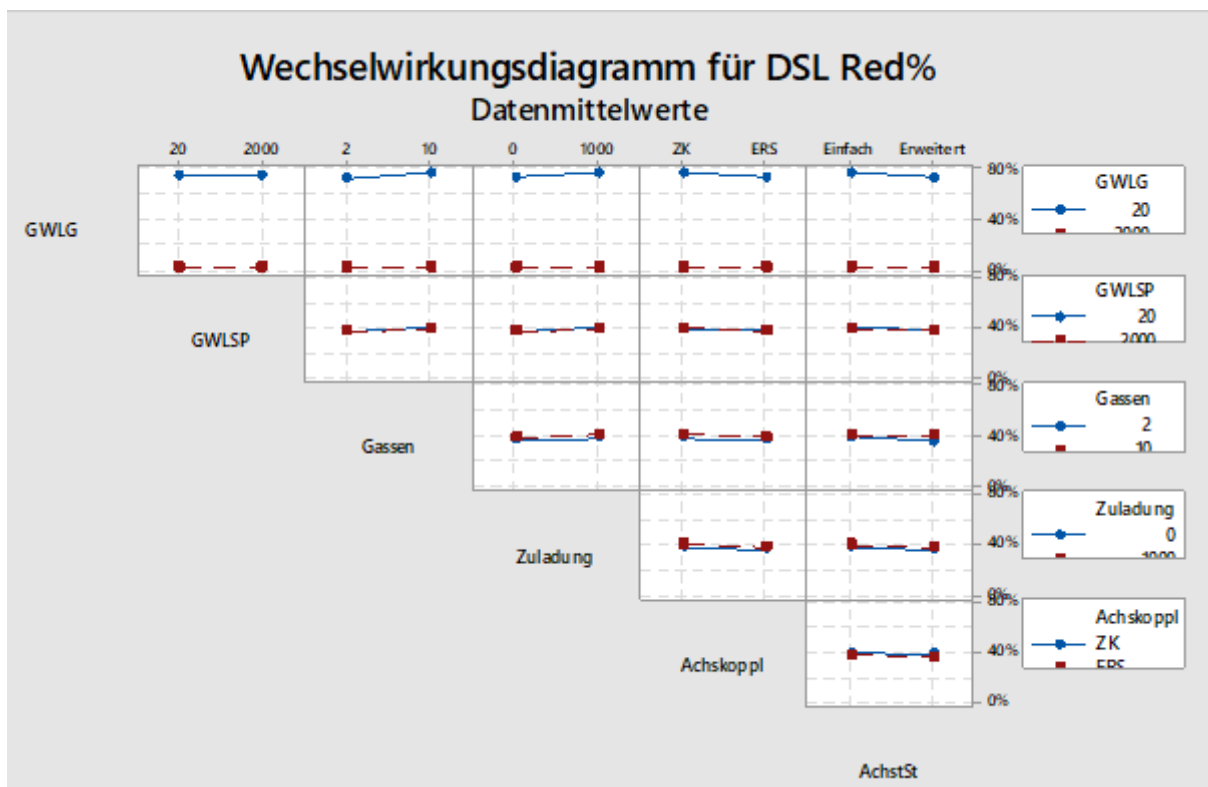


Abbildung 6-8: Wechselwirkungsdiagramm der signifikanten 2FWW für die Reduzierung der Durchsatzleistung bei APL

Nachdem die 2FWW reduziert worden sind, werden im Folgenden die Faktoren auf ihre Signifikanz überprüft und die nicht signifikanten Faktoren ausgesiebt. Die signifikanten Faktoren sind:

- die Anzahl der Gassen (Gassen)
- die relative Leistungsgrenze (LSP) ist nicht signifikant, wird als Einstellparameter des LM trotzdem aufgenommen
- die relative Lastganggrenze (LGG)
- die Zuladung (Zuladung)

- die Wegoptimierung (Wegopt)
- die Achskopplung (Achskoppl)
- die Achssteuerung (AchsSt)

Die Effekte dieser Faktoren sind in Tabelle 6-15, Abbildung 6-9 und Abbildung 6-10 dargestellt. Im Pareto-Diagramm sind die standardisierten Effekte (Betrag des F-Werts) der einzelnen Faktoren und der signifikanten 2FWW dargestellt. Die gestrichelte rote senkrechte Linie markiert die Grenze, ab der das Signifikanzniveau (hier: 95 %) erreicht ist. Alle darüber liegenden Effekte der Faktoren sind signifikant.

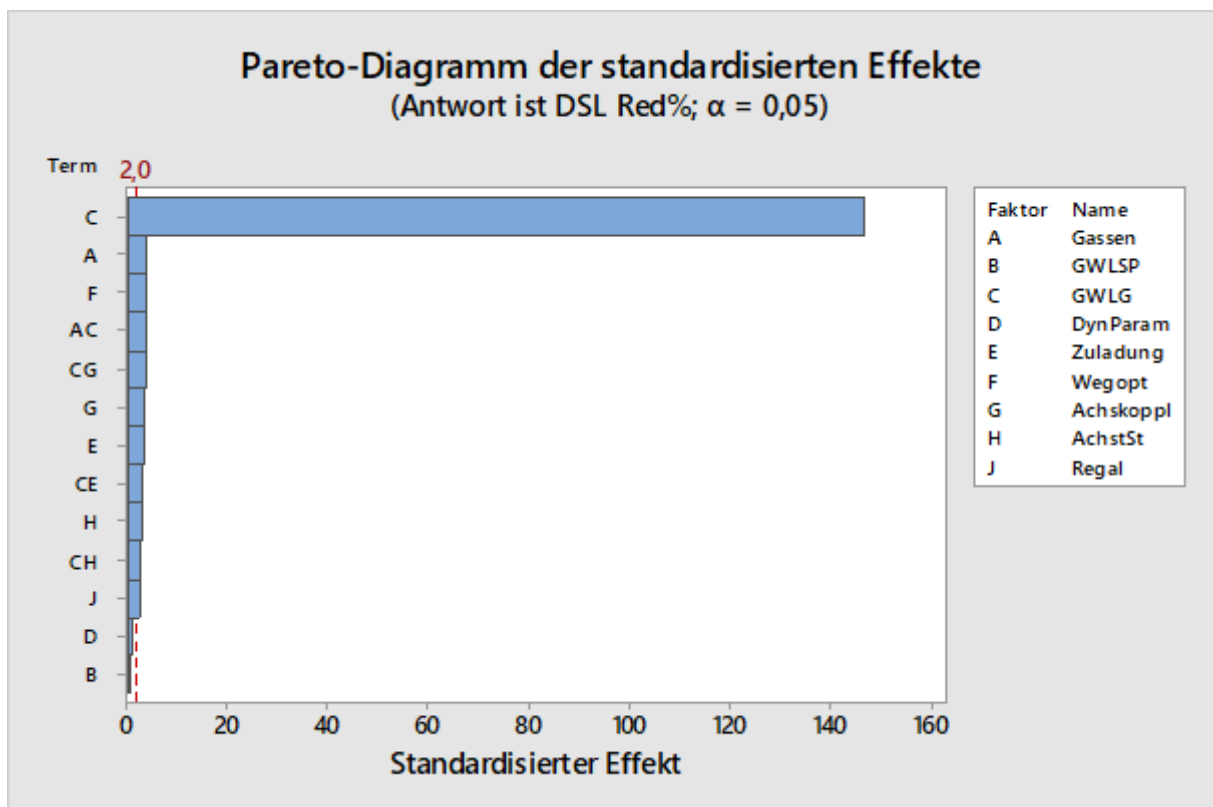


Abbildung 6-9: Pareto-Diagramm der Effekte des Screening-Versuchsplans APL

In Abbildung 6-10 sind die Haupteffektdiagramme der Faktoren vom Screening-Versuchsplan der APL dargestellt. Die Faktordiagramme zeigen an, wie sich die Reduzierung der Durchsatzleistung auf den Faktorstufen der Faktoren ändert. Wie bei den 2FWW werden die Faktoreffekte auf ihre Plausibilität beurteilt.

Der erste signifikante Faktor ist die relative Lastganggrenze. Bei einem Wechsel der Grenze von 2000 % zu 20 % wird die Durchsatzleistung bei den APL um durchschnittlich 73,9 % reduziert. Wie in Abbildung 6-10 zu sehen, ist die Lastganggrenze (LGG) der Faktor mit dem größten Effekt auf die Durchsatzleistung. Dieser Faktor wird in der Hauptuntersuchung geprüft.

Die relative Leistungsgrenze ist nicht signifikant, wird als Einstellparameter des LM trotzdem weiter untersucht. APL legen größere Stecken mit geringerer Dynamik zurück. Die Fahrdauer ist im Gegensatz zu jener der des AKL länger. Bei Verzögerungen von 0,1 bis 2 Sekunden wirken sich diese kaum auf die Durchsatzleistung aus, da diese bei weniger Fahrten pro Zeiteinheit seltener vorkommen.

Ein weiterer signifikanter Faktor ist die Anzahl der Gassen. Mit steigender Anzahl der Gassen wird die Durchsatzleistung reduziert. Von zwei auf zehn Gassen steigt die Reduzierung der Durchsatzleistung um ca. 2,1 % an, was voraussichtlich an der höheren Wahrscheinlichkeit der Überlagerung der Freigabebeanfragen liegt. Die Anzahl der Gassen wird in der Hauptuntersuchung der APL weiter untersucht.

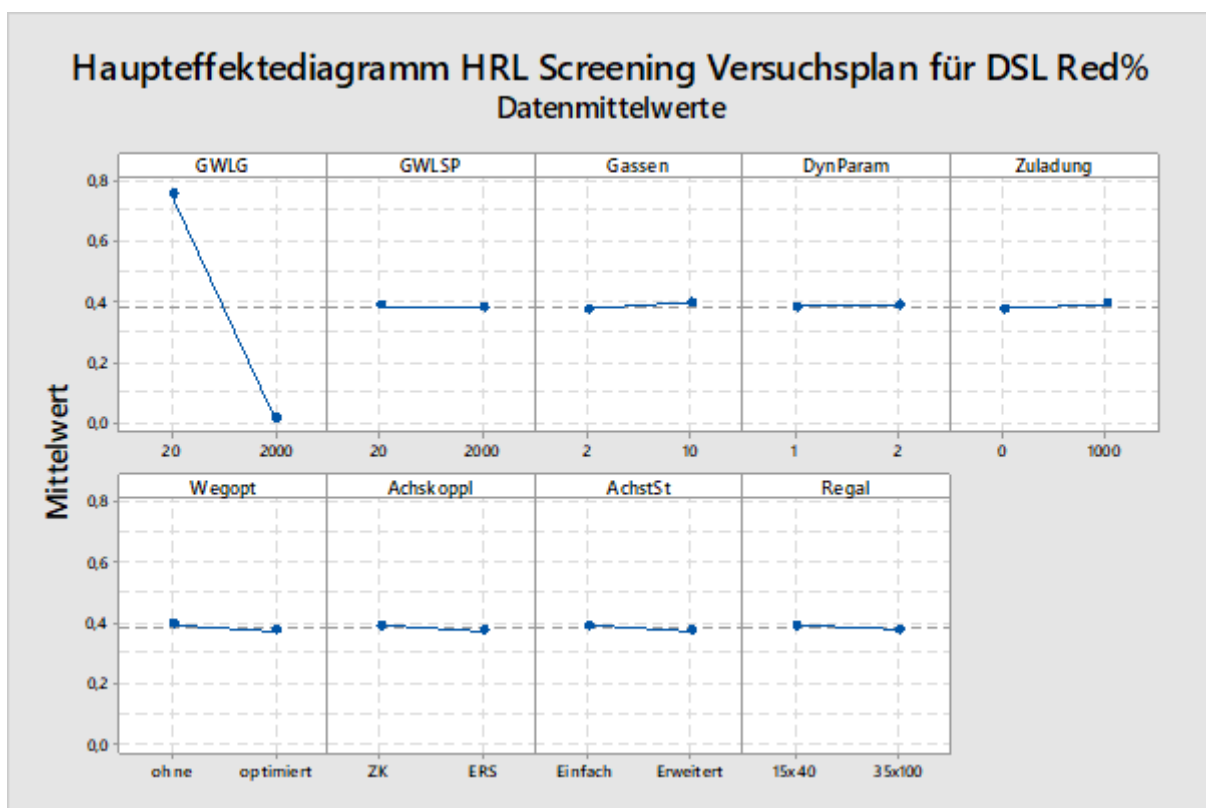


Abbildung 6-10: Faktordiagramme der Faktoren des APL-Screening-Versuchsplans

Die Zuladung ist ein signifikanter Faktor bei den APL. Mit einer Zuladung von 1000 kg ist die Reduzierung der Durchsatzleistung um 1,9 % höher als ohne Zuladung. Die Wechselwirkung der Zuladung mit der relativen Lastganggrenze wirkt sich voraussichtlich auf die Mittelwerte der Faktorstufen der Zuladung aus. Die Zuladung hat bei keiner Lastganggrenze keinen Effekt auf die Durchsatzleistung, bei einer Lastganggrenze dafür einen verstärkten Effekt. Die Zuladung wird bei der Hauptuntersuchung berücksichtigt.

Die Faktoren Wegoptimierung, Achskopplung und Achssteuerung sind Faktoren mit signifikanten Effekten. Wie bei der Zuladung stehen sie in 2FWW mit der relativen Lastganggrenze. Bei einer sehr hohen Lastganggrenze haben sie einen sehr kleinen Effekt auf die Durchsatzleistungs-Reduzierung. Bei einer niedrigen Lastganggrenze erhöhen sie die Durchsatzleistung, da sie alle den Energiebedarf pro Fahrt reduzieren und damit mehr Fahrten bei gleicher Lastganggrenze durchgeführt werden können. Die Achskopplung und die Achssteuerung werden in die Hauptuntersuchung aufgenommen.

Das Ergebnis des Screening-Versuchsplans für das APL ist, dass die folgenden Faktoren in der Hauptuntersuchung untersucht werden:

- Anzahl Gassen
- Relative Leistungsgrenze (LSP)
- Relative Lastganggrenze (LGG)
- Zuladung
- Achskopplung (Achskoppl)
- Achssteuerung (AchstSt)

Tabelle 6-16: Ergebnis Screening-Versuchsplan APL mit reduzierten Faktoren und 2-Faktor-Wechselwirkungen ($R^2 = 99,7\%$; $R_{adj}^2 = 99,6\%$)

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert	Signifikanz
Modell	10	8,77401	0,8774	1506,05	0,000	***
Linear	6	8,75305	1,45884	2504,10	0,000	***
Gassen	1	0,00705	0,00705	12,11	0,001	**
LSP	1	0,0001	0,0001	0,17	0,682	-
LGG	1	8,73069	8,73069	14986,20	0,000	***
Zuladung	1	0,00559	0,00559	9,59	0,003	**
Achskoppl	1	0,00571	0,00571	9,79	0,003	**
AchstSt	1	0,00391	0,00391	6,72	0,012	*
2-Faktor-Wechselwirkungen	4	0,02095	0,00524	8,99	0,000	***
Gassen*LGG	1	0,00662	0,00662	11,36	0,001	**
LGG*Zuladung	1	0,00443	0,00443	7,60	0,008	**
LGG*Achskoppl	1	0,00649	0,00649	11,14	0,002	**
LGG*AchstSt	1	0,00342	0,00342	5,87	0,019	*
Fehler	53	0,03088	0,00058			
Gesamt	63	8,80488				

Damit ist das Aussieben der Faktoren für AKL und APL beendet. Bei den AKL wurden die Faktoren auf fünf reduziert. Bei den APL sind sechs Faktoren verblieben. Im nächsten Schritt werden die Versuchspläne für die Hauptuntersuchung definiert.

6.3 Simulationsvorbereitung für die Hauptuntersuchung

6.3.1 Auswahl der Art der Experimentplanung des Plantyps und der Stufen für die Einflussgrößen

In diesem Kapitel werden der Versuchsplan, die Faktoren und deren Stufen für die Hauptuntersuchung der beiden RBG-Typen beschrieben. Der Versuchsplan der Hauptuntersuchung ist vollfaktoriell, was bedeutet, dass alle Faktorkombinationen simuliert werden. Im vorherigen Kapitel wurden die Faktoren mit Hilfe von Screening-Versuchsplänen ausgesiebt. Die Faktoren für die Hauptuntersuchung und deren Stufen sind in der Tabelle 6-17 sowie der Tabelle 6-18 dargestellt und unterscheiden sich ausschließlich bei den mehr als zweistufigen Faktoren von den Stufen der Screening-Versuchspläne. Die Grenzen sind auf die in der Tabelle dokumentierten Werte festgelegt. Ziel ist es, mit möglichst wenigen Stufen eine verlässliche Aussage über die Zusammenhänge zu bekommen.

Die relative Leistungsgrenze hatte bei den Screening-Versuchen der AKL und APL einen kleinen Effekt auf die Durchsatzleistung. Aus diesem Grund werden die Stufen für die Hauptuntersuchung um die Stufen 10 % und 15 % ergänzt.

Die relative Lastganggrenze wirkt sich voraussichtlich proportional auf die Reduzierung der Durchsatzleistung aus. Die Grenzen werden bei der Hauptuntersuchung der AKL und APL auf die Stufenwerte 25 %, 50 %, 75 % und 100 % reduziert.

Der Faktor „Anzahl der Gassen“ erhöht sich bei beiden Hauptuntersuchungen in vier Schritten mit unterschiedlichen Abständen, womit ein unstetiger Verlauf des Ergebnisses erkannt werden kann.

Für die AKL werden bei der Regaldimension die Faktorstufen der Screening-Versuchspläne beibehalten. Die Faktorstufen der ausgesiebt Faktoren der AKL werden für die Hauptuntersuchung im Folgenden festgelegt:

- Dynamikparameter

Als Dynamikparameter wird die höchste Dynamik ausgewählt. Mit dieser werden die höchsten Leistungsspitzen und die höchsten Leistungsmittelwerte erzeugt. Zusätzlich ist das Verhältnis zwischen mittleren Leistungsbedarf und Leistungsspitze bei dieser Konfiguration am größten.

- **Wegoptimierung**
Für die Hauptuntersuchung wird die Wegoptimierung auf die Faktorstufe „Ohne“ festgelegt. Mit der Wegoptimierung werden die zurückzulegenden Strecken der RBG reduziert und somit die Durchsatzleistung erhöht sowie der Energiebedarf reduziert. Wie vorher schon beschrieben, ist die Wegoptimierung eine Funktion der übergeordneten Systeme, dem MFS bzw. dem LVS. Diese kann sich bei verschiedenen Anbietern unterscheiden und führt herstellerabhängig zu unterschiedlichen Ergebnissen. Aus diesem Grund wird die Hauptuntersuchung ohne eine Wegoptimierung durchgeführt.
- **Zuladung**
Aus den Screening-Versuchen ist herausgekommen, dass die Zuladung auf das Ergebnis einen geringen Einfluss hat. Da bei vielen AKL-Herstellern eine maximale Zuladung von 100 kg zugelassen ist, wird diese Zuladung für die Hauptuntersuchung verwendet.
- **Achssteuerungsstrategie**
Mit der Achssteuerungsstrategie werden die Bewegungen der beiden Hauptachsen der RBG energetisch optimiert, indem die Startzeitpunkte der Bewegungen zueinander und die Geschwindigkeiten der einzelnen Achsen optimiert werden. Diese Funktion ist heute bei einigen Antriebsherstellern in den Umrichtern vorinstalliert und somit Stand der Technik. Aus diesem Grund wird der Faktor Achssteuerungsstrategie in der Stufe „Erweitert“ für die Hauptuntersuchung festgelegt.

Tabelle 6-17: Faktoren für die Hauptuntersuchung der AKL

Relative Leistungsgrenze [%]	10	15	20	100
Relative Lastganggrenze [%]	25	50	75	100
Anzahl der Gassen	2	3	5	10
Dynamikparameter AKL				1
Fahrgeschwindigkeit [m/s]				6
Fahrbeschleunigung [m/s ²]				3
Hubgeschwindigkeit [m/s]				3
Hubbeschleunigung [m/s ²]				3
Wegoptimierung				Ohne
Zuladung [kg]				100
Achskopplung	Zwischenkreiskopplung		Energierückspeiseeinheit	
Achssteuerungsstrategie	Erweiterte Achssteuerung			
Regaldimension [HxL]	7x20		14x80	

Mit diesen Faktoren und Faktorstufen wird im Programm Minitab ein Versuchsplan erstellt. Der Versuchsplan besteht aus 256 Versuchen. Der Versuchsplan mit den Ergebnissen der Simulation ist im Anhang E zu sehen.

Die Faktoren und die Faktorstufen für die Hauptuntersuchung der APL sind die beiden Grenzen, die Anzahl der Gassen, die Zuladung, die Achskopplung und die Achssteuerung. Die ausgesiebten Faktoren werden auf die im Folgenden beschriebenen Stufen für die Hauptuntersuchung festgelegt:

- **Dynamikparameter**
Als Dynamikparameter wird die höchste Dynamik ausgewählt. Mit dieser werden die höchsten Leistungsspitzen und die höchsten Leistungsmittelwerte erzeugt. Zusätzlich ist das Verhältnis zwischen mittlerem Leistungsbedarf und Leistungsspitze bei dieser Konfiguration am größten.
- **Wegoptimierung**
Die Wegoptimierung wird aus den gleichen Gründen wie beim AKL auf den Stufenwert „Ohne“ festgelegt.
- **Regaldimensionen**
Die Regaldimensionen sind, anders als bei dem AKL, nicht signifikant. Aus diesem Grund wird dieser Faktor für die Hauptuntersuchung festgelegt. Da mit den im Screening-Versuchsplan verwendeten Stufenwerten Extremwerte dieses

Faktors verwendet wurden, wird für die Hauptuntersuchung ein Regal mit den Dimensionen „28x80“ verwendet.

Tabelle 6-18: Faktoren für die Hauptuntersuchung der APL

Relative Leistungsgrenze [%]	10	15	20	100
Relative Lastganggrenze [%]	25	50	75	100
Anzahl der Gassen	2	3	5	10
Dynamikparameter APL				
Fahrgeschwindigkeit [m/s]				3
Fahrbeschleunigung [m/s ²]				0,5
Hubgeschwindigkeit [m/s]				1
Hubbeschleunigung [m/s ²]				1
Wegoptimierung				Ohne
Zuladung pro LE [kg]	500			1000
Achskopplung	Zwischenkreiskopplung		Energierückspeiseeinheit	
Achssteuerungsstrategie	Einfache Achssteuerung		Erweiterte Achssteuerung	
Regaldimension [HxL]				28x80

Wie der Versuchsplan für die AKL wird der Versuchsplan für die APL mit dem Programm Minitab erstellt. Dadurch, dass bei den APL sechs Faktoren verblieben sind, besteht der Versuchsplan bei den APL aus 512 Simulationsläufen. Der Versuchsplan mit den Ergebnissen ist im Anhang E dargestellt.

Um die Grenzen für die Simulationsläufe zu berechnen, werden Referenzsimulationen durchgeführt.

6.3.2 Bestimmung der Simulationsdauer und Art der Statistiksammlung

In den Simulationsläufen werden abhängig von den Eingabeparametern die Durchsatzleistung und der elektrische Leistungsbedarf des Lagersystems ermittelt. Das Simulationsmodell arbeitet hierfür die Auftragslisten der RBG ab und beendet den Simulationslauf entweder, wenn alle RBG den letzten Teilauftrag aus der Auftragsliste abgearbeitet haben oder das Ende der Simulationsdauer erreicht ist. Aufgrund von zufälligen Einflüssen streuen die Durchsatzleistung und der Leistungsbedarf während des Simulationslaufs permanent. Wenn zwei Simulationsläufen mit zufällig erzeugten Auftragslisten durchgeführt werden, differieren die Ergebnisse. Bei unendlicher Simulationsdauer und unendlich langen Auftragslisten kann für die eingestellten Parameter die Grundgesamtheit ermittelt werden und die Verteilung der Simulationsergebnisse geht in die Verteilungsdichte der Grundgesamtheit über. Jedes Simulationsergebnis stellt eine Stichprobe dieser Grundgesamtheit dar. Ob der Mittelwert dieser Stichprobe der

Mittelwert der Grundgesamtheit ist, ist nicht sicher. Mit einem Vertrauensbereich bzw. einem Konfidenzintervall lässt sich mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit $1 - \alpha$ sagen, dass der Mittelwert der Grundgesamtheit sich innerhalb dieses Vertrauensbereichs befindet. Auf Basis einer Stichprobe ist der Vertrauensbereich sehr breit. Mit steigender Anzahl an Stichproben wird der Vertrauensbereich schmaler.

Um die Simulation effizient durchzuführen, wird mit Hilfe des Vertrauensbereichs der benötigte Stichprobenumfang berechnet. Zur Berechnung des Stichprobenumfangs n_{SP} werden das Quantil für die Standardnormalverteilung z der Wahrscheinlichkeit $1 - \alpha$ für den Vertrauensbereich, die Standardabweichung σ und der Schätzfehler e benötigt [Eck-1992, S. 519]:

$$n_{SP} = \left[\frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}} * \sigma}{e} \right]^2 \quad (6-30)$$

Aus den Versuchsergebnissen der Screening-Versuchspläne (Beispiel in Abbildung 6-11) ergibt sich für die Durchsatzleistung in einer Viertelstunde eine maximale Standardabweichung von $\sigma = 1,433\%$. Mit einer Fehlerspanne von $2,5\%$ oder minimal $e = 0,5kW$ und einem Vertrauensniveau von $1 - \alpha = 0,95$ werden für die 2 Gassen maximal 32 Einzelwerte benötigt, was eine Simulationsdauer von mindestens 4 Stunden bedeutet. Die Simulationszeit bei zwei Gassen für die Simulation wird auf 4,5 Stunden festgelegt und für die Versuche mit mehr Gassen übernommen.

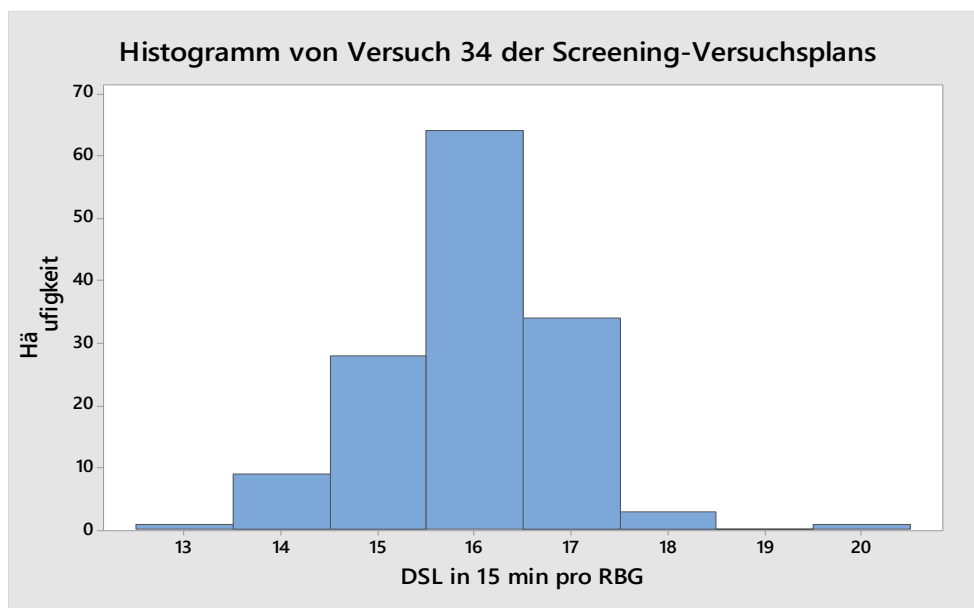


Abbildung 6-11: Verteilung der Durchsatzleistung (DSL) in 15 min pro RBG von APL Screening-Versuch 34

Erfasst werden bei jedem Simulationslauf der elektrische Leistungsbedarf des Lagersystems und die Daten zur Durchsatzleistung. Der elektrische Leistungsbedarf des Lagersystems wird in den Zeitschritten der Simulation erfasst. Damit lassen sich nach der Simulation die Leistungsmittelwerte über die Simulationsdauer berechnen. Mit der Leistung und den Leistungsmittelwerten wird die korrekte Funktionsweise des LM überprüft. Die Durchsatzleistung wird für jedes RBG einzeln erfasst und anschließend an den Simulationslauf zur gesamten Durchsatzleistung der Anlage zusammengefasst. Die Durchsatzleistung wird in kumulierten Ein- und Auslagerungen in 15-min-Schritten abgespeichert. Zusätzlich wird pro RBG der Fortschritt in der Auftragsliste abgespeichert. Damit werden Prüfungen vorgenommen, bspw. ob die Auftragsliste bereits vor dem Ablauf der Simulationsdauer abgearbeitet wurde.

6.3.3 Umsetzen in Modellvarianten und Durchführung der Simulation

Die Faktoren und deren Stufen für die Simulationsläufe werden in Kapitel 6.3 beschrieben. Die Variation dieser Faktoren wird bei der Modellerstellung, bei der Auftragslistengenerierung oder bei der Simulation umgesetzt. Grafisch dargestellt ist dies in Abbildung 6-12. Die Anzahl der Gassen wird bei der Modellerstellung und bei der Auftragslistengenerierung umgesetzt. Für jede Variante wird ein eigenes Modell erstellt und das Lastmanagement mit den Ein- und Ausgängen erzeugt. Bei der Auftragslistengenerierung fließen die Anzahl der Gassen (Anzahl der Auftragslisten), die Regalgröße, die Gewichtsverteilung, die Zuladung, die Lagerstrategie und indirekt die Simulationsdauer ein. Die Simulationsdauer wird berücksichtigt, damit für alle Gassen genügend Teilaufträge vorhanden sind. Für die Simulationsläufe werden die Leistungsgrenze, die Lastganggrenze, die Dynamikparameter, die Simulationsdauer, die Schrittgröße und mit den Geräteeigenschaften die Geräteart festgelegt.

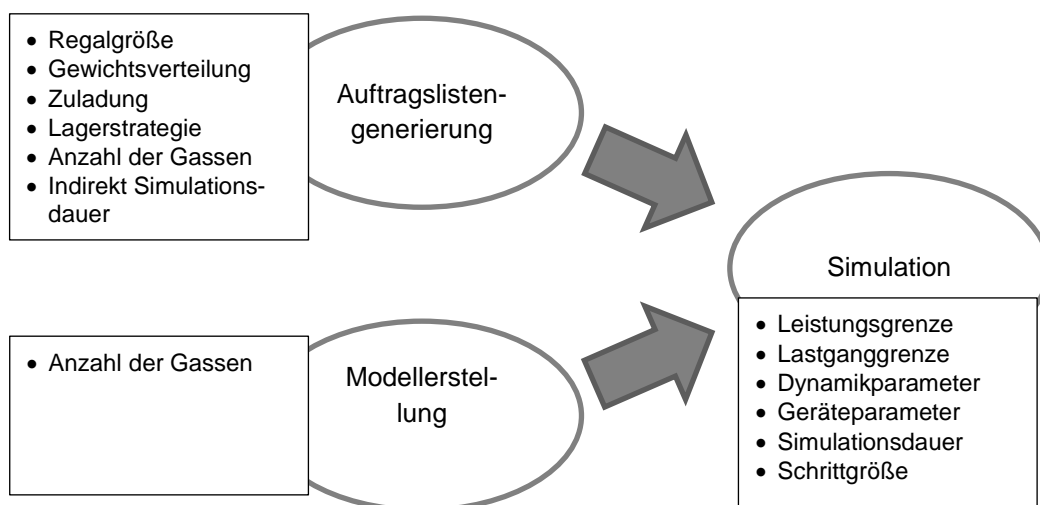


Abbildung 6-12: Eingabe der Simulationsparameter in die Simulationsschritte

Die externe Ablauflogik der Simulation mit den Schritten Simulationsvorbereitung, Implementierung des Simulationsmodells, Durchführen der Simulation und Verarbeitung der Simulationsergebnisse ist in Kapitel 3.4.1 beschrieben. Die Simulationsvorbereitung legt die Versuchspläne, die RBG-Parameter die Simulationsdauer und die Abgelegte der Daten fest.

Während der Implementierung des Simulationsmodells werden die Leistungsvoraussagen berechnet, die Referenzszenarien ermittelt, diese simuliert, die absoluten Grenzwerte für das LM berechnet und die Simulationsmodelle parametrisiert. In der Vorberechnung der Leistungsvoraussagen werden alle Auftragslisten des Versuchsplans auf einzigartige Fahrten und einzigartige Lastzyklen untersucht. Für diese werden mit den zugehörigen RBG-Parametern die Leistungsvoraussagen berechnet und in einer Tabelle abgelegt. Aus dieser werden die Leistungsvoraussagen während der Simulation abgerufen. Die Referenzszenarien leiten sich aus den Auftragslisten ab. Aus deren Simulationsergebnissen werden die Lastganggrenzen und die Referenz-Durchsatzleistung ermittelt. Die Leistungsgrenze wird anhand der Leistungsvoraussagen berechnet. Bei der Parametrisierung der Simulationsmodelle werden die Simulationsdauer und die Schrittweite eingestellt.

Die Simulationsdurchführung erfolgt in den Schritten Simulations- und Leistungsvoraussagemodell laden, Modelle parametrisieren und simulieren, relevante Simulationsdaten auslesen und Simulationsparameter und -ergebnisse abspeichern. Die Simulationsparameter umfassen die RBG- und LM-Parameter wie die Grenzen und die Grundleistungsangaben für die Leistungsvoraussage. Nach der Simulation werden die Auftragslisten, die Simulationsparameter und die vollständigen Simulationsergebnisse in einer Datei für den jeweiligen Simulationslauf abgespeichert. Zusätzlich werden die Durchsatzleistungen der RBG zusammengefasst, der Leistungsbedarf des Lagersystems ausgelesen und in einer Ergebnisliste abgelegt. Diese beinhaltet den Speicherort und den Dateinamen des Simulationslaufs, die durchschnittliche Durchsatzleistung pro Stunde aller RBG, die Durchsatzleistung pro 15 min pro RBG, den Fortschritt in der Auftragsliste aller RBG, die Anzahl der Ein- und Auslagerungen über die Simulationsdauer, den Lastgang des Simulationsdurchlaufs, die Grenzen des LM und den Energiebedarf des Lagersystems. Die Simulationstabelle wird um die Werte maximale Leistung, maximaler Leistungsmittelwert und die durchschnittliche Durchsatzleistung pro RBG erweitert.

Die Referenzsimulationen dienen zur Bewertung der Auswirkungen des LM, außerdem werden aus ihnen die Referenz-Durchsatzleistung und die Lastganggrenzen abgeleitet. Sie werden aus den Simulationsauftragslisten ermittelt. Alle Simulationsläufe mit einer 100 %-Lastganggrenze und einer 100 %-Leistungsgrenze werden ohne das

Lastmanagement simuliert, dabei werden der maximale Leistungsbedarf, der maximale Leistungsmittelwert und die Durchsatzleistung ermittelt. Die Lastganggrenze für die Simulationsläufe wird aus dem maximalen Leistungsmittelwert der zugehörigen Referenzsimulation berechnet. Die Ergebnisse des Simulationslaufs mit LM werden mit den Ergebnissen der Referenzsimulation verglichen. Die Referenzsimulationen mit den Parametereinstellungen und den Ergebnissen sind in der Tabelle 6-19 abgebildet. Die Lagerstrategie und die Einlagerstrategie sind chaotisch, das Regal ist 28 m hoch sowie 80 m lang und die höhere Dynamik wird bei allen Simulationen verwendet.

Tabelle 6-19: Ergebnisse der Referenzsimulationen der APL

Gassenanzahl	Achskopplung	Zuladung [kg]	Achssteuerung	Durchsatzleistung	maximale Leistung [kW]	maximaler Leistungsmittelwert [kW]	Durchschnittlicher Leistungsbedarf [kW]
2	ZK	500	Einfach	58,11	148,28	19,74	17,93
2	ZK	500	Erweitert	57,67	141,10	18,89	17,59
2	ZK	1000	Einfach	58,33	143,89	20,02	18,86
2	ZK	1000	Erweitert	57,89	145,00	20,94	19,32
2	ERS	500	Einfach	59,11	132,70	17,10	15,57
2	ERS	500	Erweitert	58,00	154,20	16,73	15,40
2	ERS	1000	Einfach	57,89	151,05	17,43	16,44
2	ERS	1000	Erweitert	58,33	153,37	18,70	16,31
3	ZK	500	Einfach	58,00	180,15	30,69	27,41
3	ZK	500	Erweitert	57,33	163,29	28,04	26,54
3	ZK	1000	Einfach	58,00	275,37	31,87	29,45
3	ZK	1000	Erweitert	57,63	228,10	31,62	28,83
3	ERS	500	Einfach	58,37	167,13	25,71	23,36
3	ERS	500	Erweitert	58,07	168,26	24,93	22,86
3	ERS	1000	Einfach	57,56	245,60	26,55	25,33
3	ERS	1000	Erweitert	57,63	181,22	27,73	25,12
5	ZK	500	Einfach	58,22	288,34	48,79	44,98
5	ZK	500	Erweitert	58,36	225,32	45,65	43,21
5	ZK	1000	Einfach	58,18	265,91	51,00	49,12
5	ZK	1000	Erweitert	58,00	262,67	49,50	47,16
5	ERS	500	Einfach	58,31	273,34	41,37	39,05
5	ERS	500	Erweitert	58,44	280,19	40,49	37,82
5	ERS	1000	Einfach	58,53	268,32	45,06	41,53
5	ERS	1000	Erweitert	58,13	245,25	43,13	40,43
10	ZK	500	Einfach	58,56	423,24	95,39	90,05
10	ZK	500	Erweitert	57,91	351,34	90,76	87,52
10	ZK	1000	Einfach	58,38	566,12	102,86	97,71
10	ZK	1000	Erweitert	58,20	554,65	99,04	94,87
10	ERS	500	Einfach	58,78	349,76	82,61	77,45

10	ERS	500	Erweitert	58,31	418,87	78,23	75,52
10	ERS	1000	Einfach	58,20	650,54	87,07	83,66
10	ERS	1000	Erweitert	57,87	439,21	85,16	81,05

Die Durchsatzleistung der Referenzsimulationen liegt in einem Bereich von 57 bis 59 Ein- und Auslagerungen pro RBG und Stunde. Zusätzlich ist zu sehen, dass der maximale Leistungsbedarf das 7,5-fache der mittleren Leistung beträgt. Die Differenz zwischen dem maximalen Leistungsmittelwert der Referenzsimulationen und deren durchschnittlichen Leistungsmittelwert erklärt sich durch die unterschiedlichen Auftragszusammensetzungen in den Messperioden. Ist der mittlere Leistungsbedarf der Teilaufträge in der Messperiode höher, bspw. viele Einzelspiele einlagern mit hoher Hubdifferenz, erhöht sich der Leistungsmittelwert. Dadurch lässt sich auch der Leistungsanstieg von der „Einfachen“ zur „Erweiterten“ Achssteuerung erklären. Aufgrund von den Auftragszusammensetzungen kann dieser sich erhöhen.

6.4 Simulationsergebnisse der Hauptuntersuchung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulationsläufe aufbereitet und bewertet. Jeder Faktor und dessen Effekt wird tabellarisch und grafisch dargestellt und bewertet. Für beide Untersuchungen werden die Haupteffekt- und Wechselwirkungsdiagramme für die Durchsatzleistung, den maximalen Leistungsbedarf, den maximalen Leistungsmittelwert und die Reduzierung der Durchsatzleistung ermittelt.

6.4.1 Automatisiertes Kleinteilelager

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse der vollfaktoriellen Versuchspläne für die AKL beschrieben. Diese werden mittels der Statistiksoftware Minitab ermittelt. Zuerst werden die Effekte der Faktoren auf die maximale Leistungsaufnahme und den Leistungsmittelwert und anschließend die Effekte der Faktoren auf die Durchsatzleistung des Lagersystems berechnet. Die Effekte auf die maximale Leistung und auf den Leistungsmittelwert werden beschrieben, da diese Grundlage für die Ergebnisse der Effekte auf die Durchsatzleistung bilden. Abschließend wird das ermittelte Regressionsmodell für die Durchsatzleistung beschrieben und anhand von Testszenarien überprüft.

Das Haupteffektdiagramm und das Wechselwirkungsdiagramm für die maximale Leistungsaufnahme des AKL-Lagersystems sind in Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14 dargestellt. Die Ergebnisse beider Diagramme sind bei aktiviertem Lastmanagement entstanden. Das Haupteffektdiagramm zeigt, dass die relative Leistungsgrenze (LSP), die Anzahl der Gassen und die Regalgröße den größten Effekt auf die maximale

Leistungsaufnahme der AKL haben. Die relative Leistungsgrenze hat einen Effekt auf die maximale Leistungsaufnahme, da sie diese begrenzt. Stärker ist der Effekt der Anzahl der Gassen. Mit der Anzahl der Gassen steigt die theoretische maximale Leistungsaufnahme proportional an. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich hohe Leistungsbedarfe aller RBG überlagern, ist gering. Das Gewicht eines AKL erhöht sich mit steigender Höhe des Lagers, daher ist die maximale Leistungsaufnahme bei einem Regal mit einer Höhe von 14 m höher als bei einem mit 7 m. Bei einem Wechsel der Achskopplung von Zwischenkreiskopplung zu Energierückspeisung erhöht sich der Mittelwert der maximalen Leistungsaufnahme. Die Energierückspeisung hat verglichen mit der Zwischenkreiskopplung einen höheren Grundleistungsbedarf, wodurch die maximale Leistungsaufnahme höher ist. Die Achskopplung wirkt sich nicht auf die Durchsatzleistung aus. Der Effekt der Lastganggrenze ist positiv. Bei einer steigenden Lastganggrenze erhöht sich der maximale Leistungsbedarf des Lagersystems.

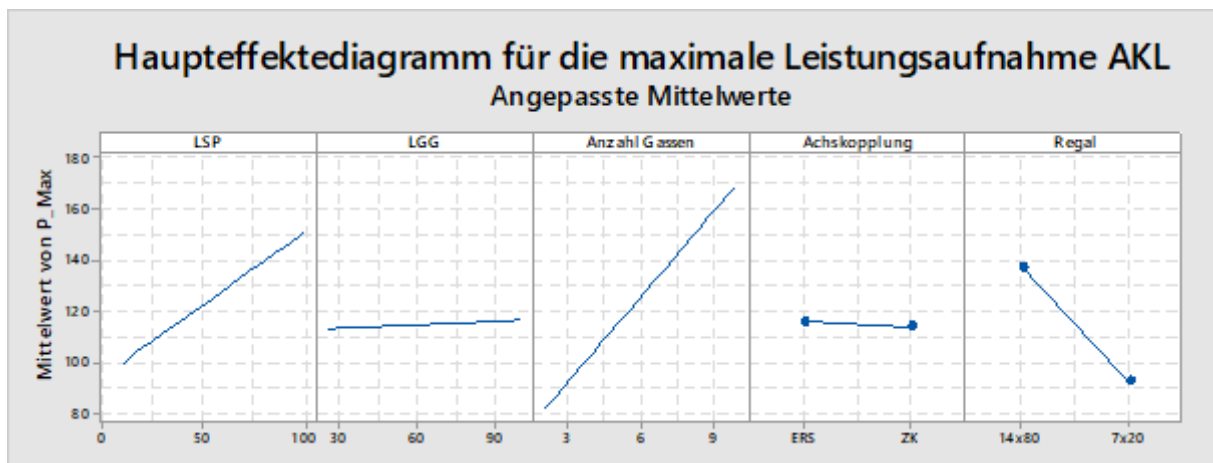


Abbildung 6-13: Haupteffektediagramm der maximalen Leistungsaufnahme des Lagersystems der AKL

Im Wechselwirkungsdiagramm sind die Wechselwirkungen der Faktoren dargestellt. Die Wechselwirkung zwischen der relativen Leistungsgrenze und die Anzahl der Gassen ist am stärksten. Die relative Leistungsgrenze berechnet sich relativ zur theoretischen maximalen Leistungsaufnahme. Die maximale Leistungsaufnahme wird absolut dargestellt. Der absolute Grenzwert für die maximale Leistungsaufnahme ist bei 10 Gassen und einer relativen Grenze von 80 % sehr viel höher als bei 2 Gassen. Aus diesem Grund ist die Wechselwirkung so ausgeprägt. Eine weitere Wechselwirkung besteht zwischen der relativen Lastganggrenze und der Grenze für die maximale Leistungsaufnahme. Bei einer Lastganggrenze von 25 % hat die Grenze für die maximale Leistungsaufnahme einen kleineren Effekt auf die maximale Leistungsaufnahme als bei einer Lastganggrenze von 100 %. Eine ausgeprägte Wechselwirkung besteht zwischen der Anzahl der Gassen und der Regalgröße. Wie von den Haupteffekten bekannt ist, erhöht sich die maximale Leistungsaufnahme bei einem höheren und damit

schwereren RBG. Die maximale Leistungsaufnahme steigt somit bei einem höheren RBG mit der Anzahl der Gassen stärker an als bei einem niedrigeren. Alle weiteren Wechselwirkungen sind nicht signifikant.

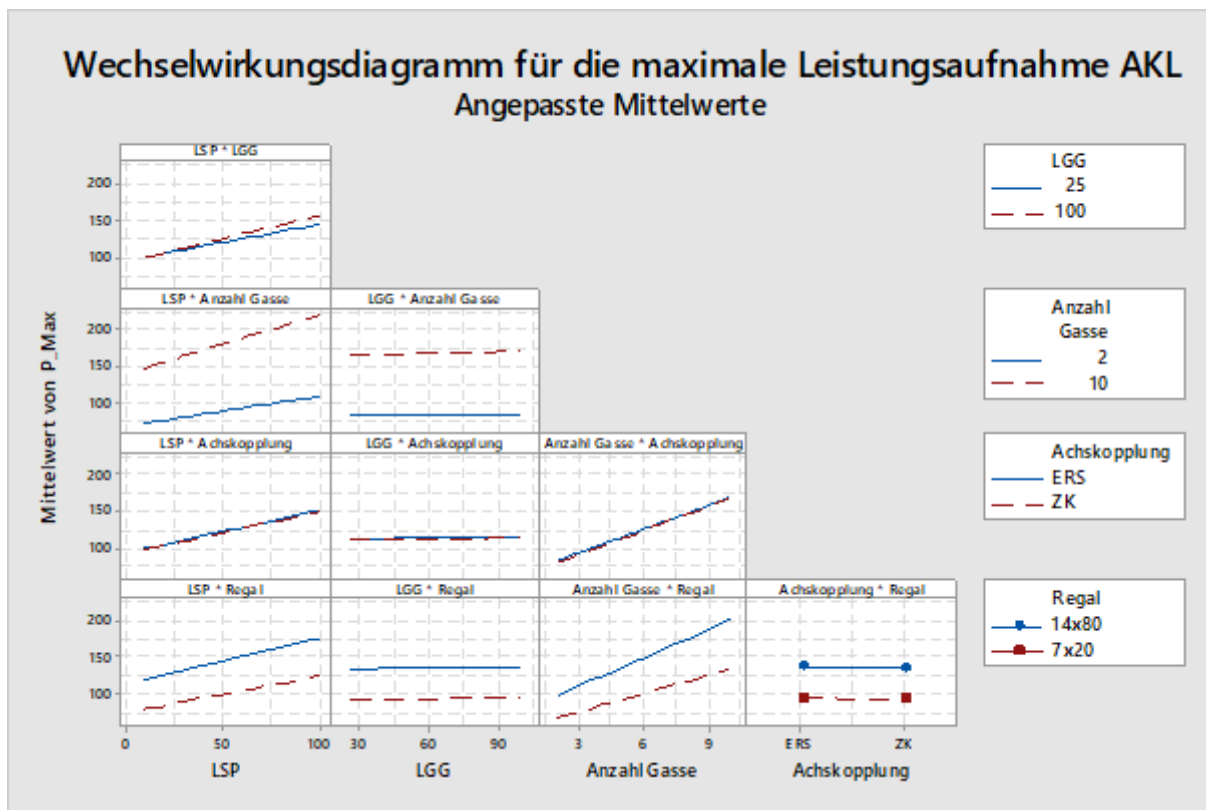


Abbildung 6-14: Wechselwirkungsdiagramm der maximalen Leistungsaufnahme des Lagersystems der AKL

Das Haupteffektediagramm des Leistungsmittelwerts für das Lagersystem ist in Abbildung 6-15 dargestellt. Die größten Effekte kommen von der relativen Lastganggrenze und von der Anzahl der Gassen. Der Effekt der Lastganggrenze ist positiv, wodurch der Leistungsmittelwert mit steigender relativer Lastganggrenze steigt. Die Grenze gibt an, welcher relative Leistungsmittelwert freigegeben ist, und zwar relativ zu dem maximalen Leistungsmittelwert des Lagersystems ohne Lastmanagement. Die Begrenzung erklärt den starken Effekt. Der Effekt der Anzahl der Gassen ist positiv und der Leistungsmittelwert des Lagersystems steigt mit steigender Anzahl an Gassen. Da der absolute Leistungsmittelwert nicht relativ zur Anzahl der Gassen ist, steigt dieser proportional an. Die Leistungsspitze wirkt sich nicht auf den Leistungsmittelwert aus, was nachvollziehbar ist, da diese die Teilaufträge ausschließlich kurzfristig verzögert. Der Effekt der Achskopplung auf den Leistungsmittelwert ist positiv und ein Wechsel von einer Energierückspeisung zu einer Zwischenkreiskopplung erhöht den Leistungsmittelwert. Das ist nachvollziehbar, da mit der Energierückspeisung die potentielle Energie beim Senken bzw. die Bremsenergie des Fahrwerks zurückgewonnen werden. Der

Effekt der Regalabmessungen ist negativ. Bei einem Wechsel der Regalgröße von „14x80“ zu „7x20“ sinkt der Leistungsmittelwert. Das ist nachvollziehbar, da das RBG eine höhere Masse hat und damit bei gleicher Dynamik einen höheren mittleren Leistungsbedarf hat. Die Achskopplung wirkt sich nicht auf die Durchsatzleistung aus.

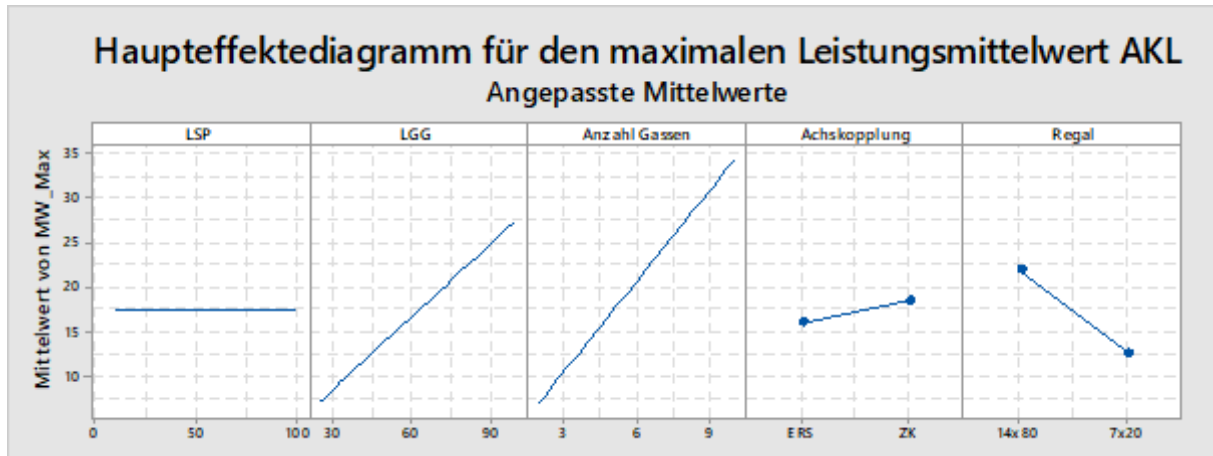


Abbildung 6-15: Haupteffektediagramm des Leistungsmittelwerts des Lagersystems der AKL

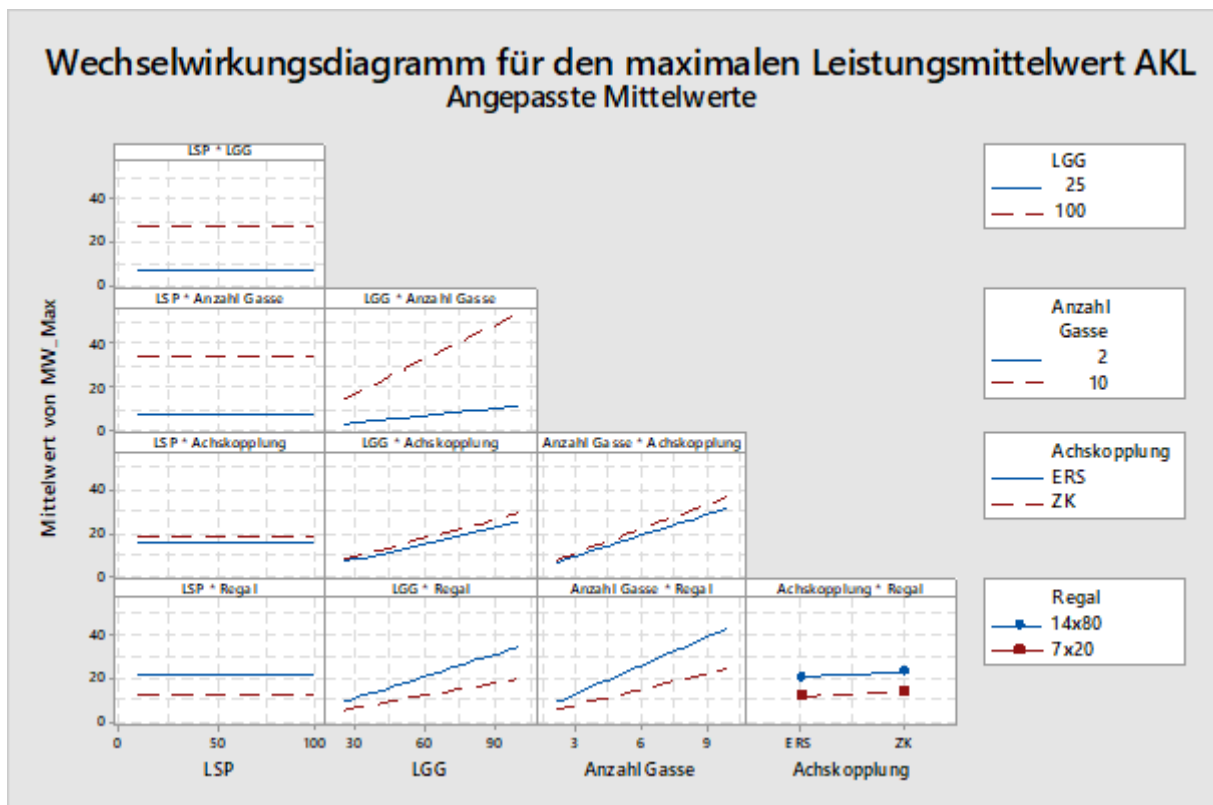


Abbildung 6-16: Wechselwirkungsdiagramm des Leistungsmittelwerts des Lagersystems AKL

Das Wechselwirkungsdiagramm der Leistungsmittelwerte der AKL-Lagersysteme der Hauptuntersuchung ist in Abbildung 6-16 dargestellt. Eine Wechselwirkung besteht zwischen der relativen Lastganggrenze und der Anzahl der Gassen. Der Effekt der

Lastganggrenze auf den maximalen Leistungsmittelwert ist bei 10 Gassen sehr viel größer als bei 2 Gassen. Diese Wechselwirkung besteht, da der maximale Leistungsmittelwert bei 10 Gassen größer ist und damit die dazu relative Lastganggrenze stärker auswirkt als bei 2 Gassen. Eine weitere große Wechselwirkung besteht zwischen der Anzahl der Gassen und der Regalgröße. Der mittlere Leistungsbedarf des höheren RBG ist höher und somit steigt der Leistungsmittelwert von 2 auf 10 Gassen stärker an als bei einem niedrigerem RBG. Der Wechselwirkungseffekt zwischen der relativen Lastganggrenze und dem Regal bedeutet, dass bei einer niedrigen Lastganggrenze der Unterschied der Leistungsmittelwerte zwischen den beiden Regalgrößen kleiner ist als bei einer hohen relativen Lastganggrenze. Die Lastganggrenze ist relativ und der mittlere Leistungsbedarf des höheren RBG ist größer, damit ist die Lastganggrenze des höheren RBG bei 100 % größer als die des kleineren. Der gleiche Grund führt auch bei der Wechselwirkung zwischen der relativen Lastganggrenze und der Achskopplung zu einer größeren Differenz bei einer Grenze von 100 % im Gegensatz zu der bei 20 %. Ein RBG mit Energierückspeisung hat einen niedrigeren Energiebedarf als eines mit Zwischenkreiskopplung. Die absolute Differenz zwischen beiden Achskopplungen steigt mit steigender relativer Grenze. Zwischen der Anzahl der Gassen und der Achskopplung besteht auch eine Wechselwirkung. Mit einer steigenden Anzahl an Gassen steigt der Leistungsmittelwert mit Zwischenkreiskopplung stärker als der mit Energierückspeisung. Dies resultiert aus dem niedrigeren mittleren Leistungsbedarf eines RBG mit Energierückspeisung.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Regressionsanalyse der Hauptuntersuchung der AKL dokumentiert. Die Analyse untersucht die Beziehung zwischen den Faktoren Grenze für die Leistungsspitze, Lastganggrenze, Gassenanzahl, Achskopplung und Regalgröße sowie der Zielgröße relative Durchsatzleistung. Der erste Schritt führt eine Regressionsanalyse ohne Anpassung des Modells durch, um die Haupteffekte der Faktoren auf die relative Durchsatzleistung des Lagersystems darzustellen.

In Abbildung 6-17 ist das Haupteffektediagramm aller Faktoren für die relative Durchsatzleistung der AKL abgebildet. Den größten Effekt auf die relative Durchsatzleistung hat die relative Lastganggrenze. Diese hat einen positiven Effekt auf die relative Durchsatzleistung, welche bei steigender Grenze ansteigt. Die Lastganggrenze begrenzt den Energiebedarf einer Messperiode (hier: 15 min). Jede Lagerbewegung hat einen Energiebedarf. Damit können bei einer niedrigeren verfügbaren Energiemenge in der Messperiode weniger Lagerbewegungen ausgeführt werden. Weitere signifikante Effekte sind die Gassenanzahl, die Achskopplung und die Regalgröße. Mit steigender Gassenanzahl sinkt die relative Durchsatzleistung. Der Effekt der Gassenanzahl auf die Durchsatzleistung ist sehr klein und entsteht durch die gegenseitige Verzögerung der Aufträge während der Freigabeanfrage. Wenn eine Anfrage aktiv ist, kann keine

weitere Anfrage bearbeitet werden, und somit werden alle anderen Anfragen verzögert. Bei einer höheren Gassenanzahl verstärkt sich dieser Effekt. Der Effekt der Achskopplung ist auch ein steigender Effekt. Bei einem Wechsel von einem RBG mit Enerrierückspeisung zu einem mit Zwischenkreiskopplung steigt die relative Durchsatzleistung. Dieser Effekt ist sehr klein und lässt sich nicht erklären. Der Effekt der Regalgröße ist negativ, so dass die relative Durchsatzleistung bei einem Wechsel von der Regalgröße „14x80“ zur Regalgröße „7x20“ sinkt. Aufgrund der kürzeren Wege im kleineren Lager ist die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass die Anfrage des einen RBG die eines anderen blockiert. Das reduziert die relative Durchsatzleistung zusätzlich.

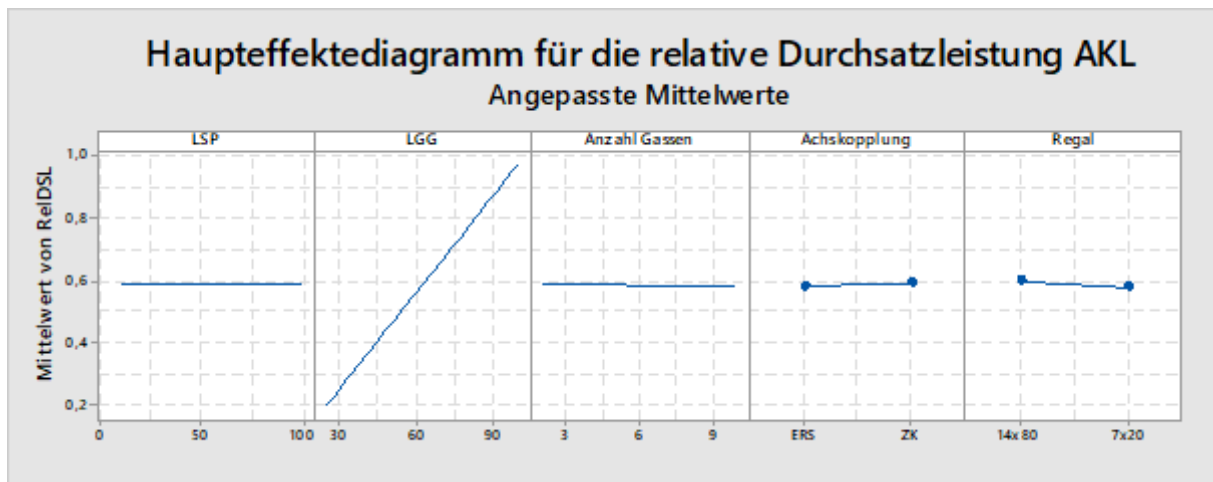


Abbildung 6-17: Haupteffektediagramm aller Faktoren der Hauptuntersuchung für die relative Durchsatzleistung der AKL

Die Ergebnisse der Varianzanalyse und die Regressionskoeffizienten der Haupteffekte sind in der Tabelle 6-20 und Tabelle 6-21 dargestellt. Wie an den p-Werten zu sehen ist, sind alle Faktoren bis auf die Grenze für den maximalen Leistungsbedarf bei der Hauptuntersuchung der AKL signifikant.

Tabelle 6-20: Ergebnisse der Varianzanalyse der Hauptuntersuchung der AKL mit allen Haupteffekten ($S = 2,2\%$; $R^2 = 99,45\%$; $R_{adj}^2 = 99,44\%$)

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert
Regression	5	20,9585	4,1917	9052,97	0
LSP	1	0	0	0,04	0,84
LGG	1	20,9257	20,9257	45194,08	0
Anzahl Gassen	1	0,0038	0,0038	8,26	0,004
Achskopplung	1	0,0039	0,0039	8,39	0,004
Regal	1	0,025	0,025	54,09	0
Fehler	250	0,1158	0,0005		
Gesamt	255	21,0743			

Tabelle 6-21: Regressionskoeffizienten der Hauptuntersuchung AKL mit allen Faktoren

Term	Koef	SE Koef	t-Wert	p-Wert
Konstante	-0,0414	0,00458	-9,04	0
LSP	0,000007	0,000036	0,2	0,84
LGG	0,010229	0,000048	212,59	0
Anzahl Gassen	-0,001254	0,000436	-2,87	0,004
Achskopplung				
ZK	0,00779	0,00269	2,9	0,004
Regal				
7x20	-0,01978	0,00269	-7,35	0

Die Ergebnisse der schrittweisen Regressionsanalyse werden nachfolgend beschrieben. Bei der schrittweisen Regressionsanalyse sind Terme aufgenommen worden, die ein Signifikanzniveau von 5% aufweisen. Dabei wurden alle Faktor-Terme und die 2-Faktor-Wechselwirkungsterme berücksichtigt, die mit den Grenzen in Wechselwirkung stehen. Zusätzlich wurden von der relativen Lastganggrenze die Polynomterme 2. und 3. Grades hinzugefügt. Die allgemeine beispielhafte Gleichung für die Regressionsanalyse ist somit [Bac-2016, S. 158]:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2 + b_3 \cdot x^3 \quad (6-31)$$

Die Ergebnisse der Varianzanalyse der schrittweisen Regressionsanalyse sind in der Tabelle 6-22 dargestellt.

Tabelle 6-22: Varianzanalyse der schrittweisen Regressionsanalyse AKL

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert
Regression	10	21,0543	2,10543	25894,83	0
LSP	1	0	0,00002	0,23	0,63
LGG	1	0,0108	0,01077	132,43	0
Anzahl Gassen	1	0,0015	0,00148	18,18	0
Achskopplung	1	0,0045	0,00453	55,71	0
Regal	1	0,0099	0,00989	121,58	0
LGG*Anzahl Gassen	1	0,0049	0,00487	59,87	0
LGG*Achskopplung	1	0,0021	0,0021	25,85	0
LGG*Regal	1	0,0015	0,00145	17,89	0
LGG*LGG	1	0,0085	0,00853	104,92	0
LGG*LGG*LGG	1	0,0137	0,01369	168,41	0
Fehler	245	0,0199	0,00008		
Gesamt	255	21,0743			

Aus der schrittweisen Regressionsanalyse hat sich mit den Koeffizienten aus Tabelle 6-23 die folgende Regressionsgleichung für die relative Durchsatzleistung bei Energierückspeisung und einem Regal der Größe 14x80 ergeben:

$$\begin{aligned}
 RelDSL = & -0,02866 + 0,000007LSP + 0,006610LGG & (6-32) \\
 & + 0,001910Anzahl_Gassen - 0,000051LGG \\
 & * Anzahl_Gassen + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG \\
 & * LGG * LGG
 \end{aligned}$$

Bei Energierückspeisung und einem Regal der Größe 7x20:

$$\begin{aligned}
 RelDSL = & -0,05911 + 0,000007LSP + 0,006781LGG & (6-33) \\
 & + 0,001910AnzahlGassen - 0,000051LGG * AnzahlGassen \\
 & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG
 \end{aligned}$$

Bei Zwischenkreiskopplung und einem Regal der Größe 14x80:

$$\begin{aligned}
 RelDSL = & -0,00806 + 0,000007LSP + 0,006405LGG & (6-34) \\
 & + 0,001910AnzahlGassen - 0,000051LGG * AnzahlGassen \\
 & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG
 \end{aligned}$$

Bei Zwischenkreiskopplung und einem Regal der Größe 7x20:

$$\begin{aligned}
 RelDSL = & -0,03850 + 0,000007LSP + 0,006576LGG & (6-35) \\
 & + 0,001910AnzahlGassen - 0,000051LGG * AnzahlGassen \\
 & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG
 \end{aligned}$$

Tabelle 6-23: Koeffizienten für die Regressionsgleichung der AKL aus der schrittweisen Regression

Term	Koef	SE Koef	t-Wert	p-Wert
Konstante	-0,02866	0,00984	-2,91	0,004
LSP	0,000007	0,000015	0,48	0,63
LGG	0,00661	0,000574	11,51	0
Anzahl Gassen	0,00191	0,000448	4,26	0
Achskopplung				
ZK	0,02061	0,00276	7,46	0
Regal				
7x20	-0,03044	0,00276	-11,03	0
LGG*Anzahl Gas- sen	-0,000051	0,000007	-7,74	0
LGG*Achskopplung				
ZK	-0,000205	0,00004	-5,08	0
LGG*Regal				
7x20	0,000171	0,00004	4,23	0
LGG*LGG	0,000104	0,00001	10,24	0
LGG*LGG*LGG	-0,000001	0	-12,98	0

Die Zusammenfassung der Anpassung der schrittweisen Regression sind in der Tabelle 6-24 dargestellt. Die Standardabweichung S der Antwortvariablen relative Durchsatzleistung $RelDSL$ beträgt 0,9%. Das Bestimmtheitsmaß R^2 (R-Qd) gibt an, dass 99,91% der Streuung der relativen Durchsatzleistung vom Modell erklärt werden können. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß R^2_{kor} (R-Qd(kor)) ist für das Modell 99,90%.

Tabelle 6-24: Zusammenfassung der Anpassung der schrittweisen Regression der AKL

S	R-Qd	R-Qd(kor)	R-Qd(prog)
0,009017	99,91 %	99,90 %	99,90 %

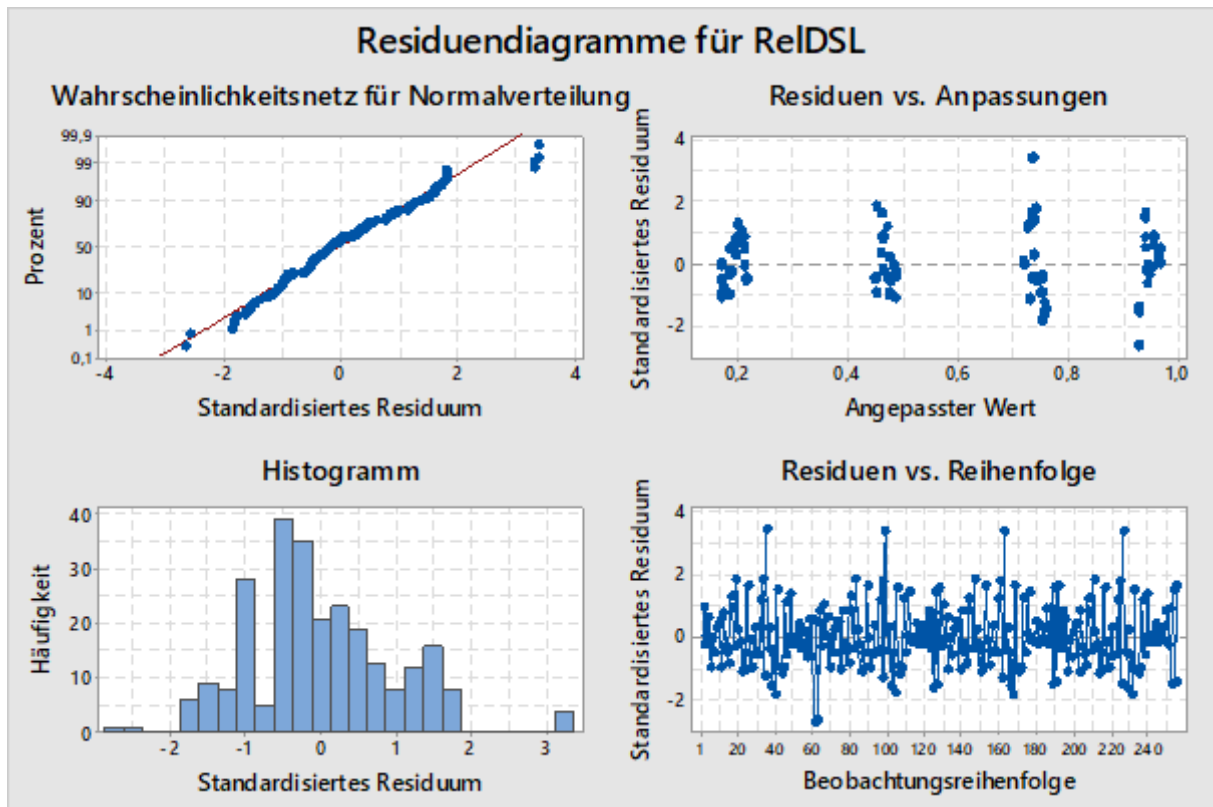


Abbildung 6-18: Residuendiagramme des linearen Regressionsmodells der Hauptuntersuchung der AKL

Die Residuendiagramme werden bei einer Regressionsanalyse von Minitab erzeugt und dienen zusätzlich zur Bewertung des Modells (siehe Abbildung 6-18). Im Wahrscheinlichkeitsnetz für Normalverteilung sollten die Punkte auf einer Geraden liegen, um die Normalverteilung nachzuweisen. Dies ist bei dieser Untersuchung größtenteils der Fall. Mit der Darstellung „Residuen vs. Anpassung“ wird überprüft, ob die Residuen zufällig verteilt sind und ob diese eine konstante Varianz aufweisen. Bei einer Gleichverteilung ober- und unterhalb der Nulllinie ist dies gegeben. Im Histogramm sind die Häufigkeiten der Residuen dargestellt. In diesem sind ganz deutlich die Ausreißer zu erkennen. Das Histogramm deutet zwar nicht auf eine Normalverteilung hin, aufgrund der großen Zahl an Beobachtungen sind die Signifikanztests trotzdem gültig [Bac-2016, S. 111]. Im Diagramm „Residuen vs. Reihenfolge“ sind die Punkte gleichmäßig um die horizontale Nulllinie verteilt, was nicht auf eine Abhängigkeit zwischen den Residuen hindeutet.

Die Wechselwirkungen zwischen der relativen Lastganggrenze und der Gassenanzahl, der Regalabmessung und der Achskopplung haben keine großen Effekte und werden aus dem Modell entfernt. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse ohne diese Wechselwirkungen sind im Folgenden dargestellt.

Tabelle 6-25: Varianzanalyse der schrittweisen Regressionsanalyse AKL mit reduzierten 2-Faktor-Wechselwirkungen

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert
Regression	6	21,0459	99,87%	21,0459	3,50765
LGG	1	20,9257	99,30%	0,01	0,00996
Anzahl Gassen	1	0,0038	0,02%	0,0038	0,00382
Achskopplung	1	0,0039	0,02%	0,0039	0,00389
Regal	1	0,025	0,12%	0,025	0,02505
LGG*LGG	1	0,0737	0,35%	0,0085	0,00853
LGG*LGG*LGG	1	0,0137	0,06%	0,0137	0,01369
Fehler	249	0,0284	0,13%	0,0284	0,00011
Gesamt	255	21,0743	100,00%		
Regression	6	21,0459	99,87%	21,0459	3,50765

Aus der schrittweisen Regressionsanalyse hat sich mit den Koeffizienten aus Tabelle 6-26 die folgende Regressionsgleichung für die relative Durchsatzleistung bei Energierückspeisung und einem Regal der Größe 14x80 ergeben:

$$\begin{aligned} RelDSL = & -0,0115 + 0,006340LGG - 0,001254AnzahlGassen \\ & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned} \quad (6-36)$$

Bei Energierückspeisung und einem Regal der Größe 7x20:

$$\begin{aligned} RelDSL = & -0,0313 + 0,006340LGG - 0,001254AnzahlGassen \\ & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned} \quad (6-37)$$

Bei Zwischenkreiskopplung und einem Regal der Größe 14x80:

$$\begin{aligned} RelDSL = & -0,0037 + 0,006340LGG - 0,001254AnzahlGassen \\ & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned} \quad (6-38)$$

Bei Zwischenkreiskopplung und einem Regal der Größe 7x20:

$$\begin{aligned} RelDSL = & -0,0235 + 0,006340LGG - 0,001254AnzahlGassen \\ & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned} \quad (6-39)$$

Tabelle 6-26: Koeffizienten für die Regressionsgleichung der AKL aus der schrittweisen Regression mit reduzierten 2-Faktor-Wechselwirkungen

Term	Koef	SE Koef	t-Wert	p-Wert
Konstante	-0,0115	0,0112	-1,03	0,304
LGG	0,00634	0,000678	9,35	0
Anzahl Gassen	-0,001254	0,000216	-5,79	0
Achskopplung				
ZK	0,00779	0,00133	5,84	0
Regal				
7x20	-0,01978	0,00133	-14,83	0
LGG*LGG	0,000104	0,000012	8,65	0
LGG*LGG*LGG	-0,000001	0	-10,96	0
Konstante	-0,0115	0,0112	-1,03	0,304

Die Residuendiagramme der Regressionsanalyse mit reduzierten 2-Faktorwechselwirkungen sind in Abbildung 6-19 dargestellt. Die Punkte im Wahrscheinlichkeitsnetz liegen bis auf die Ausreißer auf einer Linie. Die Residuen sind im Diagramm „Residuen vs. Anpassungen“ gleichverteilt um die horizontale Nulllinie. Das Histogramm deutet auf eine symmetrische Verteilung mit Ausreißern bei ca. ± 3 hin. Und in der Darstellung „Residuen vs. Reihenfolge“ sind die Residuen gleichmäßig beidseitig der Nulllinie verteilt und es ist kein Muster zu erkennen. Die Residuen werden zusätzlich auf Normalverteilung überprüft. Hierfür werden die Residuen mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung getestet. Wenn der p-Wert des Testergebnisses größer als das Signifikanzniveau ist, wird die Nullhypothese nicht verworfen. Diese sagt aus, dass normalverteilte Daten vorliegen. Die Testergebnisse sind in Abbildung 6-20 abgebildet. Der p-Wert des Testergebnisses ist 0,091 und somit größer als das Signifikanzniveau von 0,05. Damit sind die Residuen normalverteilt, die Signifikanztests der Effekte und der Koeffizienten der Regressionsanalyse sind aussagekräftig und die Regressionsgleichungen haben ihre Gültigkeit.

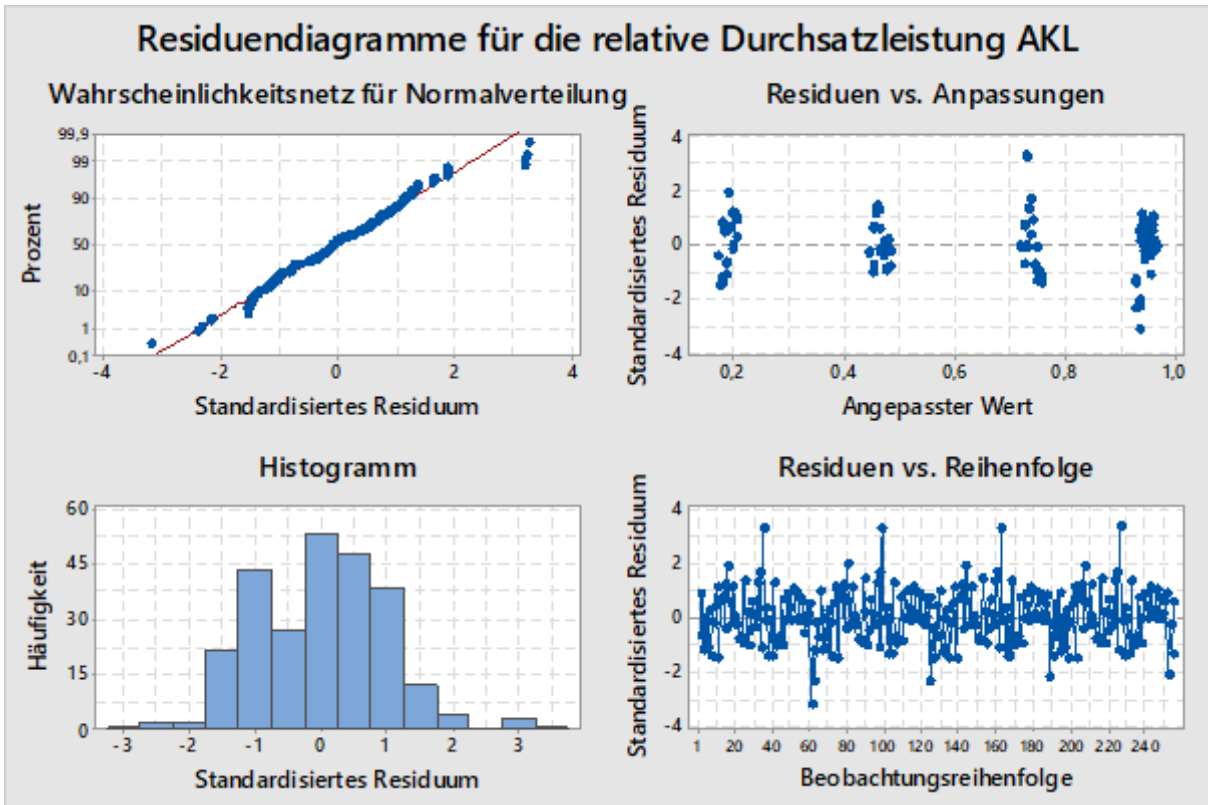


Abbildung 6-19: Residuendiagramm der Regressionsanalyse der Hauptuntersuchung AKL mit reduzierten 2-Faktor-Wechselwirkungen

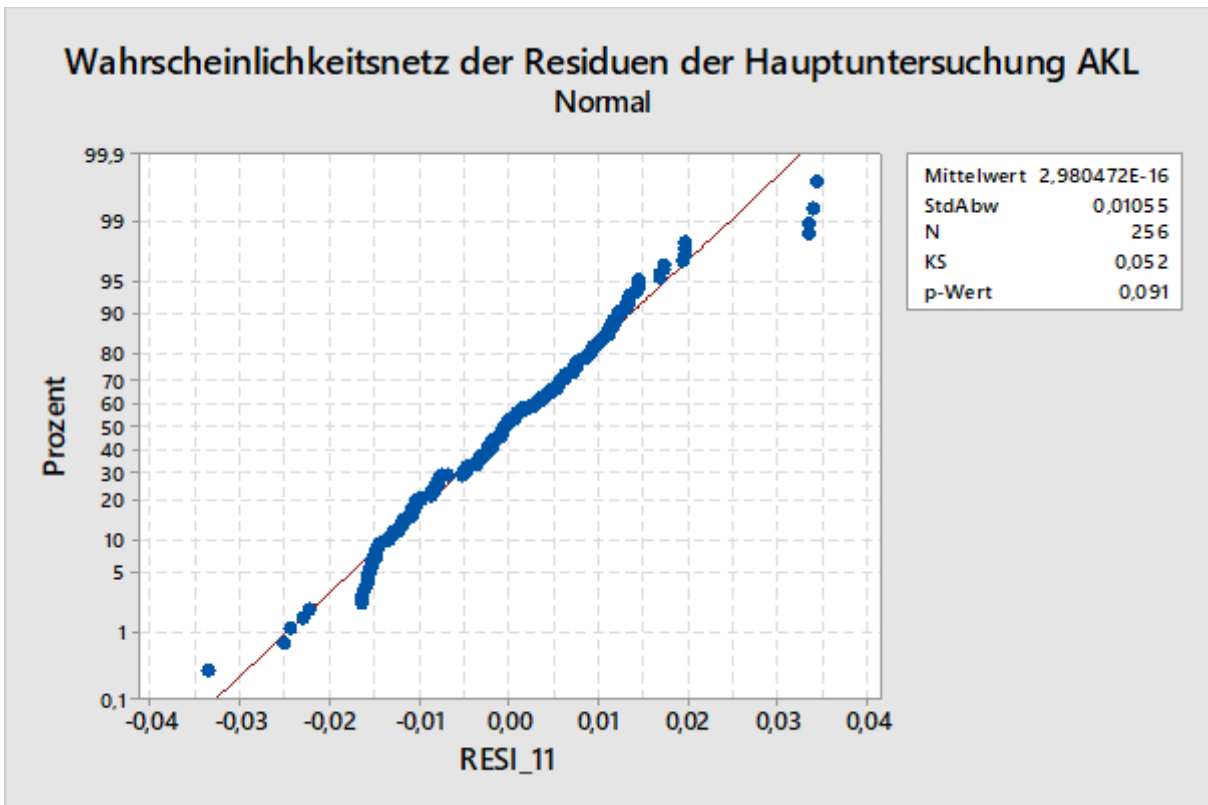


Abbildung 6-20: Untersuchung der Normalverteilung der Residuen der Hauptuntersuchung AKL

6.4.2 Automatisiertes Palettenregallager

Die Ergebnisse der Hauptuntersuchung für die APL sind in diesem Abschnitt beschrieben. Zuerst werden die Effekte der Faktoren auf die maximale Leistungsaufnahme und den Leistungsmittelwert und anschließend die Effekte der Faktoren auf die Durchsatzleistung des Lagersystems beschrieben. Die Effekte auf die maximale Leistung und auf den Leistungsmittelwert werden beschrieben, da diese die Grundlage für die Ergebnisse der Effekte auf die Durchsatzleistung bilden. Abschließend wird das ermittelte Regressionsmodell für die Durchsatzleistung beschrieben und anhand von Test-szenarien überprüft.

Das Haupteffektediagramm und das Wechselwirkungsdiagramm für die maximale Leistungsaufnahme des APL-Lagersystems sind in Abbildung 6-21 und Abbildung 6-22 dargestellt. Die Ergebnisse beider Diagramme sind bei aktiviertem Lastmanagement entstanden. Das Haupteffektediagramm zeigt, dass die relative Leistungsgrenze (LSP) und die Anzahl der Gassen den größten Effekt auf die maximale Leistungsaufnahme der APL haben. Die relative Leistungsgrenze hat einen Effekt auf die maximale Leistungsaufnahme, da sie diese begrenzt. Stärker ist der Effekt der Anzahl der Gassen. Mit der Anzahl der Gassen steigt die theoretische maximale Leistungsaufnahme proportional an. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich hohe Leistungsbedarfe aller RBG überlagern, ist gering. Die Zuladung erhöht die maximale Leistungsaufnahme bei konstanter Durchsatzleistung. Die Faktoren Achskopplung und Achssteuerung reduzieren die maximale Leistungsaufnahme des Lagersystems. Die Durchsatzleistung ist bei diesen Faktoren konstant. Der Effekt der Achskopplung ist nicht signifikant. Die Achskopplung reduziert die maximale Leistungsaufnahme des Lagersystems, weil mit der erweiterten Achssteuerung die Anzahl der Fahrten mit einer hohen Leistungsaufnahme reduziert wird. Die erweiterte Achssteuerung reduziert in den in Kapitel 3.5.2 beschriebenen Fällen die Geschwindigkeit der jeweils schnelleren Achse. Dadurch wird die Leistungsaufnahme der Achse reduziert und die Leistungsaufnahme von beiden Fahrachsen ist in der Summe geringer. Die Achskopplung und die Achssteuerung wirken sich nicht auf die Durchsatzleistung aus.

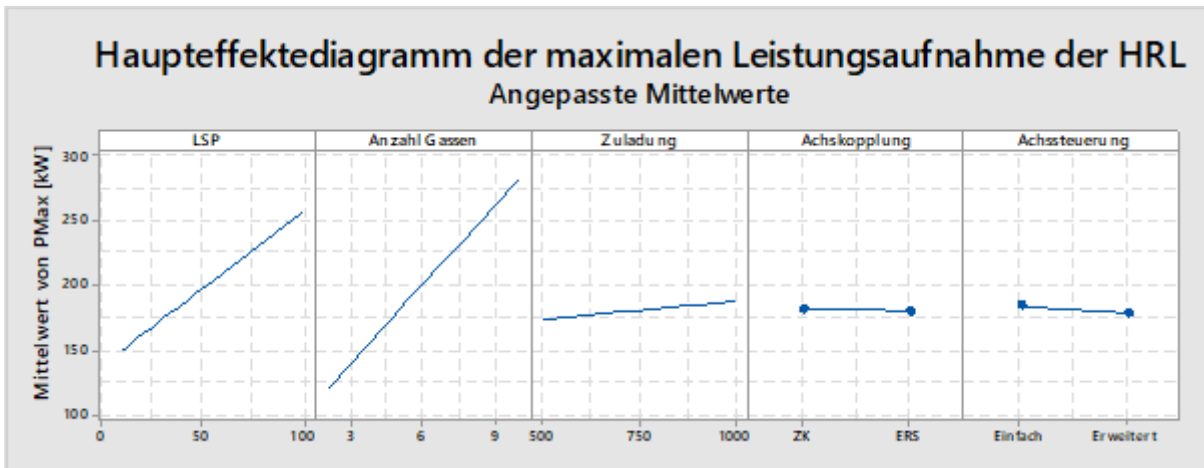


Abbildung 6-21: Haupteffektdiagramm der maximalen Leistungsaufnahme des Lagersystems der APL

Im Wechselwirkungsdiagramm sind die Wechselwirkungen der Faktoren dargestellt. Die Wechselwirkung zwischen der relativen Leistungsgrenze und die Anzahl der Gassen ist am stärksten. Da die relative Leistungsgrenze relativ zur theoretischen maximalen Leistungsaufnahme berechnet wird und die maximale Leistungsaufnahme absolut dargestellt wird, ist der Effekt der Grenze bei 10 Gassen stärker als bei 2 Gassen. Die Zuladung hat eine Wechselwirkung mit der relativen Leistungsgrenze und die Anzahl der Gassen. Bei beiden Wechselwirkungen erhöht sich die maximale Leistungsspitze, da die Zuladung leistungsrelevant ist. Aufgrund des erhöhten Leistungsbedarfs für die Fahrten der RBG erhöht sich auch die relative Grenze für die Leistungsspitze. Der Effekt der Zuladung ist bei einer höheren Grenze und mehr Gassen größer und damit ist die maximale Leistungsaufnahme höher. Bei einer niedrigeren relativen Leistungsgrenze ergeben sich bei einer Zwischenkreiskopplung höhere Leistungsspitzen als bei einer Energierückspeisung. Dieser Effekt kann nicht nachvollzogen werden. Die Wechselwirkung der relativen Leistungsgrenze und der Achssteuerung sagt aus, dass die Achssteuerung bei einer höheren Grenze einen größeren Einfluss auf den maximalen Leistungsbedarf des Lagersystems hat. Dieser ist bei der einfachen Achssteuerung höher als bei der erweiterten. Mit der erweiterten Achssteuerung wird die Geschwindigkeit der schnelleren Achse optimiert, wodurch sich eine maximale Beschleunigung des Fahrwerks und ein Heben bei maximaler Geschwindigkeit seltener überlagern. Die Achssteuerung steht auch in Wechselwirkung mit der Anzahl der Gassen und der Zuladung. Bei zunehmender Anzahl der Gassen und Zuladung erhöht sich der Effekte der Achssteuerung. Die Achssteuerung reduziert die maximale Leistungsaufnahme der Fahrten. Der Effekt der Achssteuerung ist stärker bei einer höheren Zuladung und einer größeren Gassenanzahl.

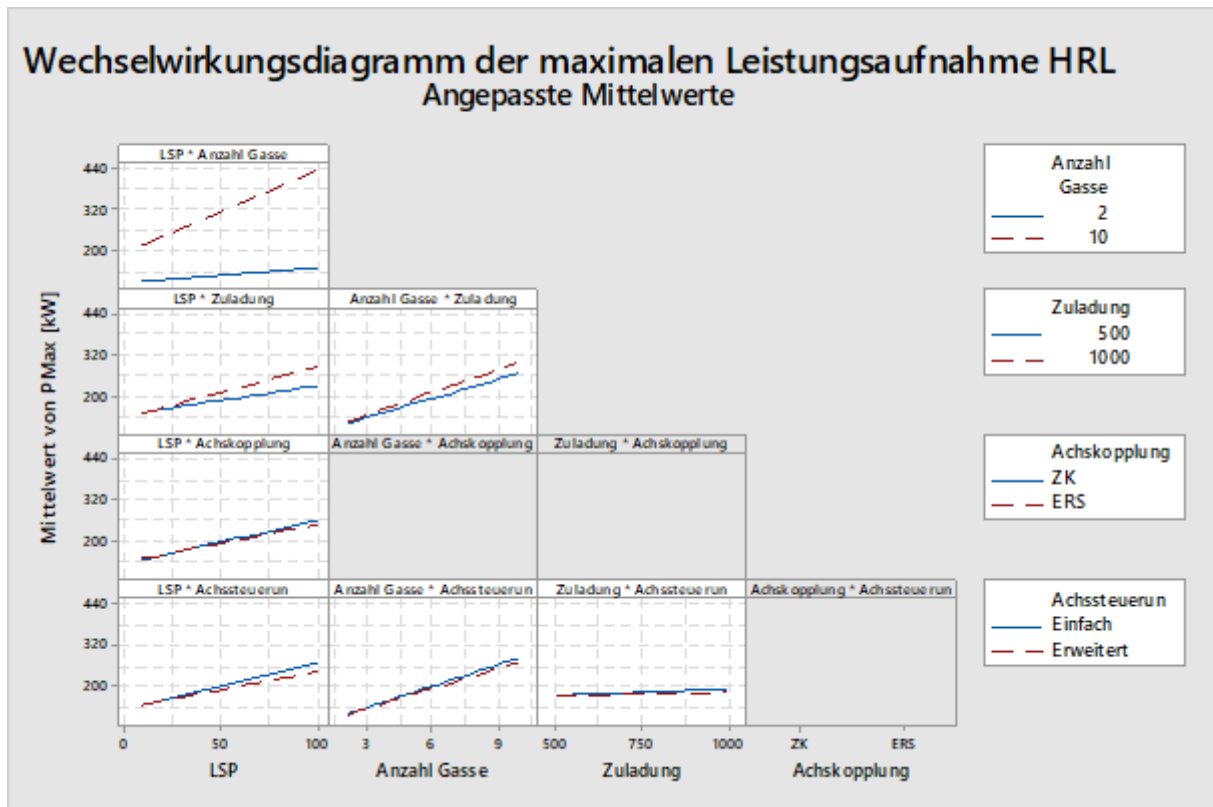


Abbildung 6-22: Wechselwirkungsdiagramm der maximalen Leistungsaufnahme des Lagersystems der APL

Das Haupteffektendiagramm des Leistungsmittelwerts für das Lagersystem ist in Abbildung 6-23 dargestellt. Die größten Effekte kommen von der relativen Lastganggrenze und von der Anzahl der Gassen. Der Effekt der Lastganggrenze ist positiv, wodurch der Leistungsmittelwert mit steigender relativer Lastganggrenze steigt. Die Grenze gibt an, welcher relative Leistungsmittelwert freigegeben ist relativ zu dem maximalen Leistungsmittelwert des Lagersystems ohne Lastmanagement. Die Begrenzung erklärt den starken Effekt. Der Effekt der Anzahl der Gassen ist positiv und der Leistungsmittelwert des Lagersystems steigt mit steigender Anzahl an Gassen. Da der absolute Leistungsmittelwert nicht relativ zur Anzahl der Gassen ist, steigt dieser proportional an. Die Leistungsspitze wirkt sich nicht auf den Leistungsmittelwert aus, was nachvollziehbar ist, da diese die Teilaufträge ausschließlich kurzfristig verzögert. Die Zuladung hat einen positiven Effekt auf den Leistungsmittelwert. Dieser steigt mit zunehmender Zuladung an. Dieser Effekt ist nachvollziehbar, da mehr Energie bei einer höheren Zuladung benötigt wird und somit der Leistungsmittelwert steigt. Der Effekt der Achskopplung auf den Leistungsmittelwert ist negativ bei einem Wechsel von einer Zwischenkreiskopplung zu einer Energierückspeisung, der Leistungsmittelwert wird reduziert. Das ist nachvollziehbar, da mit der Energierückspeisung die potentielle Energie beim Senken bzw. die Bremsenergie des Fahrwerks zurückgewonnen werden. Der Effekt der Achssteuerung ist negativ und der Leistungsmittelwert wird bei einem Wechsel von einfacher zu erweiterter Achssteuerung reduziert. Da durch die optimierten

Fahrbahnplanungen der Energiebedarf von vielen Fahrten reduziert wird, wird der Energiebedarf und somit der Leistungsmittelwert des Lagersystems reduziert. Die Zuladung, die Achskopplung und die Achssteuerung wirken sich nicht auf die Durchsatzleistung aus.

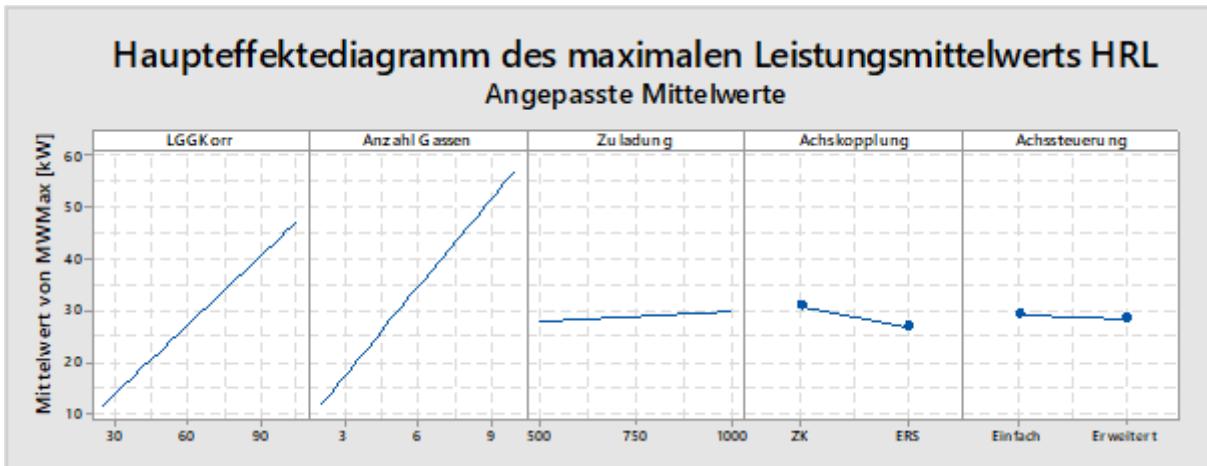


Abbildung 6-23: Haupteffektediagramm des Leistungsmittelwerts des Lagersystems der APL

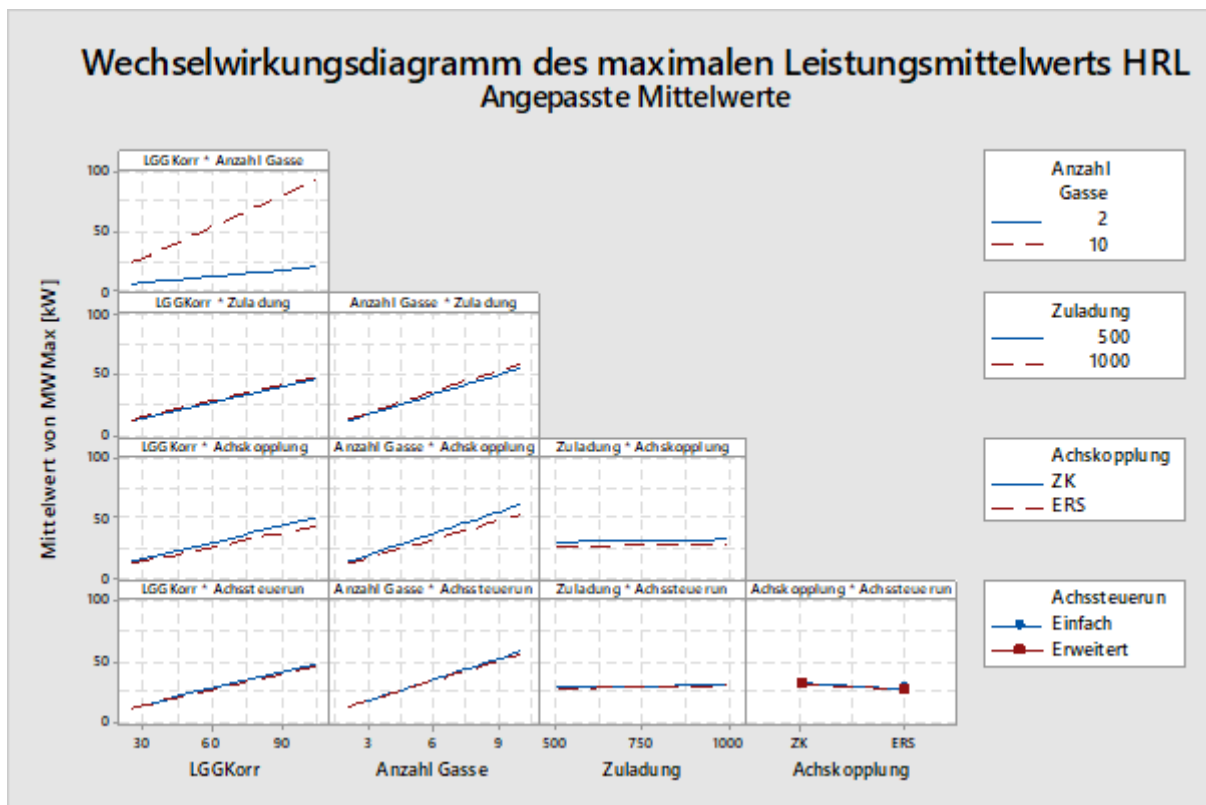


Abbildung 6-24: Wechselwirkungsdiagramm des Leistungsmittelwerts des Lagersystems APL

Das Wechselwirkungsdiagramm der Leistungsmittelwerte der APL-Lagersysteme der Hauptuntersuchung ist in Abbildung 6-24 dargestellt. Eine Wechselwirkung besteht zwischen der relativen Lastganggrenze und der Anzahl der Gassen. Der Effekt der

Lastganggrenze auf den maximalen Leistungsmittelwert ist bei 10 Gassen sehr viel größer als bei 2 Gassen. Diese Wechselwirkung besteht, da der maximale Leistungsmittelwert bei 10 Gassen größer und damit die dazu relative Lastganggrenze sich stärker auswirkt als bei 2 Gassen. Weitere Wechselwirkungen bestehen zwischen der Lastganggrenze und der Zuladung, der Achskopplung und der Achssteuerung. Alle diese Effekte sind auf die unterschiedlichen mittleren Leistungsbedarfe der Referenzszenarien zurückzuführen. Der mittlere Leistungsbedarf bei höherer Zuladung, bei Zwischenkreiskopplung und bei der einfachen Achssteuerung ist höher als das jeweilige Pendant. Dieser Unterschied wirkt sich auf die absoluten Grenzwerte der relativen Lastganggrenzen aus. Der Unterschied zwischen den absoluten Grenzwerten ist bei einer höheren Lastganggrenze größer und somit entsteht die Wechselwirkung. Das ist auch der Hintergrund bei den Wechselwirkungen zwischen der Anzahl der Gassen und der Zuladung, der Achskopplung und der Achssteuerung. Die weiteren Wechselwirkungen weisen kleine Effekte auf und werden nicht weiter beschrieben.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Regressionsanalyse der Hauptuntersuchung der APL dokumentiert. Bei der Analyse wurde die Beziehung zwischen den Faktoren Grenze für die Leistungsspitze, Lastganggrenze, Gassenanzahl, Zuladung, Achskopplung und Achssteuerung und der Zielgröße relative Durchsatzleistung untersucht. Im ersten Schritt wurde eine Regressionsanalyse ohne Anpassung des Modells durchgeführt, um die Haupteffekte der Faktoren auf die relative Durchsatzleistung des Lager-systems darzustellen. Im zweiten Schritt wurde eine schrittweise Regressionsanalyse im Statistikprogramm MiniTab durchgeführt. Bei der schrittweisen Regressionsanalyse werden abhängig von ihrem Effekt auf die Zielgröße die Faktoren nacheinander zum Modell hinzugefügt, bis kein Faktor das Aufnahmekriterium mehr erfüllt. Das Aufnahmekriterium ist das Signifikanzniveau α (bei 95 % ist Konfidenzniveau $\alpha = 0,05$). Zusätzlich können noch Faktoren festgelegt werden, die in die Regressionsanalyse aufgenommen werden sollen.

In Abbildung 6-25 ist das Haupteffektediagramm aller Faktoren für die relative Durchsatzleistung abgebildet. Den größten Effekt auf die relative Durchsatzleistung hat die relative Lastganggrenze. Diese hat einen positiven Effekt auf die relative Durchsatzleistung, welche bei steigender Grenze ansteigt. Die Lastganggrenze begrenzt den Energiebedarf einer Messperiode (hier: 15 min). Jede Lagerbewegung hat einen Energiebedarf. Damit können bei einer niedrigeren verfügbaren Energiemenge in der Messperiode weniger Lagerbewegungen ausgeführt werden. Ein weiterer Effekt geht von der Gassenanzahl aus: Mit steigender Gassenanzahl sinkt die relative Durchsatzleistung. Der Effekt der Gassenanzahl auf die Durchsatzleistung ist sehr klein und entsteht durch die gegenseitige Verzögerung der Aufträge während der Freigabeanfrage. Wenn eine Anfrage aktiv ist, kann keine weitere Anfrage bearbeitet werden und somit

werden alle anderen Anfragen verzögert. Bei einer höheren Gassenanzahl verstärkt sich dieser Effekt. Alle anderen Faktoren haben keinen signifikanten Effekt auf die relative Durchsatzleistung. Die Ergebnisse der Varianzanalyse und die Regressionskoeffizienten der Haupteffekte sind in der Tabelle 6-27 und Tabelle 6-28 dargestellt. Wie an den p-Werten zu sehen ist, sind die Gassenanzahl und die Lastganggrenze signifikant.

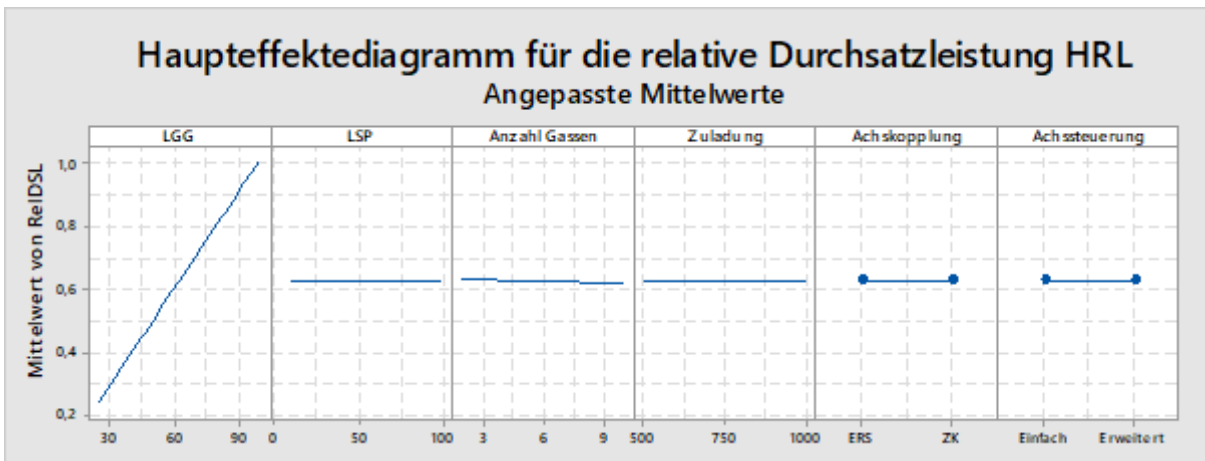


Abbildung 6-25: Haupteffektdiagramm aller Faktoren der Hauptuntersuchung für die relative Durchsatzleistung der APL

Tabelle 6-27: Ergebnisse der Varianzanalyse der Hauptuntersuchung der APL mit allen Haupteffekten ($S = 2,7\%$; $R^2 = 99,12\%$; $R^2_{adj} = 99,11\%$)

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert
Regression	6	41,803	6,9672	9514,05	0
LGG	1	41,7884	41,7884	57064,43	0
LSP	1	0,0002	0,0002	0,25	0,616
Anzahl Gassen	1	0,014	0,014	19,1	0
Zuladung	1	0,0003	0,0003	0,35	0,557
Achskopplung	1	0,0001	0,0001	0,1	0,75
Achssteuerung	1	0,0001	0,0001	0,1	0,757
Fehler	505	0,3698	0,0007		
Gesamt	511	42,1728			

Tabelle 6-28: Regressionskoeffizienten der Hauptuntersuchung APL mit allen Faktoren

Term	Koef	SE Koef	t-Wert	p-Wert
Konstante	-0,00031	0,00543	-0,06	0,955
LGG	0,010221	0,000043	238,88	0
LSP	0,000016	0,000032	0,5	0,616
Anzahl Gassen	-0,001696	0,000388	-4,37	0
Zuladung	-0,000003	0,000005	-0,59	0,557
Achskopplung				
ERS	-0,00076	0,00239	-0,32	0,75
Achssteuerung				
Erweitert	-0,00074	0,00239	-0,31	0,757

Die Ergebnisse der schrittweisen Regressionsanalyse werden nachfolgend beschrieben. Bei der schrittweisen Regressionsanalyse sind Terme aufgenommen worden, die ein Signifikanzniveau von $\alpha = 10\%$ aufweisen. Dabei wurden Faktor-Terme und 2-Faktor-Wechselwirkungsterme berücksichtigt. Die Ergebnisse der Varianzanalyse der schrittweisen Regressionsanalyse sind in der Tabelle 6-29 dargestellt. Verblieben sind die Faktoren relative Lastganggrenze und die Anzahl der Gassen.

Tabelle 6-29: Varianzanalyse der schrittweisen Regressionsanalyse APL

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert
Regression	3	41,8026	13,9342	19120,39	0
LGG	1	41,7884	41,7884	57341,73	0
LSP	1	0,0002	0,0002	0,25	0,615
Anzahl Gassen	1	0,014	0,014	19,2	0
Fehler	508	0,3702	0,0007		
Gesamt	511	42,1728			

Aus der schrittweisen Regressionsanalyse hat sich mit den Koeffizienten aus Tabelle 6-30 die folgende Regressionsgleichung für die relative Durchsatzleistung ergeben:

$$\begin{aligned} RelDSL = & -0,00317 + 0,010221LGG + 0,000016LSP \\ & - 0,001696AnzahlGassen \end{aligned} \quad (6-40)$$

Tabelle 6-30: Koeffizienten für die Regressionsgleichung der APL aus der schrittweisen Regression

Term	Koef	SE Koef	t-Wert	p-Wert
Konstante	-0,00317	0,0037	-0,86	0,392
LGG	0,010221	0,000043	239,46	0
LSP	0,000016	0,000032	0,5	0,615
Anzahl Gassen	-0,001696	0,000387	-4,38	0

Zur Bewertung der Güte ist die Zusammenfassung der Anpassung der schrittweisen Regression in Tabelle 6-31 dargestellt. Die Standardabweichung S der Antwortvariablen relative Durchsatzleistung $RelDSL$ beträgt 2,7%. Das Bestimmtheitsmaß R^2 (R-Qd) gibt an, dass 99,12% der Streuung der relativen Durchsatzleistung vom Modell erklärt werden können. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß R_{korr}^2 (R-Qd(kor)) ist für das Modell 99,12%.

Tabelle 6-31: Zusammenfassung der Anpassung der schrittweisen Regression der APL

S	R-Qd	R-Qd(kor)	R-Qd(prog)
0,0269956	99,12%	99,12%	99,11%

Die Residuendiagramme werden bei einer Regressionsanalyse von Minitab erzeugt und dienen zusätzlich der Bewertung des Modells (siehe Abbildung 6-26). Im Wahrscheinlichkeitsnetz für Normalverteilung sollten die Punkte auf einer Geraden liegen, um die Normalverteilung nachzuweisen. Die Punkte weichen im unteren Bereich von der Linie ab. In der Darstellung „Residuen vs. Anpassung“ wird die Größe der Residuen über der relativen Lastganggrenze dargestellt. Diese sollten im Idealfall gleichverteilt ober- und unterhalb der Nulllinie liegen. In diesem Fall liegt die ermittelte Regressionsgerade für die relative Durchsatzleistung bei einer Lastganggrenze von 25 % oberhalb der Simulationsergebnisse, bei 50 % und 75 % unterhalb und bei 100 % wieder oberhalb der Regressionsgeraden. Das deutet auf eine Krümmung der Ergebnisse und eine ungenaue Anpassung hin. Dies äußert sich auch im Histogramm und in der Darstellung der Residuen über der Reihenfolge. Im Histogramm sind die Häufigkeiten nicht normalverteilt. In der Darstellung der Residuen über der Reihenfolge ist klar ein Muster zu erkennen. Dieses deutet auch auf eine Krümmung der Ergebnisse hin. Der Versuchsplan wird systematisch durchlaufen und die Lastganggrenze wird schrittweise für die jeweilige Gassenanzahl erhöht. Das Muster in der Darstellung „Residuen vs. Reihenfolge“ entsteht durch diese Reihenfolge und die oben beschriebenen Abweichungen auf den jeweiligen Faktorstufen. Das Histogramm deutet nicht auf eine Normalverteilung hin, aufgrund der großen Zahl an Beobachtungen sind die Signifikanztests trotzdem gültig [Bac-2016, S. 111].

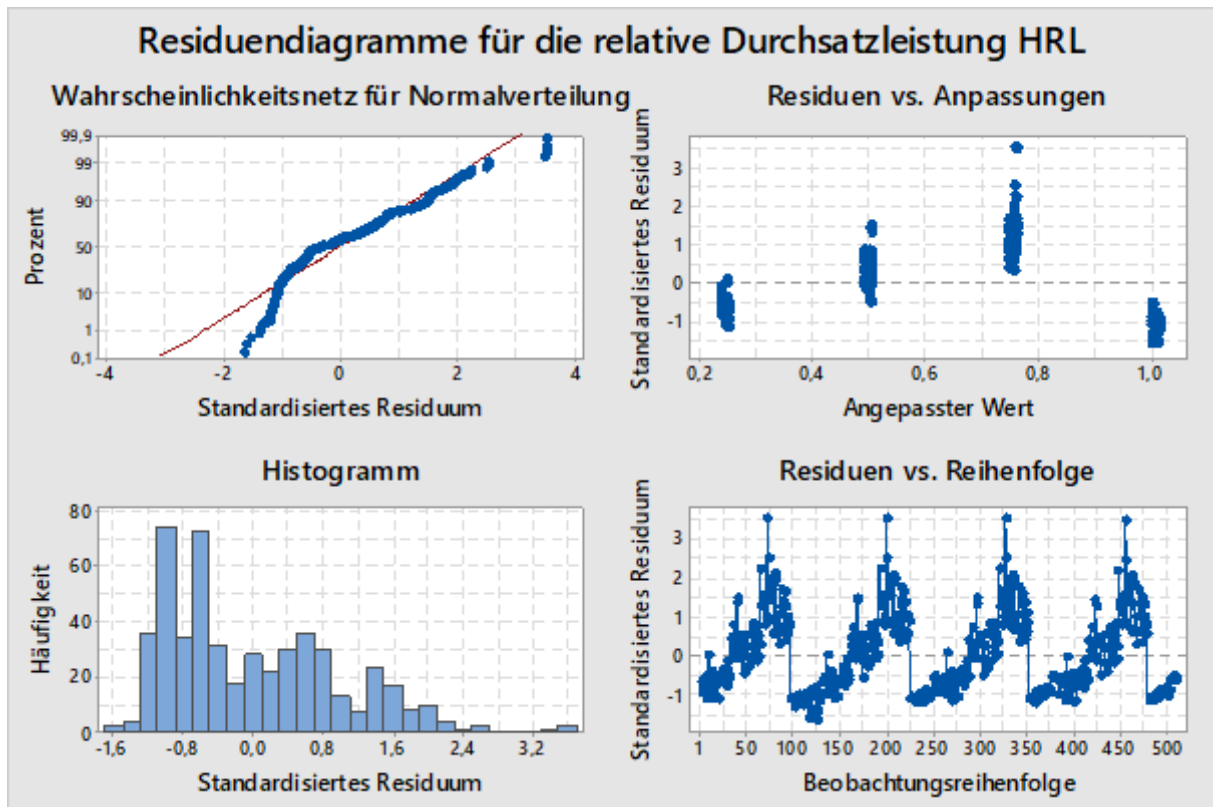


Abbildung 6-26: Residuendiagramme des linearen Regressionsmodells der Hauptuntersuchung der APL

Der Einfluss der Grenze für die maximale Leistungsaufnahme auf die relative Durchsatzleistung ist nicht signifikant. Die relative Auswirkung der relativen Lastganggrenze des Lastmanagements kann somit aus dem maximalen Leistungsmittelwert mit der Anzahl der Gassen und der relativen Lastganggrenze berechnet werden. Aus dem maximalen Leistungsmittelwert und dem gewünschten Leistungsmittelwert wird die relative Lastganggrenze berechnet. Mit dieser und der Anzahl der Gassen wird die relative Durchsatzleistung der APL berechnet. Der Einfluss der Grenze für die maximale Leistungsaufnahme beschränkt sich auf die Reduzierung der Durchsatzleistung durch das Lastmanagement.

Um die Regressionsgerade besser an die Krümmung der Ergebnisse anzupassen, sind bei den folgenden Ergebnissen der Regressionsanalyse ein quadratisches und ein kubisches Polynom eingefügt worden. Die Ergebnisse der Varianzanalyse der schrittweisen Regressionsanalyse mit den quadratischen und kubischen Polynomen sind in der Tabelle 6-32 dargestellt. Der zusätzlich quadratische Term ist „LGG*LGG“, die quadrierte relative Lastganggrenze, und der kubische Term ist „LGG*LGG*LGG“, die relative Lastganggrenze in der dritten Potenz.

Tabelle 6-32: Ergebnisse der Varianzanalyse der schrittweisen Regressionsanalyse mit den zusätzlichen Polynomen für die APL

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert
Regression	5	42,0989	8,41979	57692,94	0
LGG	1	0,0103	0,01028	70,44	0
LSP	1	0,0002	0,00018	1,26	0,261
Anzahl Gassen	1	0,014	0,01399	95,86	0
LGG*LGG	1	0,0335	0,03353	229,75	0
LGG*LGG*LGG	1	0,052	0,05201	356,37	0
Fehler	506	0,0738	0,00015		
Gesamt	511	42,1728			

Gleichung (6-41) ist mit der schrittweisen Regressionsanalyse ermittelt und ist die Regressionsgleichung mit zusätzlichen Polynomen und den Koeffizienten aus Tabelle 6-33:

$$\begin{aligned}
 RelDSL = & 0,04536 + 0,004554LGG + 0,000016LSP & (6-41) \\
 & - 0,001696AnzahlGassen + 0,000145LGG * LGG \\
 & - 0,000001LGG * LGG * LGG
 \end{aligned}$$

Tabelle 6-33: Koeffizienten für die Regressionsgleichung mit den zusätzlichen Polynomen der APL aus der schrittweisen Regression

Term	Koef	SE Koef	t-Wert	p-Wert
Konstante	0,04536	0,00893	5,08	0
LGG	0,004554	0,000543	8,39	0
LSP	0,000016	0,000014	1,12	0,261
Anzahl Gassen	-0,001696	0,000173	-9,79	0
LGG*LGG	0,000145	0,00001	15,16	0
LGG*LGG*LGG	-0,000001	0	-18,88	0

Die Residuendiagramme der Regressionsanalyse mit den zusätzlichen Polynomen sind in Abbildung 6-27 dargestellt. Im Wahrscheinlichkeitsnetz für Normalverteilung liegen die Punkte besser auf der Linie als in Abbildung 6-26. Im Diagramm Residuen vs. Anpassungen ist der Trend von der Regressionsanalyse ohne Polynome nicht mehr zu erkennen und die Residuen sind größtenteils gleichmäßig um die horizontale Nulllinie verteilt. Das zeigt sich auch im Histogramm, eine gleichmäßige Verteilung der Residuen mit starken Ausreißern bei ca. +5. Diese sind von einer Systemkombination und es werden immer die gleichen Auftragslisten simuliert. Die Simulationen dieser Systemkombination mit einer relativen Lastganggrenze von 75 % hat im Vergleich zu den anderen Systemen mit dieser Lastganggrenze eine hohe Durchsatzleistung. Der

maximale Leistungsmittelwert aus der Referenzsimulation ist sehr hoch, wodurch höhere Lastganggrenzen berechnet werden und eine höhere Durchsatzleistung zulässt. Im Diagramm Residuen vs. Reihenfolge ist das Muster aus Abbildung 6-26 nicht mehr zu erkennen. Das Regressionsmodell mit den Polynomen ist somit exakter, was auch die Zusammenfassung des Modells in Tabelle 6-34 widerspiegelt. Mit der Erweiterung sinkt die Standardabweichung auf 1,2 % und das Bestimmtheitsmaß gibt an, dass 99,82% der Streuung der relativen Durchsatzleistung vom Modell erklärt werden können. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß R^2_{korrr} (R-Qd(kor)) ist für das Modell 99,82%. Somit verbessern die zusätzlichen Polynome die Aussagekraft des Regressionsmodells.

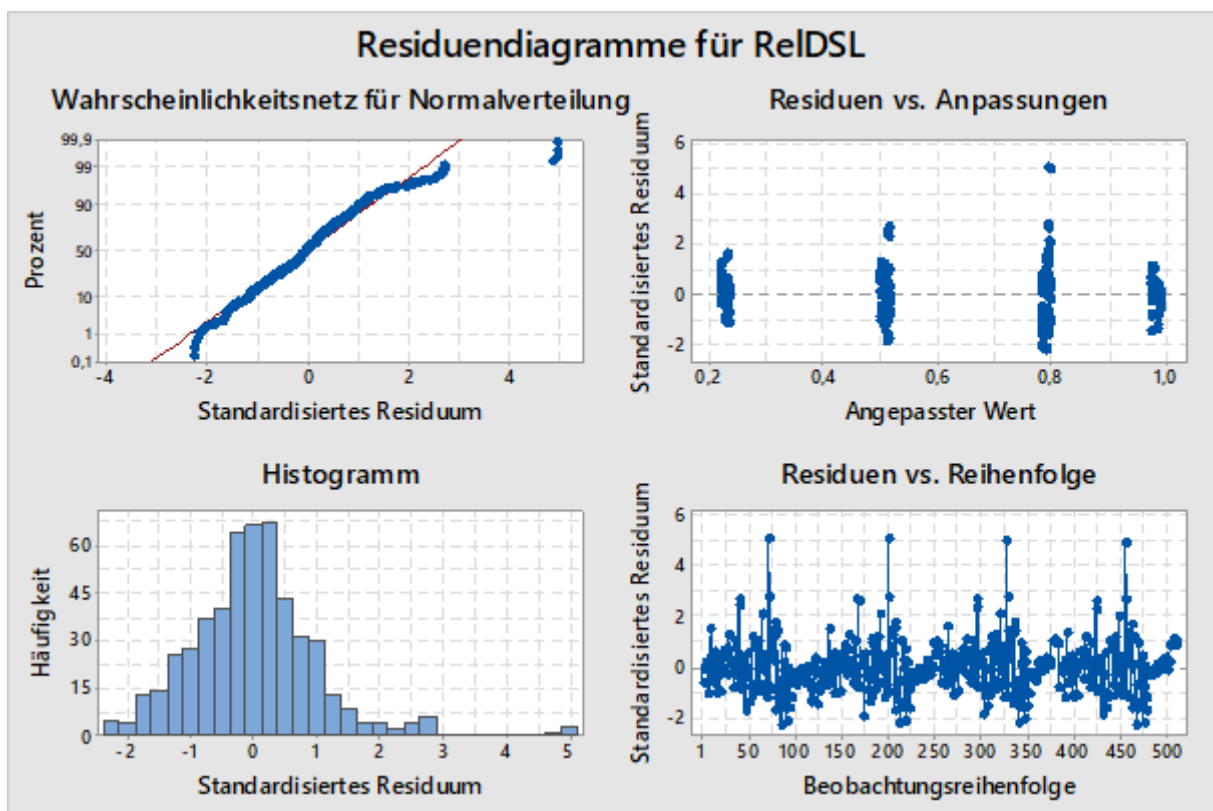


Abbildung 6-27: Residuendiagramme des linearen Regressionsmodells der Hauptuntersuchung mit den zusätzlichen Polynomen der APL

Tabelle 6-34: Zusammenfassung des Regressionsmodells des APL für die relative Durchsatzleistung mit den zusätzlichen Polynomen

S	R-Qd	R-Qd(kor)	R-Qd(prog)
0,0120806	99,82 %	99,82 %	99,82 %

6.5 Abschließende Bewertung der Auswirkungen des Lastmanagements

Auf Basis der umfangreichen statistischen Untersuchungen auf Grundlage des erstellten und validierten Simulationsmodells können die aus dem Stand der Forschung abgeleiteten Forschungsfragen (vgl. Abschnitt 2.4.1) beantwortet werden:

1. *Forschungsleitende Fragestellung:*

Wie wirken sich die Grenzen für den Leistungsmittelwert bzw. die Leistungsspitze des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung von automatisierten Lagersystemen mit zwei oder mehr parallel angeschlossenen RBG aus?

Der Stand der Forschung zeigt, dass keine Untersuchungen zu dem Einfluss eines Lastmanagements auf die Durchsatzleistung von Lagersystemen mit mehreren parallel arbeitenden RBG existieren. Die Untersuchungen zur intelligenteren Energienutzung stellen einen Optimierungsansatz und eine Funktionsstudie dar. Im Zuge dieser Dissertation ist der Einfluss des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung untersucht worden. Der verwendete Ansatz begrenzt die maximale elektrische Leistungsaufnahme und den Leistungsmittelwert von Lagersystemen, indem energetische Prozesse verzögert werden. Das Lastmanagement darf dabei nicht die logistischen Prozesse des Lagers beeinflussen. Diese sind abhängig von den Strategien des LVS bzw. MFS und hängen stark von den individuellen Materialflussprozessen ab. Um eine allgemeingültige Referenz in diesem neuen Themengebiet zu schaffen, die eine grundsätzliche Antwort darstellt, ist auf zusätzliche Strategien verzichtet worden. Das Lastmanagement prüft die Teilaufträge der RBG anhand der Summe der Leistungsvorausage der gesamten Anlage und der des Teilauftrags. Bei einer Verletzung einer der Grenzen wird der Teilauftrag nicht freigegeben und geprüft, bis die Freigabe erteilt werden kann. Die Anfragen der anderen RBG müssen währenddessen warten.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Lastmanagement die maximale Leistungsaufnahme und den Leistungsmittelwert des Lagersystems zuverlässig begrenzt. Die relative Leistungsgrenze beeinflusst die Durchsatzleistung minimal. Sie reduziert diese ausschließlich, wenn das Lagersystem volle Durchsatzleistung erbringt. Die Verzögerungen aufgrund der Leistungsspitze sind kurz und damit die Reduzierung der Durchsatzleistung gering. Bei einer niedrigeren Durchsatzleistung verringert eine Verzögerung aufgrund einer Leistungsspitzenverletzung die Durchsatzleistung nicht. Die Grenze für Lastgangspitze hat nach der Simulationsuntersuchung in Kapitel 6.4 keine Signifikanz. Die Leistungsspitze kann somit auf einen Wert von 110 % der maximalen Leistung der einzelnen Fahrten ohne Durchsatzleistungseinbußen reduziert werden.

Die Lastganggrenze hat einen sehr starken Effekt auf die Durchsatzleistung des Lagersystems. Die Lastganggrenze berechnet sich aus dem maximalen Leistungsmittelwert des Lagersystems ohne Lastmanagement bei maximaler Systemleistung. Reduziert das Lastmanagement diesen auf 20 %, reduziert sich die Durchsatzleistung im Mittel um ca. 75 %.

2. Forschungsfrage:

Welche Einflussfaktoren und Verhaltensweisen wirken sich auf den Energiebedarf und die Durchsatzleistung des RBG aus, und wie lassen sie sich beschreiben?

Die Systemanalyse Kapitel 3.2 legt die Grundlage für das Verständnis der Arbeitsweise und den Energiebedarf von Lagersystemen. Es beschreibt die Funktionen und Verhaltensweisen mit Einfluss auf die Durchsatzleistung und den Energiebedarf des Lagersystems. Die parallele Arbeitsweise, die Bahnplanung und die Auftragsabwicklung beeinflussen neben den RBG-Parametern und den Lagerabmessungen die Durchsatzleistung; die Achssteuerung, die Auftragsabwicklung, das Bremsenverhalten und die Energieversorgung dessen Energiebedarf. Kapitel 3.2.4 beschreibt die Arbeitsweise und die Funktion des Lastmanagements. Die Bahnplanung berechnet die Fahrkurve der Hauptbewegungsachsen jedes RBG und bestimmt damit den Zeitbedarf, der für die Fahrt zwischen zwei Punkten benötigt wird. Die Auftragsabwicklung verarbeitet die Aufträge aus der Auftragsliste für die RBG und verdichtet Informationen über die durchgeführten Ein- und Auslagerungen. Das Bremsverhalten beeinflusst die Durchsatzleistung, da die Bremsen mit einem Zeitbedarf geöffnet werden müssen, bevor ein Auftrag durchgeführt werden kann, und den Energiebedarf des RBG im geschlossenen Zustand reduzieren. Die Bahnplanung reduziert den Energiebedarf, indem sie die Startzeitpunkte der Achsen und bei der erweiterten Bahnplanung auch die Geschwindigkeit optimiert. Die Energieversorgung beschreibt die Anbindung des Lagersystems an das hausinterne Stromnetz und die interne Verteilung und Wandlung der elektrischen in mechanische Energie. Auf dieser Grundlage wird das am fml der TU München bestehende Simulationsmodell analysiert und erweitert.

Das Simulationsmodell des Lehrstuhls fml dient als Grundlage für diese Simulationsuntersuchung und ist im Verlauf dieses Dissertationsvorhabens erweitert worden. Es berechnet den Energiebedarf eines RBG im Betrieb. Es bildet das Verhalten des RBG in Stillstandphasen nicht ab. Es simuliert die Fahrten einer Auftragsliste sequenziell und berechnet für alle Achskopplungen den Energiebedarf des RBG. Der Lastzyklus ist als konstanter Energiebedarf modelliert. Die Zuladung hat dabei keinen Einfluss.

Ertl fokussiert sich auf den Energiebedarf des RBG bei unterschiedlichen RBG-Parametern, den Leistungsverlauf hat er zur Evaluierung abgebildet [Ert-2016]. Zur Begrenzung der maximalen Leistungsaufnahme ist diese abzubilden. Das Simulationsmodell ist im Zuge der vorliegenden Dissertation um die Steuerungsfunktionen erweitert worden. Das entwickelte Modell ist in Kapitel 3.3 im Konzept- bzw. Ebenenmodell dargestellt. Die grundlegenden Änderungen sind das Lastmanagement auf der Administrationsebene und dessen Einbindung in die Auftragsabwicklung, die Auftragsabwicklung auf der Dispositionsebene und die Bremsen- sowie Achssteuerung auf der Steuerungsebene. Die zusätzlichen Funktionen sind im Kapitel 3.5 formalisiert. Die Steuerungsfunktionen sind diskrete Systeme und werden mit Zustandsautomaten abgebildet. Diese ändern abhängig von den Eingangsgrößen ihren Zustand und damit die Ausgangsgrößen. Die Implementierung des Modells und der Steuerungsfunktionen ist in Kapitel 4 beschrieben.

3. *Forschungsfrage:*

Welchen Einfluss haben die Geräteart, die Zuladung, die Dynamikparameter und die Lagerstrategien bei der Verwendung des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung des automatischen Lagers?

Kapitel 6.2 plant die Simulationsexperimente. Es legt die Zielgrößen fest und ermittelt alle möglichen Einflussfaktoren sowie deren Wertebereiche. Die Zielgröße ist die relative Durchsatzleistung. Für beide RBG-Typen sind 9 Faktoren identifiziert worden. Die Voruntersuchung untersucht anhand eines Screening-Versuchsplans die Effekte der Einflussgrößen mit einer Varianzanalyse. Die ausreichend großen signifikanten Effekte der AKL sind:

- Anzahl Gassen
- Relative Leistungsgrenze (LSP)
- Relative Lastganggrenze (LGG)
- Achskopplung
- Regaldimension (Regal)

Und der APL sind:

- Anzahl Gassen
- Relative Leistungsgrenze (LSP)
- Relative Lastganggrenze (LGG)
- Zuladung

- Achskopplung
- Achssteuerung

Der Haupteinflussfaktor auf die relative Durchsatzleistung der Lagersystems ist die relative Lastganggrenze. Diese reduziert nahezu proportional die relative Durchsatzleistung des Lagersystems. Der zweitgrößte Effekt ist jener der Gassenanzahl. Mit steigender Gassenanzahl wird die Durchsatzleistung reduziert. Die relative Leistungsgrenze hat keinen signifikanten Effekt auf die relative Durchsatzleistung. Trotzdem wird diese Einflussgröße in der Hauptuntersuchung variiert, da es sich um eine Grenze des Lastmanagements handelt. Diese Ergebnisse sind für AKL in Abbildung 6-28 und für APL in Abbildung 6-29 dargestellt.

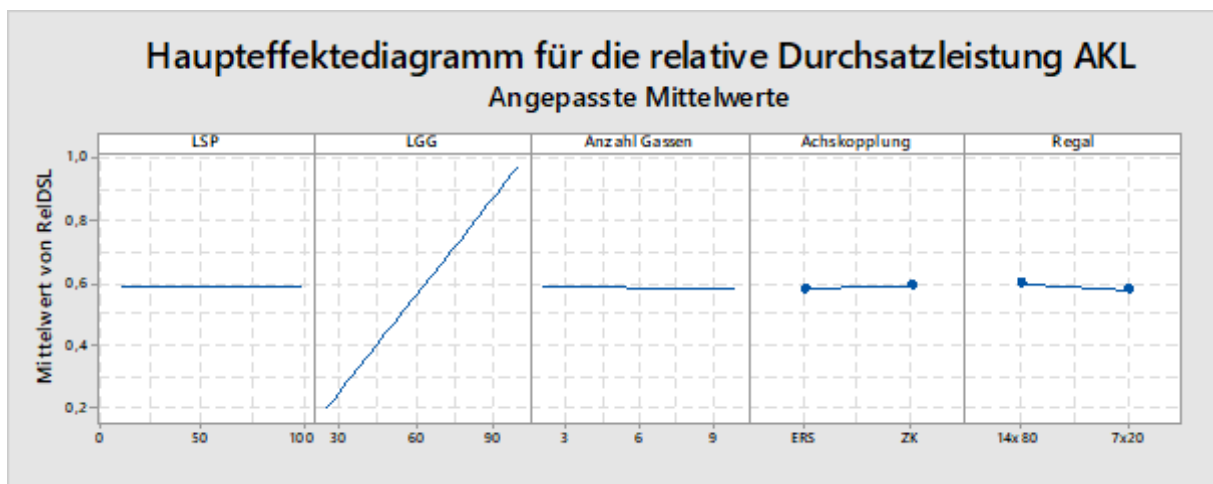


Abbildung 6-28: Haupteffektediagramm der Hauptuntersuchung der AKL

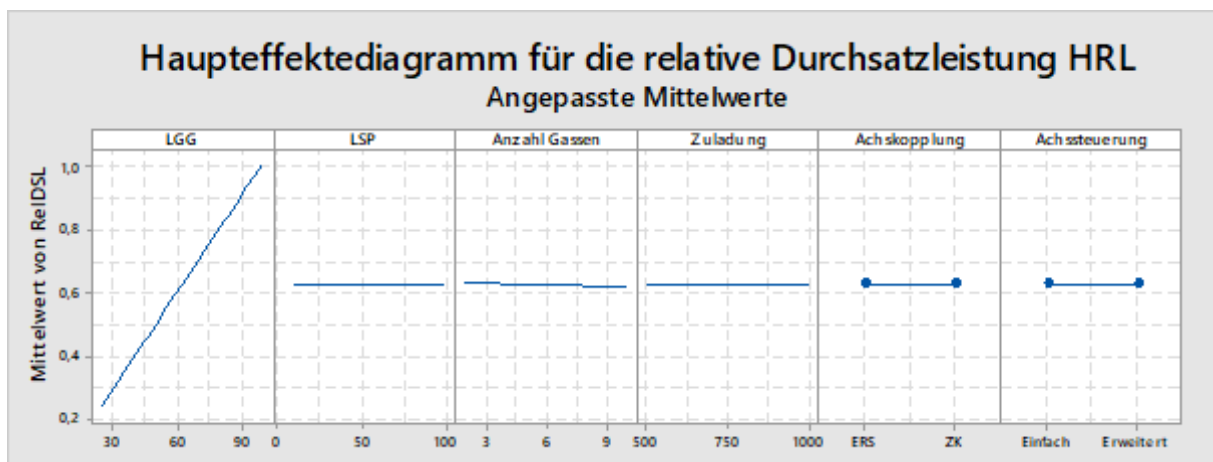


Abbildung 6-29: Haupteffektediagramm der Hauptuntersuchung der APL

Diese Faktoren werden anschließend in der Hauptuntersuchung auf deren Effekt sowie deren Wechselwirkungen auf die relative Durchsatzleistung untersucht. Die anderen Faktoren haben teilweise einen großen signifikanten Effekt auf den Energiebedarf

und die Durchsatzleistung, aber keinen auf das vergleichbare System ohne Lastmanagement und somit auf die relative Durchsatzleistung beim Einsatz des Lastmanagements. Somit ist die Forschungsfrage nach den Faktoren mit einem Einfluss auf die Durchsatzleistung unter Verwendung eines Lastmanagements beantwortet.

4. *Forschungsfrage:*

Wie lässt sich der Einfluss des elektrischen Lastmanagements auf die Durchsatzleistung des Lagersystems mit Hilfe einer Berechnungsformel ohne eine aufwändige Untersuchung berechnen?

Kapitel 6.4 untersucht detailliert die Effekte der verbleibenden Einflussfaktoren mit einem vollfaktoriellen Versuchsplan. Die AKL und die APL werden aufgrund unterschiedlicher signifikanter Einflussfaktoren getrennt voneinander untersucht. Regressionsanalysen ermitteln die signifikanten Effekte und Wechselwirkungen auf die relative Durchsatzleistung. Schrittweise Regressionsanalysen ermitteln anschließend die signifikanten Faktoren und deren Regressionskoeffizienten für die lineare Regressionsgleichung. Die Residuendiagramme deuten auf eine Krümmung der Ergebnisse hin, weshalb Polynome höheren Grades zu den Regressionsgleichungen hinzugefügt wurden. Diese verbessern das Ergebnis bei den AKL und APL. Die Regressionsgleichungen für die AKL sind abhängig von der Regalgröße und der Achskopplung der RBG. Die relative Durchsatzleistung berechnet sich nach den Gleichungen (6-36), (6-37), (6-38) und (6-39) bei Energierückspeisung und einem Regal der Größe 14x80 zu:

$$\begin{aligned} \text{RelDSL} = & -0,0115 + 0,006340LGG - 0,001254\text{AnzahlGassen} \\ & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned}$$

Bei Energierückspeisung und einem Regal der Größe 7x20:

$$\begin{aligned} \text{RelDSL} = & -0,0313 + 0,006340LGG - 0,001254\text{AnzahlGassen} \\ & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned}$$

Bei Zwischenkreiskopplung und einem Regal der Größe 14x80:

$$\begin{aligned} \text{RelDSL} = & -0,0037 + 0,006340LGG - 0,001254\text{AnzahlGassen} \\ & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned}$$

Bei Zwischenkreiskopplung und einem Regal der Größe 7x20:

$$\begin{aligned} RelDSL = & -0,0235 + 0,006340LGG - 0,001254AnzahlGassen \\ & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned}$$

Die relative Durchsatzleistung der APL ist abhängig von der Anzahl der Gassen und der relativen Lastganggrenze und berechnet sich nach der Gleichung (6-41) zu:

$$\begin{aligned} RelDSL = & 0,04536 + 0,004554LGG + 0,000016LSP & (6-42) \\ & - 0,001696AnzahlGassen + 0,000145LGG * LGG \\ & - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned}$$

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich die Durchsatzleistung nahezu proportional mit der relativen Lastganggrenze reduziert. Jede Lagerbewegung benötigt im Mittel einen Betrag an Energie. Mit einem Herabsetzen der relativen Lastganggrenze steht weniger Energie für diese Periode zu Verfügung, womit weniger Lagerbewegungen in der gleichen Zeit durchgeführt werden können. Die relative Leistungsgrenze hat keinen signifikanten Effekt auf die Durchsatzleistung des Lagersystems. Eine Verzögerung aufgrund dieser Grenze ist notwendig, wenn sich hohe Leistungsbedarfe mehrerer RBG überlagern, was selten vorkommt. Bei einer Überlagerung ist die Verzögerung größtenteils kurz, da die Überlagerung des maximalen Leistungsbedarfs des Fahrwerks- und Hubwerksantriebs wegen der kurzen Beschleunigungszeit des Fahrwerks über eine kurze Zeitdauer auftritt.

Diese Arbeit quantifiziert mit dem entwickelten Simulationsmodell den Einfluss des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung eines mehrgassigen Lagersystems, das von RBG bedient wird. Das bereits aus einem anderen Forschungsvorhaben existierende Simulationsmodell wurde hierfür unter anderem mit dem geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstand erweitert. Dieser wurde aufgrund eines niedrigeren Antriebsmoments und Leistungsbedarfs in der Beharrungsphase der Fahrbewegung eingefügt. Er hat die Übereinstimmung der Simulation und der Messungen in dieser Phase verbessert. Die Ursachen für diesen Effekt sind nicht ermittelt und basieren evtl. auf lastabhängigen Wirkungsgraden der Komponenten des Antriebsstrangs. Die Ergebnisse für die Leistungsspitze sind aufgrund der in der Simulation höheren Leistungsspitze tendenziell schlechter ausgefallen, womit die Reduzierung der DSL am realen System geringer ausfällt.

Ein weiterer kritischer Punkt resultiert aus der Simulationsschrittweite. Eine kleine Simulationsschrittweite reduziert die Geschwindigkeit der Simulation, womit die Dauer

eines Simulationslaufes steigt. Für die Simulation ist die Simulationsschrittweite auf 0,1 Sekunden festgelegt worden. Die Freigabe benötigt für die Bearbeitung mindestens zwei Simulationsschritte, womit die Durchsatzleistung bei den AKL um durchschnittlich 5 % und bei den APL um durchschnittlich 1,2 % reduziert wird. Die Reduzierung ist bei den AKL wegen der höheren Anzahl an Teilaufträgen und damit Freigabeanfragen im gleichen Zeitraum viel höher. Eine geringere Simulationsschrittweite reduziert diesen Einfluss.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der Globalisierung erhöht der Wettbewerb den Bedarf, die Effizienz der Lieferketten zu erhöhen. Ein Teil dieser Lieferketten sind Intralogistiksysteme, deren innerbetrieblicher Materialfluss, logistische Prozesse und der zugehörige globale Informationsfluss. Betreiber dieser Anlagen fordern eine hohe Logistikleistung zu niedrigen Kosten. Diese beinhalten die Kosten für die Komponenten der Stromversorgung und die leistungsabhängigen Stromkosten selber. Aufgrund eines volatilen Strombedarfs der Intralogistikanlage können diese Kosten ungewollt hoch sein. Insbesondere von Regalbediengeräten bediente Lagersysteme weisen aufgrund der zahlreichen Beschleunigungs-, Verzögerungs-, Hebe- und Senkvorgänge mit großen Lasten einen sehr volatilen elektrischen Leistungsbedarf auf, womit die elektrischen Leistungen zur Auslegung der Komponenten teilweise sehr hoch sind. Da die Leistung aber nicht aktiv begrenzt wird, führt eine kleinere Auslegung im schlimmsten Fall zu einer Überlastung und einem Anlagenausfall. Dieser ist zu vermeiden, da die damit verbundenen Folgekosten schnell die Kosten der Stromversorgungskomponenten bei weitem übersteigen. Ohne das Risiko eines Anlagenausfalls zu erhöhen, muss zur kleineren Dimensionierung der Stromversorgungskomponenten der maximale elektrische Leistungsbedarf des Logistiksystems aktiv begrenzt werden. Die leistungsabhängigen Stromkosten werden mit dem in dem vertraglich festgelegten Abrechnungszeitraum maximalen Leistungsmittelwert bestimmt. Dieser kann aufgrund einer starken Einlagerlast kurzfristig sehr hoch sein und damit die Stromkosten unnötig erhöhen. Zur Begrenzung des maximalen Leistungsbedarfs und des maximalen Leistungsmittelwerts eignet sich ein elektrisches Lastmanagement, das durch zeitliche Verschiebung von Teilaufträgen den maximalen Leistungsbedarf und Leistungsmittelwert des Lagersystems begrenzt. Diese Verschiebung wirkt sich auf die Durchsatzleistung des Lagersystems aus, welche von zentraler Bedeutung für die Betreiber solcher Systeme ist. Die Akzeptanz des Lastmanagements hängt somit von seinem Einfluss auf die Durchsatzleistung ab.

Der Abschnitt „Stand der Technik“ hat die gängigen Bauformen, die Steuerungsstrategien, die Durchsatzleistungsermittlung und die Einbindung in die IT-Infrastruktur von mehrgassigen Lagersystemen mit automatisierten RBG sowie die energietechnischen Grundlagen zum Netzanschlussschreiben, zum Lastmanagement, zu den Stromkosten und zur Auslegung von Transformatoren erarbeitet. Der Abschnitt „Stand der Forschung“ hat die Energiebedarfsermittlung von Lagersystemen, die Spielzeitermittlung und Durchsatzleistungsberechnung, Lastmanagement und den Einfluss des Lastmanagements auf die Durchsatzleistung des Lagersystems untersucht. Auf Grundlage dessen wurde die Forschungslücke identifiziert, die Forschungsfragen formuliert und der methodische Ansatz zur Beantwortung der Forschungsfragen beschrieben. Bisher

wurde der Einfluss eines elektrischen Lastmanagements auf die Durchsatzleistung eines mehrgassigen Lagersystems, das von vollautomatisierten RBG bedient wird, nicht quantifiziert. Diese Forschungslücke wurde mit der vorliegenden Dissertation geschlossen.

Die Systemanalyse und Konzipierung des Lastmanagements und des Simulationsmodells hat einleitend die Aufgabe definiert. Mittels Systemanalyse wurden die Auftragsbelastung, die Steuerungsfunktionen des RBG wie die Bahnplanung und die Bremsensteuerung, die Energieversorgung des RBG und das Lastmanagement analysiert und anschließend abstrahiert. Der Fokus lag bei der Analyse auf den Funktionen und Prozessen, die den Energiebedarf und/oder die Durchsatzleistung beeinflussen. Basierend darauf wurde ein Konzeptmodell anhand des Strukturmodells einer Fabrik erarbeitet und die Komponenten und Funktionen auf die vier Ebenen aufgeteilt. Anschließend wurde die Ablaufstruktur des Simulationsmodells mit der internen und der externen Ablauflogik definiert. Abschließend wurden die Funktionen der Komponenten und Prozesse des Simulationsmodells, die einfache und die erweiterte Achssteuerung, die Lastmanagement-Freigaben, die Erweiterungen der Leistungsberechnung und die Leistungsberechnung der RBG-Fahrten formalisiert.

Basierend auf der Systemanalyse und Konzipierung des Lastmanagements und des Simulationsmodells wurde das Simulationsmodell mit dem Lastmanagement in der Simulationsumgebung MatLab Simulink implementiert. Zustandsabhängige Subsysteme wie das Lastmanagement, die Auftragsabwicklung, die Berechnung der optimierten Geschwindigkeit für die erweiterte Achssteuerung und die Bremsensteuerung wurden in Zustandsautomaten mit Matlab Simulink Stateflow umgesetzt. Diese wechseln abhängig von den Eingangssignalen den Zustand und führen Funktionen aus. Zusätzlich wurden die LAM-Leistung und der mitfahrende und der stationäre Schaltschrank mit den neuen Berechnungen und Funktionen implementiert.

Die Verifikation und Validierung des Simulationsmodells hat die korrekte Transponierung des Lagersystems in Wechselwirkung mit dem Lastmanagement in die Simulationsumgebung geprüft. Im Fokus stand, dass das Simulationsmodell die Funktionen und die Verhaltensweise der Realität korrekt nachbildet. Nach erfolgreicher Verifikation wurde das Simulationsmodell kalibriert und schrittweise validiert. Die RBG-Parameter wurden mit aufgezeichneten Antriebsmomenten und Leistungsbedarfen der Hauptachsen des RBG kalibriert, um nachfolgend einzelne und kombinierte Fahrten der Achsen des RBG zu validieren. Abschließend wurde mit den Fahraufträgen mehrerer RBG und der Lastgangmessung über eine Woche die Simulation mehrerer Gassen eines Lagersystems validiert. Die maximale prozentuale Abweichung der Leistungsmittelwerte lag

bei 7 % und die mittlere prozentuale Abweichung bei 3 %. Somit hat das Simulationsmodell das reale Lagersystem genau genug nachgebildet, um mit der Simulation fortzufahren. Abschließend wurde das Lastmanagement anhand von Debuggerdaten validiert. Die virtuelle Leistungsvoraussage des Lastmanagementmodells für das Lagersystem wurde mit der simulierten Leistungsvoraussage des Lagersystems verglichen und auf Abweichungen überprüft. Abweichungen sind aufgrund der Bremsen entstanden, da diese in der Simulation teilweise zu einem anderen Zeitpunkt geschlossen wurden als in der virtuellen Leistungsvoraussage. Die Abweichung pro RBG war von sehr kurzer Dauer und unter einem Kilowatt und konnte somit vernachlässigt werden.

Zur Identifikation der Einflussfaktoren wurden die Grundlagen der Versuchsplanung und der Regressionsanalyse erarbeitet. Die Simulationsexperimente wurden analog der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 3 durchgeführt [VDI-3633c]. Die Planung hat im ersten Schritt die Zielgrößen festgelegt, um anschließend die möglichen Einflussgrößen zu ermitteln und deren Auswirkung abzuschätzen. Die primäre Zielgröße ist die relative Durchsatzleistung des Lagersystems. Für die variablen Einflussgrößen wurden die Wertebereiche definiert, mit denen die Screening-Versuchspläne zum Ausgießen der signifikanten Einflussgrößen erstellt wurden. Die signifikanten Einflussgrößen für die Hauptuntersuchung waren somit für die AKL:

- die relative Leistungsgrenze
- die relative Lastganggrenze
- die Anzahl der Gassen
- die Achskopplung
- die Regaldimension

und für die APL:

- die relative Leistungsgrenze
- die relative Lastganggrenze
- die Anzahl der Gassen
- die Zuladung
- die Achskopplung
- die Achssteuerungsstrategie

Mit diesen Faktoren wurde die Hauptuntersuchung geplant und durchgeführt, wobei der Versuchsplan, die Simulationsdauer und die Art der Statistiksammlung festgelegt,

die Modellvarianten umgesetzt und die Simulation durchgeführt wurden. Mit Regressionsanalysen wurden die Versuchsergebnisse des vollfaktoriellen Versuchsplans ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die relative Lastganggrenze den stärksten Effekt auf die relative Durchsatzleistung hat und dass dieser Effekt nahezu proportional zu der relativen Lastganggrenze ist. Bei einer Lastganggrenze von 25 % wurde bei AKL die relative Durchsatzleistung auf ca. 20 % und bei APL auf ca. 24 % reduziert. Anhand der Ergebnisse für den Effekt der relativen Leistungsgrenze konnte die Nullhypothese, dass die relative Leistungsgrenze keinen Einfluss auf die relative Durchsatzleistung hat, nicht widerlegt werden. Neben der Lastganggrenze besteht bei beiden RBG-Typen ein Effekt zwischen der Anzahl der Gassen und der relativen Durchsatzleistung. Mit steigender Gassenanzahl wird die relative Durchsatzleistung reduziert, da eine steigende Gassenanzahl die Wahrscheinlichkeit, dass eine Freigabeanfrage eine weitere Anfrage blockiert, erhöht. Der Effekt ist bei AKL größer als bei APL, da mehr Ein- und Auslagervorgänge in der gleichen Zeit durchgeführt werden und sich damit die Wahrscheinlichkeit einer gegenseitigen Blockierung zusätzlich erhöht. Bei AKL besteht ein weiterer Effekt zwischen der Regalgröße und der relativen Durchsatzleistung. Mit sinkenden Abmessungen wird die relative Durchsatzleistung reduziert, was wiederum durch die steigende Anzahl an Ein- und Auslagervorgängen erklärbar ist. Neben diesen Effekten wurde festgestellt, dass der Zusammenhang zwischen der relativen Lastganggrenze und der relativen Durchsatzleistung nicht linear ist, somit wurden zur Verbesserung der Regressionsgeraden Terme zweiten und dritten Grades für die relative Lastganggrenze zur Regressionsgleichung hinzugefügt. Die relative Durchsatzleistung der AKL berechnet sich nach den Gleichungen (6-36), (6-37), (6-38) und (6-39). Bei Energierückspeisung und einem Regal der Größe 14x80 zu:

$$\begin{aligned} RelDSL = & -0,0115 + 0,006340LGG - 0,001254AnzahlGassen \\ & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned}$$

Bei Energierückspeisung und einem Regal der Größe 7x20:

$$\begin{aligned} RelDSL = & -0,0313 + 0,006340LGG - 0,001254AnzahlGassen \\ & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned}$$

Bei Zwischenkreiskopplung und einem Regal der Größe 14x80:

$$\begin{aligned} RelDSL = & -0,0037 + 0,006340LGG - 0,001254AnzahlGassen \\ & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned}$$

Bei Zwischenkreiskopplung und einem Regal der Größe 7x20:

$$\begin{aligned} RelDSL = & -0,0235 + 0,006340LGG - 0,001254AnzahlGassen \\ & + 0,000104LGG * LGG - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned}$$

Die relative Durchsatzleistung der APL ist abhängig von der Anzahl der Gassen und der relativen Lastganggrenze und berechnet sich nach der Gleichung (6-41) zu:

$$\begin{aligned} RelDSL = & 0,04536 + 0,004554LGG + 0,000016LSP \\ & - 0,001696AnzahlGassen + 0,000145LGG * LGG \\ & - 0,000001LGG * LGG * LGG \end{aligned}$$

Mit diesen Ergebnissen konnten die aufgeworfenen Forschungsfragen beantwortet werden. Das untersuchte Lastmanagement beeinflusst die logistischen Prozesse des LVS nicht und verzögert ausschließlich die Teilaufträge, womit die Ergebnisse sehr konservativ sind und als Referenz für zukünftige Untersuchungen dienen. Mit Strategien für das Lastmanagement können diese Ergebnisse verbessert werden. Diese Strategien könnten zur Erhöhung der Durchsatzleistung bei einer niedrigen Lastganggrenze vorsehen, dass die Reihenfolge der Ein- bzw. Auslageraufträge vertauscht, die Geschwindigkeit reduziert und ein anderes Lagerfach nach energetischen Kriterien ausgewählt wird. Neben den Strategien ist bezüglich der Eignung der Steuerung für ein Lastmanagement zu prüfen, ob bei einer Freigabe die Zeit von der Freigabe bis zur tatsächlichen Ausführung des Teilauftrags variiert. In diesem Fall können bei der Freigabeprüfung für die Grenze der Leistungsspitze Abweichungen entstehen, wodurch die Grenze überschritten wird. Das Simulationsmodell hat Schwachstellen durch den geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstand, der wahrscheinlich durch lastabhängige Wirkungsgrade erklärt werden kann, und die relativ große Simulationsschrittweite. Für die Bearbeitung einer Freigabeanfrage und die Freigabe wird eine feste Anzahl an Simulationsschritten benötigt. Somit entsteht ein Zeitverlust, der abhängig von der Anzahl der Teilaufträge und der Simulationsschrittweite ist.

Abschließend ist eine Begrenzung der Leistungsspitze des Lastmanagements zu empfehlen, da sie die Durchsatzleistung des Lagersystems nicht signifikant reduziert. Mit dieser Grenze wird die Leistungsspitze (maximal aufgenommene Wirkleistung) mit einem Durchsatzleistungsverlust unter 1 % um bis zu 80 % der theoretisch möglichen Leistung reduziert. Zusätzlich wird die Leistung aktiv begrenzt, wodurch Systemausfälle vermieden und die Stromversorgungskomponenten exakter ausgelegt werden. Die Lastganggrenze reduziert abhängig von der Grenze die Durchsatzleistung. Die

Reduzierung kann mit den ermittelten Formeln berechnet werden, wodurch der Betreiber aktiv bestimmen kann, welcher Leistungsmittelwert von dem Lagersystem verwendet werden kann und welche Durchsatzleistungseinbuße daraus resultiert. Zusätzlich kann der Betreiber bei einem entsprechenden Vertrag mit dem EVU auf die Preise an den Spotmärkten reagieren und dadurch die Stromkosten reduzieren. Daneben kann er eventuell an zukünftig entstehenden Regelenergiemärkten mit dem Lastmanagement teilnehmen. Der Einsatz eines elektrischen Lastmanagements ist aus diesen Gründen empfehlenswert.

Literaturverzeichnis

- [Ago-2013] Agora Energiewende: Agora Energiewende Glossar. <http://www.agora-energiewende.de/de/service/glossar/>, Aufruf am 11.06.2013.
- [Arn-2006] Arnold, D. (Hrsg.): Intralogistik – Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Springer-Verlag GmbH, Berlin Heidelberg, 2006.
- [Arn-2008] Arnold, D.: Handbuch Logistik. Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [Atz-2011] Atz, T.; Günthner, W. A.: Integrierte Lagersystemplanung. In: Logistics Journal Proceedings (2011)
- [Bac-2016] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [BDE-2017] BDEW Bundesverband der Energie-und Wasserwirtschaft e.V.: BDEW-Strompreisanalyse Februar 2017 – Haushalte und Industrie, 2017.
- [Bes-2009] Beschlusskammer 6 Bundesnetzagentur: Positionspapier zur Erhebung von Baukostenzuschüssen (BKZ) für Netzanschlüsse im Bereich von Netzebenen oberhalb der Niederspannung, Aufruf am 30.06.2017.
- [BMW-2016] BMWi: Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/I/Infografiken/entwicklung-stromerzeugung-erneuerbare-energien-deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=9, Aufruf am 24.05.2017.
- [BMW-2017] BMWi: Die Energiewende: unsere Erfolgsgeschichte (2017)
- [Boe-2007] Boersch, C.; Elschen, R.: Das Summa Summarum des Management. Gabler Verlag, s.l., 2007.
- [Bög-2013] Böge, A. (Hrsg.): Handbuch Maschinenbau – Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik ; mit 405 Tabellen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.

- [Bos-2010] Bosen, P.; Haepf, C.: DOMESTIC APPLIANCE COMPRISING A COMMUNICATION UNIT, SYSTEM OF APPLIANCES AND METHOD FOR OPERATING A DOMESTIC APPLIANCE. Patentschrift US2012124401 (A1), 2010.
- [Boz-1984] Bozer, Y. A.; White, J. A.: Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems. In: IIE Transactions, Jg. 16 (1984) Nr. 4, S. 329–338.
- [Bra-2012] Braun, M.; Linsel, P.; Schönung, F.; Furmans, K.: Energiebetrachtung beim Lager- und Kommissioniervorgang. In: Logistics Journal Proceedings (2012)
- [Bra-2016] Braun, M.: Entwicklung, Analyse und Evaluation von Modellen zur Ermittlung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten. Dissertation. Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2016.
- [Bru-2012] Bruns, R.; Günthner, W. A.; Furmans, K.; Schilling, T.; Amberger, M.; Frenkel, A.; Fischer, G.; Braun, M.; Linsel, P.: Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik – Forschungsbericht ; [Beginn der Arbeiten: 01.03.2011, Ende der Arbeiten: 30.11.2012]. Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, Hamburg-Wandsbek, Hannover, ca. 2012.
- [Bun-1999] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Stromsteuergesetz (StromStG). <http://www.gesetze-im-internet.de/stromstg/index.html>, Aufruf am 30.06.2017.
- [Bun-2005] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz: Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG), Aufruf am 29.06.2017.
- [Bus-2011] Busch, R.: Elektrotechnik und Elektronik – Für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker; mit 136 Übungsaufg. mit Lösungen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011.
- [Car-2009] Cardenas, J. J. A.; Garcia, A. E.; Romeral, J. L. M.; Andrade, F. R.; Cardenas, J. J.; Garcia, A.; Romeral, J. L.; Andrade, F.: A genetic algorithm approach to optimization of power peaks in an automated warehouse IECON 2009 - 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON), 2009, S. 3297–3302.

- [Deu-2008] Deutscher Bundestag: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG) – EEG, 2008.
- [Deu-2010] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): dena-Netzstudie II. – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025.
https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahU-KEWjt_v7F09vUAhXJYJoKHxezCMwQFgg9MAA&url=https%3A%2F%2Fwww.dena.de%2Ffileadmin%2Fuser_upload%2FDownload%2FDokumente%2FStudien___Umfragen%2FEndbericht_dena-Netzstudie_II.PDF&usg=AFQjCNEJllogZ-pURDANC2ytH0tAWHJEkA&cad=rja, Aufruf am 26.06.2017.
- [Deu-2014] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): dena-Studie Systemdienstleistungen 2030 – Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. http://www.plattform-systemdienstleistungen.de/fileadmin/content/Downloads/Brosch%C3%BCren/140217_Factsheet_dena_Studie_SDL_2030_ES.pdf, Aufruf am 26.05.2017.
- [DIN-15020] Deutscher Normenausschuss: Hebezeuge Grundsätze für Seiltriebe - Berechnung und Ausführung. DIN Nr. 15020, Blatt 1, 1974.
- [DIN-60204-1] DIN EN: Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstung von Maschinen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. DIN EN Nr. 60204-1, 2017.
- [Dit-1989] Dittmer, M.: Lastmanagement bei zeitvariabler Elektrizitätspreisbildung in Industriebetrieben. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989.
- [Dub-2007] Dubbel, H.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Eck-1992] Eckey, H.-F.; Kosfeld, R.; Dreger, C.: Statistik – Grundlagen - Methoden - Beispiele. Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, s.l., 1992.
- [Ert-2016] Ertl, R. F.: Energiebedarfsermittlung und Energieeffizienzbewertung von Regalbediengeräten in automatischen Kleinteilelagern. Dissertation, Technische Universität München, 2016.

- [FEM-9a] FEM 9.851: Leistungsnachweis für Regalbediengeräte - Spielzeiten. FEM Nr. 9.851, 2003.
- [FEM-9b] FEM 9.101: Serienhebezeuge - Terminologie - Regalbediengeräte - Definitionen Einzelbestellung. FEM Nr. 9.101, 1997.
- [Gag-2012] Gagliardi, J.-P.; Renaud, J.; Ruiz, A.: Models for automated storage and retrieval systems – A literature review. In: International Journal of Production Research, Jg. 50 (2012) Nr. 24, S. 7110–7125.
- [Gag-2014] Gagliardi, J.-P.; Renaud, J.; Ruiz, A.: A simulation modeling framework for multiple-aisle automated storage and retrieval systems. In: Journal of Intelligent Manufacturing, Jg. 25 (2014) Nr. 1, S. 193–207.
- [Gag-2015] Gagliardi, J.-P.; Renaud, J.; Ruiz, A.: Sequencing approaches for multiple-aisle automated storage and retrieval systems. In: International Journal of Production Research, Jg. 53 (2015) Nr. 19, S. 5873–5883.
- [Gu-2007] Gu, J.; Goetschalckx, M.; McGinnis, L. F.: Research on warehouse operation – A comprehensive review. In: European Journal of Operational Research, Jg. 177 (2007) Nr. 1, S. 1–21.
- [Gud-2012] Gudehus, T.: Logistik 2 – Netzwerke, Systeme und Lieferketten. Springer Vieweg, Berlin, 2012.
- [Gün-2013] Günthner, W. A.: Förder- und Materialflusstechnik, München, 2013.
- [Hah-2017] Hahn-Woernle, P.; Günthner, W. A.: Power-load management reduces energy-dependent costs of multi-aisle mini-load automated storage and retrieval systems. In: International Journal of Production Research, Jg. 6 (2017) Nr. 3, S. 1–17.
- [Heu-2010] Heuck, K.; Dettmann, K.-D.; Schulz, D.: Elektrische Energieversorgung – Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis. Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2010.
- [HIO-2013] HIOKI E.E. CORPORATION: HIOKI 3169 - direct industry Foto. http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/16624-2769773.jpg, Aufruf am 19.05.2016.

- [Hom-2011] Hompel, M.; Heidenblut, V.: Taschenlexikon Logistik – Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Hu-2014] Hu, F.; Qin, J.; Wang, J.: Electrical load schedule optimization for manufacturing plants. In: Hu, F.; Qin, J.; Wang, J. (Hrsg.): 2014 IEEE 11th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC) // Electrical load schedule optimization for manufacturing plants, 2014, S. 7–12.
- [Hwa-1990] Hwang, H.; Lee, S. B.: Travel-time models considering the operating characteristics of the storage and retrieval machine. In: International Journal of Production Research, Jg. 28 (1990) Nr. 10, S. 1779–1789.
- [Jun-2014] Jungwirth, J.: Lastmanagement in Gebäuden – Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung mit einem adaptiven Gebäudemodell zur Flexibilisierung der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden, 2014.
- [Kas-2001] Kasikci, I.: Kompendium Planung von Elektroanlagen – Theorie, Vorschriften, Praxis, Softwareanwendung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l., 2001.
- [Kie-2007] Kiel, E. (Hrsg.): Antriebslösungen – Mechatronik für Produktion und Logistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Kle-2016] Kleppmann, W.: Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren. Hanser, München, Wien, 2016.
- [Klo-2013] Klobasa, M.; Roon, S. von; Buber, T.; Gruber, A.: Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland – Zusammenfassung der Zwischenergebnisse einer Studie von Fraunhofer ISI und der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (2013)
- [Kon-2007] Konstantin, P.: Praxisbuch Energiewirtschaft – Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. Springer-Verlag, s.l., 2007.
- [Kre-2011] Krebs, M.: Materialflussautomatisierung WS 2011/2012 – Informationstechnologie von Intralogistiksystemen, Aufruf am 26.02.2016.

- [Ler-2010] Lerher, T.; Sraml, M.; Potrc, I.; Tollazzi, T.: Travel time models for double-deep automated storage and retrieval systems. In: International Journal of Production Research, Jg. 48 (2010) Nr. 11, S. 3151–3172.
- [Ler-2011] Lerher, T.; Šraml, M.; Potrč, I.: Simulation analysis of mini-load multi-shuttle automated storage and retrieval systems. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Jg. 54 (2011) Nr. 1-4, S. 337–348.
- [Ler-2014] Lerher, T.; Edl, M.; Rosi, B.: Energy efficiency model for the mini-load automated storage and retrieval systems. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Jg. 70 (2014) Nr. 1-4, S. 97–115.
- [Mar-2013] Marenbach, R.; Nelles, D.; Tuttas, C.: Elektrische Energietechnik – Grundlagen, Energieversorgung, Antriebe und Leistungselektronik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, s.l., 2013.
- [Mel-2005] Meller, R. D.; Mungwattana, A.: AS/RS dwell-point strategy selection at high system utilization – A simulation study to investigate the magnitude of the benefit. In: International Journal of Production Research, Jg. 43 (2005) Nr. 24, S. 5217–5227.
- [Men-2014] Meneghetti, A.; Monti, L.: Multiple-weight unit load storage assignment strategies for energy-efficient automated warehouses. In: International Journal of Logistics Research and Applications, Jg. 17 (2014) Nr. 4, S. 304–322.
- [Men-2015] Meneghetti, A.; Dal Borgo, E.; Monti, L.: Rack shape and energy efficient operations in automated storage and retrieval systems. In: International Journal of Production Research, Jg. 53 (2015) Nr. 23, S. 7090–7103.
- [Mül-2009] Müller, E.; Engelmann, J.; Jörg, S.; Löffler, T.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Net-2018] Netze BW: Preise für die Nutzung des Stromverteilnetzes der Netze BW GmbH. <https://assets.content->

- ful.com/xytfb1vrn7of/Tm4mo4QtEY8O-myc4eyUmy/d6a2ab220b607279a94b90d8034c465d/Preise_2018.pdf, Aufruf am 05.02.2018.
- [Onl-2013] Online, S.: Messungen in Arktis – Treibhausgas CO₂ überschreitet erstmals 400 ppm - SPIEGEL ONLINE. <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/bild-836398-358220.html>, Aufruf am 28.06.2013.
- [Pal-2011] Palensky, P.; Dietrich, D.: Demand Side Management – Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics, Jg. 7 (2011) Nr. 3, S. 381–388.
- [Rab-2008] Rabe, M.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik – Vorgehensmodelle und Techniken. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [Rie-2008] Riese, S.; Fräger, C.: Antriebslösungen – Formeln, Auslegung und Tabellen. CW Niemeyer, Hameln, 2008.
- [Sch-2009] Schwab, A. J.: Elektroenergiesysteme – Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Sch-2011] Schmidt, T.; Schulze, F.: Simulationsbasierte Entwicklung energieeffizienter Steuerungsstrategien für Materialflusssysteme. In: Logistics Journal Proceedings (2011)
- [Sch-2012a] Schilling, T.; Frenkel, A.; Bruns, R.; Amberger, M.; Fischer, G.; Günthner, W. A.; Braun, M.; Schönung, F.; Furmans, K.: Analyse und Quantifizierung der Umweltaspekte von Fördermitteln in der Intralogistik. In: Logistics Journal Proceedings (2012)
- [Sch-2012b] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Der Einfluss kinematischer Parameter auf den Energiebedarf eines Regalbediengerätes. In: Logistics Journal Proceedings (2012)
- [Sch-2012c] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Isoenergetic Shelves of Automatic Small Parts Warehouses. In: Logistics Journal nicht-referierte Veröffentlichungen (2012)

- [Sch-2014] Schulz, R.: Untersuchung und Ableitung geeigneter Lagerbetriebsstrategien zur Verringerung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2014.
- [SEW-1997] SEW: Praxis der Antriebstechnik – Band 1 Antriebsauslegung mit SEW-Getriebemotoren Berechnungsverfahren und Beispiele. Ausgabe 06/97 (1997) Nr. Band 1
- [SEW-2012] SEW-Eurodrive: CCU Applikationslösung "Energiespar-Regalbediengerät" – Handbuch.
<https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiF6KTStNbVAhUBQZoKHWaPCVQQFggn-MAA&url=http%3A%2F%2Fdownload.sew-eurodrive.com%2Fdownload%2Fpdf%2F16905601.pdf&usg=AFQjCNEMAAazZThOwXSTVpRV5QvDXY1Qkw>, Aufruf am 14.08.2017.
- [Sie-2008] Siemens AG: Grundlagen der Niederspannungs-Schalttechnik.
https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/34973099/Grundlagen_der_Niederspannungs_Schalttechnik.pdf?download=true, Aufruf am 04.07.2017.
- [Sie-2010] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE). Springer-Verlag, Heidelberg, 2010.
- [Sie-2013] Siegel, A.; Schulz, R.; Turek, K.; Schmidt, T.; Zadek, H.: Modellierung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten und verschiedener Lagerbetriebsstrategien zur Reduzierung des Energiebedarfs – Modeling the Energy Need of Storage and Retrieval Vehicles and Different Storage Operating Strategies for the Reduction of the Energy Need (2013)
- [Sie-2016] Siemens AG: Messgeräte 7KM PAC3200. <https://mall.industry.siemens.com/mall/de/WW/Catalog/Product/7KM2112-0BA00-3AA0>, Aufruf am 20.05.2016.
- [Som-2013] Sommer, T.; Wehking, K.-H.: Energieeffiziente Lagerplatzzuordnung in Hochregallagern. In: Hompel, M. ten (Hrsg.): 9. Fachkolloquium Logistik der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL). Praxiswissen Service, Dortmund, 2013, S. 67–76.

- [Som-2015] Sommer, T.: Entwicklung und Bewertung von Lagerstrategien zur Steigerung der Energieeffizienz in automatischen Hochregallagern unter Beachtung des Umschlags. Universität Stuttgart, 2015.
- [Spr-2013] Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (Hrsg.): 222 Keywords Logistik – Grundwissen für Fach- und Führungskräfte. Springer Gabler, Wiesbaden, 2013.
- [Sta-2014] Stadler, I.: Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [Tap-2015] Tappia, E.; Marchet, G.; Melacini, M.; Perotti, S.: Incorporating the environmental dimension in the assessment of automated warehouses. In: Production Planning & Control, Jg. 26 (2015) Nr. 10, S. 824–838.
- [Tur-2013] Turek, K.: Simulationsbasierte Entwicklung energieeffizienter Steuerungsstrategien für fördertechnische Systeme – EStra ; Abschlussbericht ; Beginn der Arbeiten: 01.08.2011, Ende der Arbeiten: 30.09.2013. Techn. Univ. Professur für Techn. Logistik; Techn. Informationsbibl. und Univ.-Bibl, Dresden, Hannover, ca. 2013.
- [UNF-2015] UNFCCC: ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT. Proposal by the President. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09.pdf>, Aufruf am 24.05.2017.
- [VDI-2411] Verein Deutscher Ingenieure: Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen. VDI-Richtlinie Nr. 2411, 1970.
- [VDI-3601] Verein Deutscher Ingenieure: Warehouse-Management-Systeme. VDI-Richtlinie Nr. 3601, 2015.
- [VDI-3633a] Verein Deutscher Ingenieure: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe. VDI-Richtlinie Nr. 3633, Entwurf, 2013.
- [VDI-3633b] Verein Deutscher Ingenieure: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen Grundlagen. VDI Nr. 3633, Blatt 1, 2014.
- [VDI-3633c] Verein Deutscher Ingenieure: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen Experimentplanung und -auswertung. VDI-Richtlinie Nr. 3633, Blatt 3, 1997.

- [VDI-4480] Verein Deutscher Ingenieure: Durchsatz von automatischen Lagern mit gassengebundenen Regalbediensystemen. VDI-Richtlinie Nr. 4480, 1998.
- [Voß-2014] Voß, M.; Verl, A.; Schnierle, M.: Automatisierte Energiemanagementsysteme für Hochregallager – Intelligente Auftragsplanung zur Steuerung des Energieniveaus eines automatisierten HRL. In: Werkstattstechnik online, Jg. 104 (2014) Nr. H. 3, S. 180–186.
- [Wes-2009] Wesselak, V.; Schabbach, T.: Regenerative Energietechnik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Xu-2015] Xu, X.; Shen, G.; Yu, Y.; Huang, W.: Travel time analysis for the double-deep dual-shuttle AS/RS. In: International Journal of Production Research, Jg. 53 (2015) Nr. 3, S. 757–773.
- [Zad-2014] Zadek, H.: Eneff Lager - Energieeffiziente Lagerstrategien und Lastverteilung – Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben, Magdeburg, 2014.
- [Zae-2013] Zaerpour, N.; Koster, R. B.M. de; Yu, Y.: Storage policies and optimal shape of a storage system. In: International Journal of Production Research, Jg. 51 (2013) Nr. 23-24, S. 6891–6899.

Abbildungsverzeichnis

Hauptteil

Abbildung 1-1: Strompreis für die Industrie [BDE-2017]	1
Abbildung 1-2: CO ₂ -Konzentration in der Luft (auf Hawaii) [Onl-2013]	2
Abbildung 1-3: Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien [BMW-2016]	3
Abbildung 1-4: Einfluss von Valley Filling und Peak-Shaving-Maßnahmen auf den Strompreis [Deu-2010, S. 407]	4
Abbildung 2-1: Systemelemente der Materialflusstechnik [Gün-2013]	9
Abbildung 2-2: Lagerbedienung	10
Abbildung 2-3: 2-gassiges APL-Lagersystem mit Lagervorzone (Bildquelle: viastore SYSTEMS GmbH)	11
Abbildung 2-4: Hauptbaugruppen eines RBG für Paletten (Bildquelle: viastore SYSTEMS GmbH)	13
Abbildung 2-5: Fahrwerk Rollenanordnung (Bildquelle: viastore SYSTEMS GmbH)	14
Abbildung 2-6: Fahrwerk Omegaantrieb (Bildquelle: viastore SYSTEMS GmbH)	15
Abbildung 2-7: Fahrwerk senkrechter Stegantrieb (Bildquelle: viastore SYSTEMS GmbH)	16
Abbildung 2-8: Fahrwerk 2-Rad-Reibradantrieb (Bildquelle: viastore SYSTEMS GmbH)	16
Abbildung 2-9: Geschlossener Hubriementrieb [Arn-2008, S. 684]	17
Abbildung 2-10: Seiltrieb für die Hubbewegungen der RBG	18
Abbildung 2-11: Vereinfachter Aufbau eines U-Umrichters [SEW-1997]	19
Abbildung 2-12: Antriebskonfigurationen bei RBG	19
Abbildung 2-13: Ein- und Auslagerspiele eines RBGs [eigene Darstellung]	21
Abbildung 2-14: Referenzfahrten für die Spielzeitermittlung nach [FEM-9a]	25
Abbildung 2-15: Ebenenmodell der Systemlandschaft (aus Sicht des WMS) [VDI-3601]	27
Abbildung 2-16: Auslösecharakteristika NH-Sicherungen [Jea -2015]	30
Abbildung 2-17: Arbeitsweise eines Lastmanagements [Mül-2009, S. 97]	32
Abbildung 2-18: Lastlinien mit und ohne Lastmanagement [Sch-2009, S. 724]	33

Abbildung 2-19: Stromkostenanteile der arbeitsabhängigen Stromkosten (Jahresnutzungsdauer 2500 h; Anschluss auf Mittelspannungsebene)	37
Abbildung 2-20: Grundsätzlicher Netzaufbau [Bus-2011, S. 327]	39
Abbildung 2-21: Simulationsmodell IFL [Bru-2012, S. 177]	42
Abbildung 2-22: Vergleich des simulierten Leistungsbedarfs des Simulationsmodells der TU Dresden mit dem gemessenen Leistungsbedarf [Sie-2013, S. 5]	44
Abbildung 2-23: Grafische Darstellung der Energiebedarfsermittlung für ein RBG nach Meneghetti et al.[Men-2015, S. 7094]	47
Abbildung 2-24: Teilmodell für die Antriebsstränge mit Komponenten und Parametern [Ert-2016, S. 52]	48
Abbildung 2-25: Vergleich von einem gemessenen und einem modellierten Strombedarfsprofil einer Fahrbewegung [Car-2009, S. 3298]	48
Abbildung 2-26: Freiheiten der Bahnplanung unter Berücksichtigung eines gleichmäßigen Leistungsbedarfs [Voß-2014, S. 184]	51
Abbildung 2-27: Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie [VDI-3633]	57
Abbildung 3-1: Simulationsmodell	62
Abbildung 3-2: Systembeschreibung mit Ein- und Ausgabeparametern	63
Abbildung 3-3: Übergeordnete Ebenen der RGB-Steuerung	65
Abbildung 3-4: Geschwindigkeitsverläufe der X- und Y-Achse für den Optimierungsfall 1 [SEW-2012, S. 12]	68
Abbildung 3-5: Geschwindigkeitsverläufe der X- und Y-Achse für den Optimierungsfall 2 [SEW-2012, S. 13]	69
Abbildung 3-6: Geschwindigkeitsverläufe der X- und Y-Achse für den Optimierungsfall 3 [SEW-2012, S. 14]	69
Abbildung 3-7: Geschwindigkeitsverläufe der X- und Y-Achse im Optimierungsfall 4 [SEW-2012, S. 15]	70
Abbildung 3-8: Energieversorgung RBG	71
Abbildung 3-9: Leistungsbedarf ohne Lastmanagement	74
Abbildung 3-10: Leistungsbedarf mit Lastmanagement	74
Abbildung 3-11: Lastgang des Lagersystems mit Eingriff des Lastmanagements	75
Abbildung 3-12: Strukturierungsmodell der Fabrik [VDI-3633b]	76
Abbildung 3-13: Systemkomponenten administrative Ebene	78
Abbildung 3-14: Systemkomponenten und Informationsfluss Dispositionsebene	79
Abbildung 3-15: Auftragssteuerungselement RBG	80
Abbildung 3-16: Systemkomponenten der Steuerungsebene	81

Abbildung 3-17: Bahnplanungsmodell RBG	81
Abbildung 3-18: Systemkomponenten der Operationsebene	82
Abbildung 3-19: Externe Ablauflogik des Simulationsmodells	84
Abbildung 3-20: Ablaufprozess der Auftragssteuerung RBG	85
Abbildung 3-21: Ablaufdiagramm Leistungsbedarf ermitteln	86
Abbildung 3-22: Ablauflogik Lastmanagement	87
Abbildung 3-23: Ablauflogik Simulieren des Teilauftrags	88
Abbildung 4-1: Implementierung des Lastmanagements	103
Abbildung 4-2: Implementierung der Auftragsabwicklung	106
Abbildung 4-3: Implementierung der Achssteuerung	107
Abbildung 4-4: Implementierung der Bremssteuerung	108
Abbildung 4-5: Implementierung der LAM-Leistung	115
Abbildung 4-6: Implementierung der Verlustleistung der zusätzlichen Verbraucher des mitfahrenden Schaltschranks	116
Abbildung 4-7: Modell des stationären Schaltschranks	117
Abbildung 5-1: Einteilung der Daten für die Simulation [VDI-3633b, S. 34]	122
Abbildung 5-2: MFS-Telegrammstruktur	123
Abbildung 5-3: MFS-Telegrammfelder	124
Abbildung 5-4: Beschreibung Telegrammfeld "AFR" und "ATO"	125
Abbildung 5-5: Bearbeitungsstatus bei TeleID = 60	125
Abbildung 5-6: Aufzeichnungsfunktion des Umrichterherstellers (Screenshot SEW-Software)	130
Abbildung 5-7: Darstellung der aufgezeichneten Messparameter mit Hilfe der Herstellerapplikation	131
Abbildung 5-8: Stromzangen-Leistungsmessgerät mit Zubehör (Quelle Foto: [HIO-2013])	132
Abbildung 5-9: Anschluss des Leistungsmessgeräts für die Leistungsmessung an der Gassenzuleitung des RBG	133
Abbildung 5-10: Multifunktionsmessgerät PAC3200 von Siemens [Sie-2016]	134
Abbildung 5-11: Antriebsmoment FW Kalibrierung Rollwiderstand Fahrwerk	137
Abbildung 5-12: Antriebsmoment FW Kalibrierung Wirkungsgrad Riementrieb	138
Abbildung 5-13: Antriebsmoment FW Kalibrierung geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand	139
Abbildung 5-14: Antriebsmoment FW Kalibrierung Wirkungsgradreduzierung Rückspeisung Getriebe	140
Abbildung 5-15: Leistungsbedarf FW Kalibrierung Wirkungsgrad Antrieb	141

Abbildung 5-16: Leistungsbedarf FW Kalibrierung Wirkungsgrad Antrieb AKL geschwindigkeitsabhängiger Fahrwiderstand 95 N/(m/s)	142
Abbildung 5-17: Antriebsmoment HW Kalibrierung Wirkungsgrad Hubriementrieb.	143
Abbildung 5-18: Antriebsmoment HW Kalibrierung Rollreibungskoeffizient Laufrollen AKL	144
Abbildung 5-19: Antriebsmoment HW Kalibrierung geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand	145
Abbildung 5-20: Antriebsmoment FW Kalibrierung Wirkungsgradreduzierung Rückspeisung Getriebe	145
Abbildung 5-21: Leistungsbedarf HW Kalibrierung Wirkungsgrad Antrieb	146
Abbildung 5-22: Antriebsmoment Fahrwerk APL Rollwiderstand Laufräder	148
Abbildung 5-23: Antriebsmoment Fahrwerk APL geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand	149
Abbildung 5-24: Antriebsmoment Fahrwerk APL Wirkungsgradreduzierung Rückspeisung Getriebe	150
Abbildung 5-25: Leistungsbedarf FW Kalibrierung Wirkungsgrad Antrieb APL	151
Abbildung 5-26: Leistungsbedarf FW Kalibrierung Wirkungsgrad Antrieb APL geschwindigkeitsabhängiger Wirkungsgrad = 240 N/(m/s)	151
Abbildung 5-27: Antriebsmoment HW Kalibrierung Wirkungsgrad Seiltrieb	152
Abbildung 5-28: Antriebsmoment HW Kalibrierung Rollwiderstand Laufrollen APL	153
Abbildung 5-29: HW Kalibrierung geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand	154
Abbildung 5-30: Antriebsmoment FW Kalibrierung Wirkungsgradreduzierung Rückspeisung Getriebe	154
Abbildung 5-31: Leistungsbedarf HW Kalibrierung Wirkungsgrad Antrieb	155
Abbildung 5-32: APL Kalibrierung Wirkungsgrad Rückspeiseeinheit WG_Red_Getr = 0,225	156
Abbildung 5-33: APL Kalibrierung Wirkungsgrad Rückspeiseeinheit WG_Red_Getr = 0,20	157
Abbildung 5-34: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL langer Fahrweg mit sehr kurzem Hubweg ohne Zuladung	158
Abbildung 5-35: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL Langer Hubweg ohne Zuladung	159
Abbildung 5-36: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL – Langer Fahrweg mit langem Hubweg ohne Zuladung; fahrwerkskritisch	159

Abbildung 5-37: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL- Langer Fahrweg mit langer Senkbewegung ohne Zuladung; Fahrwerkskritisch	160
Abbildung 5-38: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL – Fahrweg mit Hubbewegung ohne Zuladung	161
Abbildung 5-39: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL – Fahrweg mit Senkbewegung ohne Zuladung	161
Abbildung 5-40: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL langer Fahrweg mit sehr kurzem Hubweg 50 kg Zuladung	162
Abbildung 5-41: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL langer Hubweg 50 kg Zuladung	162
Abbildung 5-42: Validieren Leistungs- und Energiebedarf AKL – Langer Fahrweg mit langem Hubweg 50 kg Zuladung; fahrwerkskritisch	162
Abbildung 5-43: Validieren Leistungs- und Energiebedarf APL – langer Fahrweg mit langem Hubweg 0 kg Zuladung	163
Abbildung 5-44: Validieren Leistungs- und Energiebedarf APL – langer Fahrweg mit langer Senkbewegung 0 kg Zuladung	164
Abbildung 5-45: Validieren Leistungs- und Energiebedarf APL – kurzer Fahrweg mit langem Hubweg 0 kg Zuladung	164
Abbildung 5-46: Validieren Leistungs- und Energiebedarf APL – kurzer Fahrweg mit langer Senkbewegung 0 kg Zuladung	165
Abbildung 5-47: Validierung der Leistungsmittelwerte des AKL	166
Abbildung 5-48: Abweichung Leistungsmittelwerte AKL	167
Abbildung 5-49: Leistungsbedarf 3 AKL ohne Leistungsgrenze oder Lastganggrenze	169
Abbildung 5-50: Leistungsmittelwerte für 3 AKL ohne Leistungsgrenze oder Lastganggrenze	169
Abbildung 5-51: Leistungsbedarf 3 AKL mit einer Leistungsgrenze von 80 kW	170
Abbildung 5-52: Leistungsbedarf 3 AKL mit einer Leistungsgrenze von 60 kW	170
Abbildung 5-53: Leistungsbedarf 3 AKL mit einer Lastganggrenze von 14 kW	171
Abbildung 5-54: Leistungsbedarf 3 AKL mit einer Grenze für den Leistungsmittelwert von 12 kW	171
Abbildung 5-55: Vergleich des Leistungsbedarfs und der Leistungsvoraussage der Anlage und der RBG	172
Abbildung 5-56: Differenz zwischen Leistungsbedarf und Leistungsvoraussage LM für die Anlage, Leistungsgrenze 60 kW	173

Abbildung 5-57: Verifizieren der Arbeitsweise des LM; Zeitpunkt $t_1 = 0,07928$ h	174
Abbildung 5-58: Verifizieren der Arbeitsweise des LM zum Zeitpunkt $t_1 = 0,2355$ h	176
Abbildung 6-1: Effektdiagramm für die Haupteffekte (oben) und für einige deren Wechselwirkungen (unten, Farbe ist die Faktorstufe des 2. Faktors) [Sie-2010, S. 22]	180
Abbildung 6-2: Unterteilung der Streuung in Streuung, die durch den Faktor verursacht wurde und Streuung, die nicht von diesem Faktor verursacht wurde [Sie-2010, S. 70]	181
Abbildung 6-3: Streudiagramm mit Regressionsgerade und Residuum	186
Abbildung 6-4: Ablauf der statistischen Experimentplanung [VDI-3633c]	189
Abbildung 6-5: Pareto-Diagramm der Effekte des Screening-Versuchsplans AKL	199
Abbildung 6-6: Wechselwirkungsdiagramm der prozentualen Reduzierung der Durchsatzleistung bei AKL	202
Abbildung 6-7: Faktordiagramme der Faktoren des AKL-Screening-Versuchsplans	204
Abbildung 6-8: Wechselwirkungsdiagramm der signifikanten 2FWW für die Reduzierung der Durchsatzleistung bei APL	210
Abbildung 6-9: Pareto-Diagramm der Effekte des Screening-Versuchsplans APL	211
Abbildung 6-10: Faktordiagramme der Faktoren des APL-Screening-Versuchsplans	212
Abbildung 6-11: Verteilung der Durchsatzleistung (DSL) in 15 min pro RBG von APL Screening-Versuch 34	218
Abbildung 6-12: Eingabe der Simulationsparameter in die Simulationsschritte	219
Abbildung 6-13: Haupteffektdiagramm der maximalen Leistungsaufnahme des Lagersystems der AKL	223
Abbildung 6-14: Wechselwirkungsdiagramm der maximalen Leistungsaufnahme des Lagersystems der AKL	224
Abbildung 6-15: Haupteffektdiagramm des Leistungsmittelwerts des Lagersystems der AKL	225
Abbildung 6-16: Wechselwirkungsdiagramm des Leistungsmittelwerts des Lagersystems AKL	225
Abbildung 6-17: Haupteffektdiagramm aller Faktoren der Hauptuntersuchung für die relative Durchsatzleistung der AKL	227
Abbildung 6-18: Residuendiagramme des linearen Regressionsmodells der Hauptuntersuchung der AKL	231

Abbildung 6-19: Residuendiagramm der Regressionsanalyse der Hauptuntersuchung AKL mit reduzierten 2-Faktor-Wechselwirkungen	234
Abbildung 6-20: Untersuchung der Normalverteilung der Residuen der Hauptuntersuchung AKL	234
Abbildung 6-21: Haupteffektdiagramm der maximalen Leistungsaufnahme des Lagersystems der APL	236
Abbildung 6-22: Wechselwirkungsdiagramm der maximalen Leistungsaufnahme des Lagersystems der APL	237
Abbildung 6-23: Haupteffektdiagramm des Leistungsmittelwerts des Lagersystems der APL	238
Abbildung 6-24: Wechselwirkungsdiagramm des Leistungsmittelwerts des Lagersystems APL	238
Abbildung 6-25: Haupteffektdiagramm aller Faktoren der Hauptuntersuchung für die relative Durchsatzleistung der APL	240
Abbildung 6-26: Residuendiagramme des linearen Regressionsmodells der Hauptuntersuchung der APL	243
Abbildung 6-27: Residuendiagramme des linearen Regressionsmodells der Hauptuntersuchung mit den zusätzlichen Polynomen der APL	245
Abbildung 6-28: Haupteffektdiagramm der Hauptuntersuchung der AKL	249
Abbildung 6-29: Haupteffektdiagramm der Hauptuntersuchung der APL	249

Anhang

Abbildung D-1: Quantile der t-Verteilung bei v Freiheitsgraden [Eck-1992, S. 608]	D-1
---	-----

Tabellenverzeichnis

Hauptteil

Tabelle 2-1: Koordinaten der Referenzpunkte für die Spielzeitermittlung der RBG nach [FEM-9a]	25
Tabelle 2-2: Gleichzeitigkeitsfaktoren für das Netzanschlussschreiben	29
Tabelle 2-3: Entgelte für Jahresleistungspreissystem der Entnahmestelle mit registrierender Lastgangmessung [Net-2018, S. 3]	36
Tabelle 2-4: Ausschnitt der Aufschläge für die Netznutzung [Net-2018]	37
Tabelle 5-1: Parameter des Stromnetzes	126
Tabelle 5-2: Vergleich der gemessenen und simulierten Leistungsmittelwerte eines dreigassigen AKL-Lagersystems	167
Tabelle 6-1: Einteilung der Signifikanz der F-Werte [Kle-2016]	184
Tabelle 6-2: Bewertung der Signifikanz von p-Werten [Kle-2016]	184
Tabelle 6-3: Voraussichtliche Auswirkungen der Eingangsgrößen und Einteilung in konstante und variable Eingangsgrößen (* abhängig von anderen Eingangsgrößen)	191
Tabelle 6-4: Wertebereiche der variablen Eingangsgrößen vom AKL	193
Tabelle 6-5: Wertebereiche der variablen Eingangsgrößen vom APL	193
Tabelle 6-6: Faktoren und Faktorstufen für den Screening-Versuchsplan der AKL	195
Tabelle 6-7: Screening Versuchsplan für AKL	196
Tabelle 6-8: Ergebnisse des Screening-Versuchsplans AKL ($R^2=99,8\%$, $R^2_{adj} = 99,7\%$)	197
Tabelle 6-9: Koeffizienten und Effekte der Faktoren des Screening-Versuchsplans AKL	199
Tabelle 6-10: Ergebnis Screening-Versuchsplan mit reduzierten 2-Faktor-Wechselwirkungen ($R^2 = 99,8\%$; $Radj^2 = 99,7\%$)	201
Tabelle 6-11: Ergebnis des AKL-Screening-Versuchsplan mit reduzierten Faktoren und 2-Faktor-Wechselwirkungen ($R^2 = 99,5\%$; $Radj^2 = 99,5\%$)	205
Tabelle 6-12: Ergebnisse des Screening-Versuchsplans APL ($R^2=99,9\%$, $R^2_{adj} = 99,84\%$)	206
Tabelle 6-13: Koeffizienten und Effekte der Faktoren des Screening Versuchsplans APL	207

Tabelle 6-14: Ergebnis APL Screening Versuchsplan mit reduzierten 2-Faktor-Wechselwirkungen ($R^2 = 99,77\%$; $R_{adj}^2 = 99,71\%$)	208
Tabelle 6-15: Koeffizienten und Effekte der Faktoren des Screening-Versuchsplans APL	209
Tabelle 6-16: Ergebnis Screening-Versuchsplan APL mit reduzierten Faktoren und 2-Faktor-Wechselwirkungen ($R^2 = 99,7\%$; $R_{adj}^2 = 99,6\%$)	213
Tabelle 6-17: Faktoren für die Hauptuntersuchung der AKL	216
Tabelle 6-18: Faktoren für die Hauptuntersuchung der APL	217
Tabelle 6-19: Ergebnisse der Referenzsimulationen der APL	221
Tabelle 6-20: Ergebnisse der Varianzanalyse der Hauptuntersuchung der AKL mit allen Haupteffekten ($S = 2,2\%$; $R^2 = 99,45\%$; $R_{adj}^2 = 99,44\%$)	227
Tabelle 6-21: Regressionskoeffizienten der Hauptuntersuchung AKL mit allen Faktoren	228
Tabelle 6-22: Varianzanalyse der schrittweisen Regressionsanalyse AKL	228
Tabelle 6-23: Koeffizienten für die Regressionsgleichung der AKL aus der schrittweisen Regression	230
Tabelle 6-24: Zusammenfassung der Anpassung der schrittweisen Regression der AKL	230
Tabelle 6-25: Varianzanalyse der schrittweisen Regressionsanalyse AKL mit reduzierten 2-Faktor-Wechselwirkungen	232
Tabelle 6-26: Koeffizienten für die Regressionsgleichung der AKL aus der schrittweisen Regression mit reduzierten 2-Faktor-Wechselwirkungen	233
Tabelle 6-27: Ergebnisse der Varianzanalyse der Hauptuntersuchung der APL mit allen Haupteffekten ($S = 2,7\%$; $R^2 = 99,12\%$; $R_{adj}^2 = 99,11\%$)	240
Tabelle 6-28: Regressionskoeffizienten der Hauptuntersuchung APL mit allen Faktoren	241
Tabelle 6-29: Varianzanalyse der schrittweisen Regressionsanalyse APL	241
Tabelle 6-30: Koeffizienten für die Regressionsgleichung der APL aus der schrittweisen Regression	241
Tabelle 6-31: Zusammenfassung der Anpassung der schrittweisen Regression der APL	242
Tabelle 6-32: Ergebnisse der Varianzanalyse der schrittweisen Regressionsanalyse mit den zusätzlichen Polynomen für die APL	244

Tabelle 6-33: Koeffizienten für die Regressionsgleichung mit den zusätzlichen Polynomen der APL aus der schrittweisen Regression	244
Tabelle 6-34: Zusammenfassung des Regressionsmodells des APL für die relative Durchsatzleistung mit den zusätzlichen Polynomen	245

Anhang

Tabelle C-1: Technische Daten RBG	C-1
Tabelle E-1: Screening Versuchsplan AKL	E-1
Tabelle E-2: Screening Versuchsplan APL	E-3
Tabelle E-3: Simulationsergebnisse Hauptuntersuchung AKL	E-5
Tabelle E-4: Simulationsergebnisse Hauptuntersuchung APL	E-10

Anhang A Programmcode

A.1 Prüfen der Leistungs- und Lastganggrenze

```
function [Marker_GRMW, Marker_GRSP, P_Vor_Ges_n] = checkGRMWGRLSP( P_Vor,...
    RBGNo, P_Vor_Auftrag, t_Start_Auftr, t_MW_Start, t_MW_End,...
    GrenzwertLMW, GrenzwertLSP)

%% Wertfehler eliminieren
t_Start_Auftr = round(t_Start_Auftr/StepSize)*StepSize;
t_MW_Start = round(t_MW_Start/StepSize)*StepSize;
t_MW_End = round(t_MW_End/StepSize)*StepSize;

%% Vorausberechnete Leistung zu Leistungsvoraussage addieren
% Ermitteln der Startzeile für den Auftrag in der Leistungsvoraussage der Anlage
tmp_Zeile_Start = find(P_Vor(:,1)>=round(t_Start_Auftr/StepSize)*StepSize,1);
% Bereinigen der Leistungsvoraussage des Teilauftrags
tmp_P_Vor_Auftr = P_Vor_Auftrag(~isnan(P_Vor_Auftrag(:,1)),:);
% Ermitteln der Endzeile für den Auftrag in der Leistungsvoraussage der Anlage
tmp_Zeile_End = tmp_Zeile_Start(1,1) + size(tmp_P_Vor_Auftr,1)-1;
% Einfügen des Teilauftrags in die Spalte der Leistungsvoraussage der Anlage für
% das RBG
P_Vor(tmp_Zeile_Start(1,1):tmp_Zeile_End, RBGNo+1) = tmp_P_Vor_Auftr;
% Berechnen der neuen Summe der Leistungsvoraussage der Anlage
P_Vor(:,end) = sum(P_Vor(:,2:end-1),2);

%% Überprüfen des Leistungsmittelwerts
% Ermitteln der Endzeile der Messperiode in der Leistungsvoraussage der Anlage
Zeile_ZI_End = find(P_Vor(:,1)==t_MW_End);

% Ermitteln der Zeilen dieser und der folgenden Messperiode in der
% Leistungsvoraussage der Anlage
Auswahl_MW_t0 = single(P_Vor(:,1) >= t_MW_Start & P_Vor(:,1) < t_MW_End);
Auswahl_MW_t1 = single(P_Vor(:,1) >= t_MW_End &...
    P_Vor(:,1) < t_MW_End+(t_MW_End-t_MW_Start));

% Prüfen ob in dieser oder der folgenden Messperiode die Grenze für den
% Leistungsmittelwert gewahrt wird
Marker_GRMW = mean(P_Vor(logical(Auswahl_MW_t0),end))< GrenzwertLMW &...
    mean(P_Vor(logical(Auswahl_MW_t1),end))< GrenzwertLMW;

%% Überprüfen der Leistungsspitze
```

```
Marker_GRSP = max(P_Vor(:,end))<= GrenzwertLSP;
```

```
%% Schreiben der neuen Leistungsvoraussage
```

```
P_Vor_Ges_n = P_Vor;
```

A.2 Berechnen der Zeitinformationen

```
% Startzeitpunkt des Teilauftrags berechnen
```

```
t_Start = t + ZeitbedAnfr;
```

```
% Startzeitpunkt der Messperiode das LMW berechnen
```

```
t_ZI_Start = floor((t + ZeitbedAnfr)/60/t_MW)*60*t_MW;
```

```
% Endzeitpunkt der Messperiode das LMW berechnen
```

```
t_ZI_End = t_ZI_Start + t_MW*60;
```

A.3 Freigabepfung und aktualisieren der Leistungsvoraussage

```
% Freigabe wird gegeben, wenn die beide Grenzen gewahrt werden.
```

```
Freigabe_RBGl = and(GRSP, GRMW);
```

Mit der Freigabe des Teilauftrags wird der Zustand „Anfrage bearbeiten RBGn“ verlassen. Beim Verlassen werden die Leistungsvoraussage aktualisiert und die Verarbeitungsvariablen zurückgesetzt. Der Programmcode hierfür ist:

Aktualisierung der Leistungsvoraussage:

```
% Die von der Prüfung zurückgegeben wird, wird als Leistungsvoraussage für die Anlage
```

```
% übernommen
```

```
P_Vor_Ges = P_Vor_Ges_neu;
```


Anhang B Berechnungen

B.1 Berechnen der Strecke des Spitzbogens auf die maximale Beschleunigung

Die Strecke s_{SBA} der Spitzbogenfahrt wird aus den Strecken der einzelnen Phasen s_{P_i} wie folgt berechnet:

$$s_{SBA} = s_{P1} + s_{P3} + s_{P5} + s_{P7} \quad (7-1)$$

$$s_{P1} = s_{P7}; s_{P3} = s_{P5} \quad (7-2)$$

Die Strecke der Phasen 1 s_{P1} und 7 s_{P7} berechnen sich mit dem Ruck r , dem Zeitbedarf für die Ruckphase t_{P1} und der effektiven Beschleunigung a_{eff} :

$$s_{P1} = s_{P7} = \frac{1}{6} r t_{P1}^3 = \frac{1}{6} \frac{a_{eff}^3}{r^2} \quad (7-3)$$

Der Zeitbedarf t_{P1} für die Phase 1 ist:

$$t_{P1} = \frac{u_{eff}}{r} \quad (7-4)$$

Es gilt:

$$t_{P1} = t_{P3} = t_{P5} = t_{P7} \quad (7-5)$$

Strecke Phasen 3 und 5:

$$s_{P3} = s_{P5} = v_{03} * t_{P3} + \frac{1}{2} a_{eff} * t_{P3}^2 - \frac{1}{6} r * t_{P3}^3 \quad (7-6)$$

v_{03} : Startgeschwindigkeit Phase 3 [m/s]

Die Startgeschwindigkeit v_{03} der Phase 3 ist in diesem Fall:

$$v_{03} = \frac{1}{2} r * t_{P1}^2 = \frac{1}{2} \frac{a_{eff}^2}{r} \quad (7-7)$$

Damit ist:

$$s_{P3} = \frac{1}{2} \frac{a_{eff}^3}{r^2} + \frac{1}{2} \frac{a_{eff}^3}{r^2} - \frac{1}{6} \frac{a_{eff}^3}{r^2} = \frac{5}{6} \frac{a_{eff}^3}{r^2} \quad (7-8)$$

Und:

$$s_{SBa} = 2 * s_{P1} + 2 * s_{P3} = 2 * \frac{1}{6} \frac{a_{eff}^3}{r^2} + 2 * \frac{5}{6} \frac{a_{eff}^3}{r^2} = 2 * \frac{a_{eff}^3}{r^2} \quad (7-9)$$

B.2 Berechnen der Strecke des Spitzbogens auf die maximale Geschwindigkeit

Die Strecke für den Spitzbogen s_{SBv} auf die maximale Geschwindigkeit berechnet sich wie folgt:

$$s_{SBv} = s_{P1} + s_{P2} + s_{P3} + s_{P5} + s_{P6} + s_{P7} \quad (7-10)$$

$$s_{P1} = s_{P7}; s_{P2} = s_{P6}; s_{P3} = s_{P5} \quad (7-11)$$

Mit:

s_{SBv} : Strecke für den Spitzbogen auf die maximale Geschwindigkeit [m]

Die Strecken für die Phasen 1 und 7 werden nach der Gleichung (7-3) berechnet. Die Strecke s_{P2} für die Phasen 2 und 6 werden folgendermaßen berechnet:

$$s_{P2} = s_{P6} = v_{02} * t_{P2} + \frac{1}{2} a * t_{P2}^2 \quad (7-12)$$

Die Startgeschwindigkeit v_{02} der Phase 2 ist in diesem Fall:

$$v_{02} = \frac{1}{2} r * t_{P1}^2 = \frac{1}{2} \frac{a^2}{r} \quad (7-13)$$

Der Zeitbedarf t_{P2} der Phase 2 berechnet sich über die Geschwindigkeit. In den Phasen 1 und 3 wird die Geschwindigkeit um den gleichen Betrag geändert. Deshalb gilt:

$$\Delta v_{P1} + \Delta v_{P2} + \Delta v_{P3} = v \rightarrow \Delta v_{P2} = v - 2 * \Delta v_{P1} \quad (7-14)$$

$$t_{P2} = \frac{\Delta v_{P2}}{a} = \frac{v - 2 * \Delta v_{P1}}{a} = \frac{v}{a} - \frac{a}{r} \quad (7-15)$$

Damit ist:

$$s_{P2} = s_{P6} = \frac{1}{2} \frac{a^2}{r} * \left(\frac{v}{a} - \frac{a}{r} \right) + \frac{1}{2} a * \left(\frac{v}{a} - \frac{a}{r} \right)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{v^2}{a} - \frac{av}{r} \right) \quad (7-16)$$

Die Strecke der Phase 3 berechnet sich nach der folgenden Gleichung:

$$s_{P3} = s_{P5} = v_{03} * t_{P3} + \frac{1}{2} a_{eff} * t_{P3}^2 - \frac{1}{6} r * t_{P3}^3 \quad (7-17)$$

In diesem Fall ist die Startgeschwindigkeit v_{03} der Phase 3:

$$v_{03} = v - \frac{1}{2} \frac{a^2}{r} \quad (7-18)$$

Eingesetzt berechnet sich die Strecke s_{P3} :

$$s_{P3} = s_{P5} = \left(v - \frac{1}{2} \frac{a^2}{r} \right) * \frac{a}{r} + \frac{1}{2} \frac{a^3}{r^2} - \frac{1}{6} \frac{a^3}{r^2} \quad (7-19)$$

$$s_{P3} = s_{P5} = \frac{av}{r} - \frac{1}{6} \frac{a^3}{r^2} \quad (7-20)$$

Die Strecke s_{SBv} für den Spitzbogen auf die maximale Geschwindigkeit ist dann:

$$s_{SBv} = 2 * s_{P1} + 2 * s_{P2} + 2 * s_{P3} = \frac{2 a_{eff}^3}{6 r^2} + \left(\frac{v^2}{a} - \frac{av}{r} \right) + 2 * \left(\frac{av}{r} - \frac{1 a^3}{6 r^2} \right) \quad (7-21)$$

$$s_{SBv} = \frac{v^2}{a} + \frac{av}{r} \quad (7-22)$$

B.3 Berechnen der Strecke des Spitzbogens auf die maximale Geschwindigkeit

Der Zeitbedarf t_{oVerz} berechnet sich folgenderweise:

$$t_{oVerz} = t_{P1} + t_{P3} = 2 * t_{P1} = 2 * \frac{a_{eff}}{r} \quad (7-23)$$

Die Strecke s_{ges} setzt sich zusammen aus:

$$s_{ges} = s_{P1} + s_{P3} + s_{P5} + s_{P7} = 2 * \frac{1}{6} * \frac{a_{eff}^3}{r^2} + 2 * \frac{5 a_{eff}^3}{6 r^2} = 2 \frac{a_{eff}^3}{r^2} \quad (7-24)$$

Ergibt die effektive Beschleunigung a_{eff} von:

$$a_{eff} = \sqrt[3]{\frac{s_{ges} * r^2}{2}} \quad (7-25)$$

Und den gesuchten Zeitbedarf t_{oVerz} , bis die Verzögerung einsetzt von:

$$t_{oVerz} = 2 * \frac{a_{eff}}{r} = \sqrt[3]{\frac{4 * s_{ges}}{r}} \quad (7-26)$$

B.4 Berechnen des gesuchten Zeitbedarfs der Fahrt für den 2. Fall, bis die Verzögerung einsetzt

Beim 2. Fall setzt die Verzögerung, wie bei dem 1. Fall, nach der Hälfte der Strecke und des dafür erforderlichen Zeitbedarfs ein. Die Fahrt besteht beim 2. Fall aus den Phasen 1, 2, 3, 5, 6 und 7. Der Zeitbedarf t_{oVerz} berechnet sich folgendermaßen:

$$t_{oVerz} = t_{P1} + t_{P2} + t_{P3} = 2 * t_{P1} + t_{P2} = 2 * \frac{a}{r} + \frac{v - \frac{a^2}{r}}{a} = \frac{a}{r} + \frac{v_{eff}}{a} \quad (7-27)$$

Die Strecke s_{ges} ist in diesem Fall eine Spitzbogenfahrt auf eine effektive Geschwindigkeit v_{eff} und wird deshalb wie die Strecke für die Spitzbogenfahrt berechnet:

$$s_{ges} = 2 * s_{P1} + 2 * s_{P2} + 2 * s_{P3} = \frac{v_{eff}^2}{a} + \frac{a * v_{eff}}{r} \quad (7-28)$$

Daraus leitet sich die Berechnung für die effektive Geschwindigkeit v_{eff} ab:

$$v_{eff_{1/2}} = \frac{-\frac{a}{r} \pm \sqrt{\frac{a^2}{r^2} + \frac{4s_{ges}}{a}}}{\frac{2}{a}} \quad (7-29)$$

Da für die Strecke positive Werte eingesetzt werden und die Lösung für die Geschwindigkeit nicht negativ werden kann, bleibt als Lösung für die effektive Geschwindigkeit v_{eff} :

$$v_{eff} = -\frac{a^2}{2r} + \frac{a}{2} \sqrt{\frac{a^2}{r^2} + \frac{4s_{ges}}{a}} \quad (7-30)$$

Damit ist der Zeitbedarf t_{oVerz} :

$$t_{oVerz} = \frac{1}{2} * \frac{a}{r} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{a^2}{r^2} + \frac{4s_{ges}}{a}} \quad (7-31)$$

B.5 Berechnen des gesuchten Zeitbedarfs der Fahrt für den 3. Fall, bis die Verzögerung einsetzt

Beim 3. Fall setzt die Verzögerung nach der 4. Phase ein. Die Fahrt besteht beim 3. Fall aus allen Phasen. Der Zeitbedarf t_{oVerz} berechnet sich wie folgt:

$$t_{oVerz} = t_{p1} + t_{p2} + t_{p3} + t_{p4} \quad (7-32)$$

Der Zeitbedarf der Phase mit konstanter Geschwindigkeit t_{p4} ist:

$$t_{p4} = \frac{s_{p4}}{v} = \frac{s_{ges} - s_{p1} - s_{p2} - s_{p3} - s_{p5} - s_{p6} - s_{p7}}{v} \quad (7-33)$$

Mit: $s_{SBv} = s_{p1} + s_{p2} + s_{p3} + s_{p5} + s_{p6} + s_{p7} = \frac{v^2}{a} + \frac{a*v}{r}$

Ist der gesuchte Zeitbedarf t_{oVerz} :

$$t_{oVerz} = 2 * \frac{a}{r} + \frac{v}{a} - \frac{a}{r} + \frac{s_{ges} - \frac{v^2}{a} - \frac{a*v}{r}}{v} = \frac{s_{ges}}{v} \quad (7-34)$$

B.6 Berechnung der Teststrecke der 2. Achse für die erweiterte Achssteuerung

Die Teststrecke s_{testA2} der 2. Achse berechnet sich zu:

$$s_{testA2} = s_{p1} + s_{p3} + s_{p4} + s_{p5} + s_{p7} = 2 * s_{p1} + 2 * s_{p3} + s_{p4} = s_{SBa} + s_{p4} \quad (7-35)$$

Mit:

$$s_{p4} = v_{Gr} * \left(t_{oVerz} - 4 * \frac{a}{r} \right) = \frac{a^2}{r} * t_{oVerz} - 4 * \frac{a^3}{r^2} \quad (7-36)$$

$$s_{testA2} = \frac{a^2}{r} * t_{oVerz} - 2 * \frac{a^3}{r^2} \quad (7-37)$$

B.7 Berechnung der reduzierten Geschwindigkeit der erweiterten Achssteuerung für den 2. Fall

Beim **2. Fall** sind die Zeit t_{gesA2} und die Strecke s_{A2} gegeben. Die gesamte Fahrzeit setzt sich aus den Zeiten der Fahrkurvenphasen 1, 3, 4, 5 und 7 zusammen. Die reduzierte Geschwindigkeit berechnet sich dann:

$$t_{gesA2} = t_{overz} = t_{p1} + t_{p3} + t_{p4} + t_{p5} + t_{p7} \quad (7-38)$$

$$t_{p1} = t_{p3} = t_{p5} = t_{p7} \quad (7-39)$$

$$s_{A2} = s_{p1} + s_{p3} + s_{p4} + s_{p5} + s_{p7} \quad (7-40)$$

$$s_{p1} = s_{p7}, s_{p3} = s_{p5} \quad (7-41)$$

Dann ist der Zeitbedarf t_{p1} der Phase 1:

$$t_{p1} = \sqrt{\frac{v_{opt}}{r}} \quad (7-42)$$

Dann ist der gesamte Zeitbedarf t_{gesA2} :

$$t_{gesA2} = 4 * t_{p1} + t_{p4} = 4 * \sqrt{\frac{v_{opt}}{r}} + t_{p4} \quad (7-43)$$

Daraus errechnet sich der Zeitbedarf t_4 für die Phase 4:

$$t_{p4} = t_{gesA2} - 4 * \sqrt{\frac{v_{opt}}{r}} \quad (7-44)$$

$$s_{A2} = 2 * (s_{p1} + s_{p3}) + s_{p4} \quad (7-45)$$

$$s_{p1} = \frac{1}{6} * r * t_{p1}^3 \quad (7-46)$$

$$s_{p3} = v_{03} * t_{p3} + \frac{1}{2} * a_{03} * t_{p3}^2 - \frac{1}{6} * r * t_{p3}^3 \quad (7-47)$$

Mit:

$$v_{03} = \frac{1}{2} * r * t_{P1}^2 \quad (7-48)$$

$$a_{03} = r * t_{P1} \quad (7-49)$$

$$s_{P4} = t_{P4} * v_{opt} \quad (7-50)$$

Führt zu:

$$s_{A2} = 2 * (s_{P1} + s_{P3}) + s_{P4} \quad (7-51)$$

$$= 2 * \left(\frac{1}{6} * r * t_{P1}^3 + v_{03} * t_{P3} + \frac{1}{2} * a_{03} * t_{P3}^2 - \frac{1}{6} * r * t_{P3}^3 \right) + t_{P4} * v_{opt} \quad (7-52)$$

$$= 2 * r * t_{P1}^3 + t_{P4} * v_{opt} \quad (7-53)$$

$$= 2 * r * \sqrt{\frac{v_{opt}^3}{r^3}} + \left(t_{gesA2} - 4 * \sqrt{\frac{v_{opt}}{r}} \right) * v_{opt} \quad (7-54)$$

$$s_{A2} = t_{gesA2} * v_{opt} - 2 * \sqrt{\frac{v_{opt}^3}{r}} \quad | - t_{gesA2} * v_{opt} \quad | * (-1) \quad (7-55)$$

$$2 * \sqrt{\frac{v_{opt}^3}{r}} = t_{gesA2} * v_{opt} - s_{A2} \quad |^2 \quad (7-56)$$

$$0 = 4 * \frac{v_{opt}^3}{r} - t_{gesA2}^2 * v_{opt}^2 + 2 * t_{gesA2} * v_{opt} * s_{A2} - s_{A2}^2 \quad (7-57)$$

Um die Nullstellen zu berechnen, wird das Newton-Rapshon-Verfahren angewendet:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad \text{hier mit } x = v_{opt} \quad (7-58)$$

$$f(v) = 4 * \frac{v^3}{r} - t_{gesA2}^2 * v^2 + 2 * t_{gesA2} * v * s_{A2} - s_{A2}^2 \quad (7-59)$$

$$f'(v) = \frac{8}{r} v^2 - 2 * t_{gesA2}^2 * v + 2 * t_{gesA2} * s_{A2} \quad (7-60)$$

$$v_{n+1} = v_n - \frac{f(v_n)}{f'(v_n)} = v_n - \frac{4 * \frac{v_n^3}{r} - t_{gesA2}^2 * v_n^2 + 2 * t_{gesA2} * v_n * s_{A2} - s_{A2}^2}{\frac{8}{r} v_n^2 - 2 * t_{gesA2}^2 * v_n + 2 * t_{gesA2} * s_{A2}} \quad (7-61)$$

Mit diesem Verfahren werden drei Nullstellen gesucht. Diese werden entweder wegen der Randbedingungen für die Geschwindigkeit aussortiert oder mittels Probe auf Richtigkeit getestet. Zur Probe wird mit den berechneten Geschwindigkeiten die Strecke für eine Fahrbewegung mit den Phasen 1, 3, 4, 5 und 7 ermittelt:

$$s_{ges} = 2 * v * \sqrt{\frac{v}{r}} + \left(t_{ges} - 4 * \sqrt{\frac{v}{r}} \right) * v \quad (7-62)$$

B.8 Berechnung der reduzierten Geschwindigkeit der erweiterten Achssteuerung für den 3. Fall

Beim **3. Fall** sind die Zeit t_{gesA2} und die Strecke s_{A2} gegeben. Die Fahrkurve setzt sich aus allen 7 Phasen zusammen. Die optimierte Geschwindigkeit berechnet sich folgendermaßen:

$$t_{gesA2} = t_{oVerz} = t_{p1} + t_{p2} + t_{p3} + t_{p4} + t_{p5} + t_{p6} + t_{p7} \quad (7-63)$$

$$t_{pi} \geq 0 \quad (7-64)$$

$$t_{p1} = t_{p3} = t_{p5} = t_{p7} \quad (7-65)$$

$$t_{p2} = t_{p6} \quad (7-66)$$

$$t_{gesA2} = 4 * t_{p1} + 2 * t_{p2} + t_{p4} \quad (7-67)$$

Die gesamte Fahrstrecke ist bei einer Fahrt:

$$s_{A2} = s_{P1} + s_{P2} + s_{P3} + s_{P4} + s_{P5} + s_{P6} + s_{P7} \quad (7-68)$$

Mit:

$$s_{P1} = s_{P7}, s_{P2} = s_{P6}, s_{P3} = s_{P5} \quad (7-69)$$

Wenn die vorgegebene Beschleunigung erreicht wird, ist:

$$a_{eff} = a \text{ und } t_{P1} = \frac{a}{r} \quad (7-70)$$

$$t_{P2} = \frac{v_{opt} - \Delta v_{P1} - \Delta v_{P3}}{a} = \frac{v_{opt}}{a} - \frac{a}{r} \quad (7-71)$$

Der Zeitbedarf in der Phase 4 ist:

$$t_4 = \frac{s_{A2} - 2 * s_{1-3}}{v_{opt}} \quad (7-72)$$

Die Strecke in der Phasen 1-3 ist:

$$s_{1-3} = \frac{1}{6} * r * t_{P1}^3 + v_{02} * t_{P2} + \frac{1}{2} * a * t_{P2}^2 + v_{03} * t_{P3} + \frac{1}{2} * a * t_{P3}^2 - \frac{1}{6} * r * t_{P3}^3 \quad (7-73)$$

$$s_{1-3} = v_{02} * t_{P2} + \frac{1}{2} * a * t_{P2}^2 + (v_{opt} - \frac{1}{2} * r * t_{P3}^2) * \frac{a}{r} + \frac{1}{2} * \frac{a^3}{r^2} \quad (7-74)$$

$$\begin{aligned} s_{1-3} &= v_{02} * t_{P2} + \frac{1}{2} * a * t_{P2}^2 + \frac{a * v_{opt}}{r} \\ &= \frac{1}{2} * \frac{a^2}{r} * \left(\frac{v_{opt}}{a} - \frac{a}{r} \right) + \frac{1}{2} * a * \left(\frac{v_{opt}}{a} - \frac{a}{r} \right)^2 + \frac{a * v_{opt}}{r} \end{aligned} \quad (7-75)$$

$$s_{1-3} = \frac{1}{2} * \frac{a * v_{opt}}{r} + \frac{1}{2} * \frac{v_{opt}^2}{a} \quad (7-76)$$

$$t_4 = \frac{S_{A2} - 2 * \left(\frac{1}{2} * \frac{a * v_{opt}}{r} + \frac{1}{2} * \frac{v_{opt}^2}{a} \right)}{v_{opt}} = \frac{S_{A2} - \frac{a * v_{opt}}{r} - \frac{v_{opt}^2}{a}}{v_{opt}} \quad (7-77)$$

$$= \frac{S_{A2}}{v_{opt}} - \frac{a}{r} - \frac{v_{opt}}{a}$$

$$t_{gesA2} = 4 * \frac{a}{r} + 2 * \left(\frac{v_{opt}}{a} - \frac{a}{r} \right) + \frac{S_{A2}}{v_{opt}} - \frac{a}{r} - \frac{v_{opt}}{a} = \frac{a}{r} + \frac{v_{opt}}{a} + \frac{S_{A2}}{v_{opt}} \quad (7-78)$$

$$0 = \frac{v_{opt}}{a} + \frac{S_{A2}}{v_{opt}} + \frac{a}{r} - t_{gesA2} \quad (7-79)$$

$$0 = \frac{1}{a} * v_{opt}^2 + \left(\frac{a}{r} - t_{gesA2} \right) * v_{opt} + S_{A2} \quad (7-80)$$

$$v_{opt1/2} = \frac{-\frac{a}{r} + t_{gesA2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{r} - t_{gesA2} \right)^2 - 4 \frac{S_{A2}}{a}}}{\frac{2}{a}} \quad (7-81)$$

Anhang C Technische Daten des Simulationsmodells

Tabelle C-1: Technische Daten RBG

Parameter	Einheit	Ermittlungsmethode
Achssteuerung		H
Masse RBG	[kg]	H
Masse Hubwagen	[kg]	H
Abstand zwischen Riemenaufhängung und LAM Schwerpunkt	[m]	H
Fahrgeschwindigkeit	[m/s]	H
minimale Fahrgeschwindigkeit	[m/s]	H
Beschleunigung FW	[m/s ²]	H
Ruck FW	[m/s ³]	H
Hubgeschwindigkeit	[m/s]	H
minimale Hubgeschwindigkeit	[m/s]	H
Beschleunigung HW	[m/s ²]	H
Ruck HW	[m/s ³]	H
Laufreddurchmesser FW	[m]	H
Rollwiderstandsbeiwert Laufrad		H
Kraft der Gegendruckrollen 1	[N]	H
Kraft der Gegendruckrollen 2	[N]	H
Geschwindigkeitsabhängiger Fahrwiderstand	[N/(m/s)]	M
Wirkungsgrad Fahrwerksriemen		H
Massenträgheitsmoment Laufrad	[kgm ²]	B
Massenträgheitsmoment Getriebe FW	[kgm ²]	H
Wirkungsgrad Getriebe FW		H
Getriebeübersetzung FW		H
Wirkungsgradreduzierung Getriebe FW bei generatorischem Betrieb		M/H
Nennleistung Antrieb FW	[W]	H
Massenträgheitsmoment Antrieb FW	[kgm ²]	H
Wirkungsgrad Antrieb FW		H/M
Nennmoment Antrieb FW	[Nm]	H
Nennstrom Antrieb FW		H
Grundmagnetisierungsstrom Antrieb FW		H
Bremsenöffnungszeit FW	[s]	H
Bremsenwartezeit FW	[s]	H
Nennstrom Umrichter FW		H

Parameter	Einheit	Ermittlungsmethode
Grundverlustleistung Umrichter FW	[W]	H
Nennverlustleistung Umrichter FW	[W]	H
Radius Zahnriemenscheibe/Seiltrommel HW	[m]	H
Wirkungsgrad Hubriementrieb/Seiltrieb		H/B
Geschwindigkeitsabhängiger Hubwiderstand	[N/(m/s)]	M
Rollwiderstandsbeiwert Rollen HW		H/B
y-Rollenabstand Laufrollen HW	[m]	H
Untersetzung Seiltrieb HW		H
Massenträgheitsmoment Hubriemen-/Seiltrieb	[kgm ²]	B
Massenträgheitsmoment Getriebe HW	[kgm ²]	H
Wirkungsgrad Getriebe HW		H
Getriebeübersetzung HW		H
Wirkungsgradreduzierung Getriebe HW bei generatorischem Betrieb		M
Nennleistung Antrieb HW	[W]	H
Massenträgheitsmoment Antrieb HW	[kgm ²]	H
Wirkungsgrad Antrieb HW		H/M
Nennmoment Antrieb HW	[Nm]	H
Nennstrom Antrieb HW		H
Grundmagnetisierungsstrom Antrieb HW		H
Bremsenöffnungszeit HW	[s]	H
Bremsenwartezeit HW	[s]	H
Nennstrom Umrichter HW		H
Grundverlustleistung Umrichter HW	[W]	H
Nennverlustleistung Umrichter HW	[W]	H
Zwischenkreiskonfiguration		H
Konstante Verlustleistung mitfahrender Schaltschrank	[W]	M
Grundverlust bei geöffneten Bremsen	[W]	M
Nennleistung Rückspeiseeinheit	[W]	H
Nennverlustleistung Rückspeiseeinheit	[W]	H
Grundverlustleistung Rückspeiseeinheit	[W]	H
Wirkungsgrad Rückspeisung		H
Phasenverschiebung		H
Nennstrom zusätzliche Verbraucher		H
Nennverlustleistung zusätzliche Verbraucher	[W]	H
Grundverlustleistung zusätzliche Verbraucher	[W]	H

Anhang D Quantile der t-Verteilung

F(x) v	0.9000	0.9500	0.9750	0.9900	0.9950	0.9995
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.941
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
40	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
60	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
120	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373
∞	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291

Abbildung D-1: Quantile der t-Verteilung bei v Freiheitsgraden [Eck-1992, S. 608]

Anhang E Simulationsergebnisse

E.1 Screening Versuchsplan AKL

Tabelle E-1: Screening Versuchsplan AKL

StdRfolge	Gassen	LSP	LGG	Dynamik Parameter	Zuladung	Wegoptimierung	Achskopplung	Achssteuerung	Regal	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Durchsatzleistung	Maximaler Leistungsbedarf [kW]	Maximaler Leistungsmittelwert [kW]
1	2	20%	20%	1	0	Ohne	ERS	Erweitert	14x80	95	4	42,3	94,99	4,07
2	10	20%	20%	1	0	Ohne	ZK	Einfach	14x80	96	16	29,0	97,90	16,34
3	2	2000%	20%	1	0	Ohne	ZK	Erweitert	14x80	1600	4	39,8	96,25	4,06
4	10	2000%	20%	1	0	Ohne	ERS	Einfach	14x80	1629	16	34,7	243,49	16,36
5	2	20%	2000%	1	0	Ohne	ZK	Einfach	7x20	62	179	247,2	61,90	8,68
6	10	20%	2000%	1	0	Ohne	ERS	Erweitert	7x20	65	889	215,4	68,65	31,75
7	2	2000%	2000%	1	0	Ohne	ERS	Einfach	7x20	1062	179	248,0	82,70	7,22
8	10	2000%	2000%	1	0	Ohne	ZK	Erweitert	7x20	1047	889	234,8	160,79	39,92
9	2	20%	20%	2	0	Ohne	ZK	Erweitert	7x20	49	2	50,7	48,72	2,07
10	10	20%	20%	2	0	Ohne	ERS	Einfach	7x20	52	8	41,1	55,97	8,38
11	2	2000%	20%	2	0	Ohne	ERS	Erweitert	7x20	833	2	60,0	56,29	2,07
12	10	2000%	20%	2	0	Ohne	ZK	Einfach	7x20	823	8	36,5	116,37	8,36
13	2	20%	2000%	2	0	Ohne	ERS	Einfach	14x80	65	204	143,2	62,35	8,80
14	10	20%	2000%	2	0	Ohne	ZK	Erweitert	14x80	67	1011	129,0	69,91	43,48
15	2	2000%	2000%	2	0	Ohne	ZK	Einfach	14x80	1091	204	138,7	59,03	9,54
16	10	2000%	2000%	2	0	Ohne	ERS	Erweitert	14x80	1112	1011	138,4	141,97	42,46
17	2	20%	20%	1	0	ABCELOULO	ERS	Einfach	7x20	63	2	74,8	60,87	2,07
18	10	20%	20%	1	0	ABCELOULO	ZK	Erweitert	7x20	64	9	57,2	66,03	9,30
19	2	2000%	20%	1	0	ABCELOULO	ZK	Einfach	7x20	1044	2	62,7	60,96	2,06
20	10	2000%	20%	1	0	ABCELOULO	ERS	Erweitert	7x20	1064	9	65,7	130,29	9,32
21	2	20%	2000%	1	0	ABCELOULO	ZK	Erweitert	14x80	94	309	213,2	93,90	11,76
22	10	20%	2000%	1	0	ABCELOULO	ERS	Einfach	14x80	98	1534	195,7	100,34	45,56
23	2	2000%	2000%	1	0	ABCELOULO	ERS	Erweitert	14x80	1626	309	209,7	113,15	9,93
24	10	2000%	2000%	1	0	ABCELOULO	ZK	Einfach	14x80	1602	1534	205,3	225,45	56,68
25	2	20%	20%	2	0	ABCELOULO	ZK	Einfach	14x80	64	3	56,8	62,25	3,06
26	10	20%	20%	2	0	ABCELOULO	ERS	Erweitert	14x80	68	11	43,5	70,74	11,36
27	2	2000%	20%	2	0	ABCELOULO	ERS	Einfach	14x80	1109	3	69,2	58,76	3,06
28	10	2000%	20%	2	0	ABCELOULO	ZK	Erweitert	14x80	1094	11	39,1	123,16	11,34
29	2	20%	2000%	2	0	ABCELOULO	ERS	Erweitert	7x20	50	154	268,0	49,87	4,81
30	10	20%	2000%	2	0	ABCELOULO	ZK	Einfach	7x20	52	740	249,0	54,16	25,88
31	2	2000%	2000%	2	0	ABCELOULO	ZK	Erweitert	7x20	820	154	268,3	54,05	5,84
32	10	2000%	2000%	2	0	ABCELOULO	ERS	Einfach	7x20	836	740	257,0	111,33	23,65

Anhang E Simulationsergebnisse

StdRfolge	Gassen	LSP	LGG	Dynamik Parameter	Zuladung	Wegoptimierung	Achskopplung	Achssteuerung	Regal	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Durchsatzleistung	Maximaler Leistungsbedarf [kW]	Maximaler Leistungsmittelwert [kW]
33	2	20%	20%	1	100	Ohne	ERS	Einfach	7x20	63	2	48,0	62,98	2,07
34	10	20%	20%	1	100	Ohne	ZK	Erweitert	7x20	64	9	34,7	67,33	9,35
35	2	2000%	20%	1	100	Ohne	ZK	Einfach	7x20	1044	2	39,8	77,11	2,07
36	10	2000%	20%	1	100	Ohne	ERS	Erweitert	7x20	1064	9	42,2	187,69	9,38
37	2	20%	2000%	1	100	Ohne	ZK	Erweitert	14x80	94	309	162,5	93,91	15,08
38	10	20%	2000%	1	100	Ohne	ERS	Einfach	14x80	98	1534	144,6	100,75	59,35
39	2	2000%	2000%	1	100	Ohne	ERS	Erweitert	14x80	1626	309	163,3	109,52	13,20
40	10	2000%	2000%	1	100	Ohne	ZK	Einfach	14x80	1602	1534	159,1	256,79	73,64
41	2	20%	20%	2	100	Ohne	ZK	Einfach	14x80	64	3	35,2	63,68	3,06
42	10	20%	20%	2	100	Ohne	ERS	Erweitert	14x80	68	11	24,7	69,85	11,40
43	2	2000%	20%	2	100	Ohne	ERS	Einfach	14x80	1109	3	38,2	78,20	3,07
44	10	2000%	20%	2	100	Ohne	ZK	Erweitert	14x80	1094	11	23,3	152,46	11,36
45	2	20%	2000%	2	100	Ohne	ERS	Erweitert	7x20	50	154	240,3	49,94	6,31
46	10	20%	2000%	2	100	Ohne	ZK	Einfach	7x20	52	740	210,4	54,30	31,61
47	2	2000%	2000%	2	100	Ohne	ZK	Erweitert	7x20	820	154	241,0	58,90	7,23
48	10	2000%	2000%	2	100	Ohne	ERS	Einfach	7x20	836	740	233,3	121,61	30,64
49	2	20%	20%	1	100	ABCELOULO	ERS	Erweitert	14x80	95	4	71,5	94,74	4,05
50	10	20%	20%	1	100	ABCELOULO	ZK	Einfach	14x80	96	16	47,8	97,75	16,30
51	2	2000%	20%	1	100	ABCELOULO	ZK	Erweitert	14x80	1600	4	63,2	101,65	4,05
52	10	2000%	20%	1	100	ABCELOULO	ERS	Einfach	14x80	1629	16	58,5	234,50	16,31
53	2	20%	2000%	1	100	ABCELOULO	ZK	Einfach	7x20	62	179	270,5	60,19	6,49
54	10	20%	2000%	1	100	ABCELOULO	ERS	Erweitert	7x20	65	889	248,8	67,02	25,99
55	2	2000%	2000%	1	100	ABCELOULO	ERS	Einfach	7x20	1062	179	268,7	67,80	5,68
56	10	2000%	2000%	1	100	ABCELOULO	ZK	Erweitert	7x20	1047	889	255,6	139,62	30,32
57	2	20%	20%	2	100	ABCELOULO	ZK	Erweitert	7x20	49	2	70,5	48,36	2,06
58	10	20%	20%	2	100	ABCELOULO	ERS	Einfach	7x20	52	8	56,8	54,25	8,37
59	2	2000%	20%	2	100	ABCELOULO	ERS	Erweitert	7x20	833	2	79,5	55,24	2,06
60	10	2000%	20%	2	100	ABCELOULO	ZK	Einfach	7x20	823	8	49,4	95,24	8,35
61	2	20%	2000%	2	100	ABCELOULO	ERS	Einfach	14x80	65	204	197,5	64,87	7,97
62	10	20%	2000%	2	100	ABCELOULO	ZK	Erweitert	14x80	67	1011	178,6	69,33	40,02
63	2	2000%	2000%	2	100	ABCELOULO	ZK	Einfach	14x80	1091	204	196,0	71,34	9,11
64	10	2000%	2000%	2	100	ABCELOULO	ERS	Erweitert	14x80	1112	1011	190,7	153,62	37,49

E.2 Screening Versuchsplan APL

Tabelle E-2: Screening Versuchsplan APL

Stuffolge	Gassen	LSP	LGG	Dynamik Parameter	Zuladung	Wegoptimierung	Achskopplung	Achs- steuerung	Regal	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Durchsatzleistung	Maximaler Leistungs- bedarf [kW]	Maximaler Leistungs- mittelwert [kW]
1	2	20%	20%	1	0	ohne	ERS	Erweitert	35x100	127	6	16,4	125,52	6,00
2	10	20%	20%	1	0	ohne	ZK	Einfach	35x100	295	26	12,1	294,93	25,99
3	2	2000%	20%	1	0	ohne	ZK	Erweitert	35x100	2184	6	14,3	130,18	6,00
4	10	2000%	20%	1	0	ohne	ERS	Einfach	35x100	19012	26	13,7	515,77	25,99
5	2	20%	2000%	1	0	ohne	ZK	Einfach	15x40	87	296	71,0	86,70	11,15
6	10	20%	2000%	1	0	ohne	ERS	Erweitert	15x40	206	1331	71,1	195,99	47,09
7	2	2000%	2000%	1	0	ohne	ERS	Einfach	15x40	1514	296	70,6	97,26	10,52
8	10	2000%	2000%	1	0	ohne	ZK	Erweitert	15x40	12910	1331	71,1	231,56	53,64
9	2	20%	20%	2	0	ohne	ZK	Erweitert	15x40	47	3	16,6	45,96	3,00
10	10	20%	20%	2	0	ohne	ERS	Einfach	15x40	112	12	13,6	109,67	12,00
11	2	2000%	20%	2	0	ohne	ERS	Erweitert	15x40	809	3	19,1	46,63	3,00
12	10	2000%	20%	2	0	ohne	ZK	Einfach	15x40	6892	12	11,9	148,34	12,00
13	2	20%	2000%	2	0	ohne	ERS	Einfach	35x100	73	369	40,1	72,83	13,11
14	10	20%	2000%	2	0	ohne	ZK	Erweitert	35x100	171	1790	39,1	170,90	67,76
15	2	2000%	2000%	2	0	ohne	ZK	Einfach	35x100	1251	369	39,7	83,86	14,59
16	10	2000%	2000%	2	0	ohne	ERS	Erweitert	35x100	10885	1790	38,9	267,25	63,29
17	2	20%	20%	1	1000	ohne	ERS	Einfach	15x40	88	3	15,0	87,72	3,00
18	10	20%	20%	1	1000	ohne	ZK	Erweitert	15x40	204	14	11,7	203,98	14,00
19	2	2000%	20%	1	1000	ohne	ZK	Einfach	15x40	1499	3	12,4	120,24	3,00
20	10	2000%	20%	1	1000	ohne	ERS	Erweitert	15x40	13044	14	13,9	274,87	14,00
21	2	20%	2000%	1	1000	ohne	ZK	Erweitert	35x100	126	506	50,7	125,88	24,38
22	10	20%	2000%	1	1000	ohne	ERS	Einfach	35x100	298	2503	51,3	298,87	103,83
23	2	2000%	2000%	1	1000	ohne	ERS	Erweitert	35x100	2207	506	51,3	173,82	22,08
24	10	2000%	2000%	1	1000	ohne	ZK	Einfach	35x100	18817	2503	51,2	525,89	117,75
25	2	20%	20%	2	1000	ohne	ZK	Einfach	35x100	73	4	7,7	72,66	4,00
26	10	20%	20%	2	1000	ohne	ERS	Erweitert	35x100	172	18	8,4	173,13	18,00
27	2	2000%	20%	2	1000	ohne	ERS	Einfach	35x100	1264	4	8,9	80,63	4,00
28	10	2000%	20%	2	1000	ohne	ZK	Erweitert	35x100	10773	18	7,0	251,95	18,00
29	2	20%	2000%	2	1000	ohne	ERS	Erweitert	15x40	47	250	59,9	46,99	10,31
30	10	20%	2000%	2	1000	ohne	ZK	Einfach	15x40	111	1141	61,6	111,96	56,62
31	2	2000%	2000%	2	1000	ohne	ZK	Erweitert	15x40	800	250	60,7	57,77	11,99
32	10	2000%	2000%	2	1000	ohne	ERS	Einfach	15x40	6964	1141	62,7	176,22	48,07
33	2	20%	20%	1	0	optimiert	ERS	Einfach	15x40	88	3	24,0	77,43	3,00
34	10	20%	20%	1	0	optimiert	ZK	Erweitert	15x40	204	14	20,4	166,35	14,00
35	2	2000%	20%	1	0	optimiert	ZK	Einfach	15x40	1499	3	21,7	93,85	3,00
36	10	2000%	20%	1	0	optimiert	ERS	Erweitert	15x40	13044	14	23,7	151,06	14,00

Anhang E Simulationsergebnisse

StdRfolge	Gassen	LSP	LGG	Dynamik Parameter	Zuladung	Wegoptimierung	Achskopplung	Achs- steuerung	Regal	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Durchsatzleistung	Maximaler Leistungs- bedarf [kW]	Maximaler Leistungs- mittelwert [kW]
37	2	20%	2000%	1	0	optimiert	ZK	Erweitert	35x100	126	506	64,0	125,91	17,51
38	10	20%	2000%	1	0	optimiert	ERS	Einfach	35x100	298	2503	63,9	298,08	76,01
39	2	2000%	2000%	1	0	optimiert	ERS	Erweitert	35x100	2207	506	65,3	136,71	14,57
40	10	2000%	2000%	1	0	optimiert	ZK	Einfach	35x100	18817	2503	64,1	301,34	90,58
41	2	20%	20%	2	0	optimiert	ZK	Einfach	35x100	73	4	12,9	72,99	4,00
42	10	20%	20%	2	0	optimiert	ERS	Erweitert	35x100	172	18	14,6	171,99	18,01
43	2	2000%	20%	2	0	optimiert	ERS	Einfach	35x100	1264	4	16,1	72,16	4,00
44	10	2000%	20%	2	0	optimiert	ZK	Erweitert	35x100	10773	18	13,5	223,69	17,99
45	2	20%	2000%	2	0	optimiert	ERS	Erweitert	15x40	47	250	73,4	46,84	7,56
46	10	20%	2000%	2	0	optimiert	ZK	Einfach	15x40	111	1141	73,5	111,73	42,17
47	2	2000%	2000%	2	0	optimiert	ZK	Erweitert	15x40	800	250	74,0	45,74	8,01
48	10	2000%	2000%	2	0	optimiert	ERS	Einfach	15x40	6964	1141	74,1	165,41	35,83
49	2	20%	20%	1	1000	optimiert	ERS	Erweitert	35x100	127	6	22,6	126,37	6,00
50	10	20%	20%	1	1000	optimiert	ZK	Einfach	35x100	295	26	15,0	295,47	26,00
51	2	2000%	20%	1	1000	optimiert	ZK	Erweitert	35x100	2184	6	18,7	116,87	6,00
52	10	2000%	20%	1	1000	optimiert	ERS	Einfach	35x100	19012	26	18,6	344,72	25,99
53	2	20%	2000%	1	1000	optimiert	ZK	Einfach	15x40	87	296	81,3	86,94	10,89
54	10	20%	2000%	1	1000	optimiert	ERS	Erweitert	15x40	206	1331	80,4	205,76	44,89
55	2	2000%	2000%	1	1000	optimiert	ERS	Einfach	15x40	1514	296	81,3	112,17	9,74
56	10	2000%	2000%	1	1000	optimiert	ZK	Erweitert	15x40	12910	1331	80,6	241,88	54,00
57	2	20%	20%	2	1000	optimiert	ZK	Erweitert	15x40	47	3	19,6	46,86	3,01
58	10	20%	20%	2	1000	optimiert	ERS	Einfach	15x40	112	12	16,4	112,38	12,00
59	2	2000%	20%	2	1000	optimiert	ERS	Erweitert	15x40	809	3	23,1	63,46	3,00
60	10	2000%	20%	2	1000	optimiert	ZK	Einfach	15x40	6892	12	13,9	153,58	12,00
61	2	20%	2000%	2	1000	optimiert	ERS	Einfach	35x100	73	369	51,4	72,98	13,79
62	10	20%	2000%	2	1000	optimiert	ZK	Erweitert	35x100	171	1790	51,8	171,84	71,19
63	2	2000%	2000%	2	1000	optimiert	ZK	Einfach	35x100	1251	369	51,4	110,36	15,32
64	10	2000%	2000%	2	1000	optimiert	ERS	Erweitert	35x100	10885	1790	51,7	267,54	64,14

E.3 Hauptuntersuchung AKL

Tabelle E-3: Simulationsergebnisse Hauptuntersuchung AKL

Standardreihenfolge	Durchlaufreihenfolge	LSP [%]	LGG [%]	Anzahl Gassen	Achskopplung	Regal [HxL]	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Max. Leistungsmittelwert mit LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Max. Leistungsmittelwert ohne LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Durchsatzleistung ohne LM	Durchsatzleistung mit LM	Relative Durchsatzleistung [%]
1	241	10	25	2	ZK	7x20	55,31	2,26	2,25	54,87	9,04	92,02	257,3	46,0	17,88%
2	225	10	25	2	ZK	14x80	84,40	3,84	3,83	83,87	15,38	120,94	167,7	36,1	21,54%
3	209	10	25	2	ERS	7x20	56,22	1,98	1,97	56,04	7,91	96,01	257,6	42,7	16,57%
4	193	10	25	2	ERS	14x80	85,79	3,40	3,39	85,28	13,58	122,32	167,3	33,0	19,72%
5	177	10	25	3	ZK	7x20	60,69	3,41	3,39	60,65	13,63	110,76	258,4	44,7	17,31%
6	161	10	25	3	ZK	14x80	92,42	5,74	5,72	93,39	22,95	146,97	167,6	34,8	20,77%
7	145	10	25	3	ERS	7x20	61,69	2,88	2,86	61,78	11,53	107,99	258,6	41,9	16,18%
8	129	10	25	3	ERS	14x80	93,94	5,07	5,05	93,86	20,26	164,95	168,5	32,8	19,47%
9	113	10	25	5	ZK	7x20	71,22	5,73	5,69	71,74	22,93	145,27	257,4	48,1	18,70%
10	97	10	25	5	ZK	14x80	108,24	9,54	9,52	108,18	38,18	177,99	168,4	36,0	21,38%
11	81	10	25	5	ERS	7x20	72,38	4,76	4,73	72,38	19,05	170,44	257,6	40,9	15,87%
12	65	10	25	5	ERS	14x80	110,01	8,31	8,28	109,95	33,24	228,07	168,4	33,7	20,04%
13	49	10	25	10	ZK	7x20	97,73	11,24	11,17	99,85	44,97	209,28	257,2	47,3	18,38%
14	33	10	25	10	ZK	14x80	147,97	18,95	18,90	148,93	75,81	403,88	167,3	34,8	20,79%
15	17	10	25	10	ERS	7x20	99,30	9,42	9,35	100,20	37,70	209,74	257,5	42,1	16,34%
16	1	10	25	10	ERS	14x80	150,38	16,82	16,76	150,56	67,29	320,39	167,9	34,9	20,79%
17	245	10	50	2	ZK	7x20	55,31	4,52	4,48	55,19	9,04	92,02	257,3	120,7	46,89%
18	229	10	50	2	ZK	14x80	84,40	7,69	7,66	84,34	15,38	120,94	167,7	80,6	48,05%
19	213	10	50	2	ERS	7x20	56,22	3,96	3,92	56,21	7,91	96,01	257,6	120,2	46,68%
20	197	10	50	2	ERS	14x80	85,79	6,79	6,76	85,71	13,58	122,32	167,3	79,4	47,48%
21	181	10	50	3	ZK	7x20	60,69	6,82	6,75	60,67	13,63	110,76	258,4	118,5	45,86%
22	165	10	50	3	ZK	14x80	92,42	11,48	11,44	92,36	22,95	146,97	167,6	79,3	47,28%
23	149	10	50	3	ERS	7x20	61,69	5,77	5,71	61,67	11,53	107,99	258,6	115,3	44,57%
24	133	10	50	3	ERS	14x80	93,94	10,13	10,09	94,65	20,26	164,95	168,5	78,0	46,29%
25	117	10	50	5	ZK	7x20	71,22	11,47	11,36	71,73	22,93	145,27	257,4	121,8	47,33%
26	101	10	50	5	ZK	14x80	108,24	19,09	19,01	108,62	38,18	177,99	168,4	80,8	48,02%
27	85	10	50	5	ERS	7x20	72,38	9,53	9,43	72,77	19,05	170,44	257,6	113,5	44,05%
28	69	10	50	5	ERS	14x80	110,01	16,62	16,55	110,24	33,24	228,07	168,4	78,4	46,59%
29	53	10	50	10	ZK	7x20	97,73	22,48	22,27	98,64	44,97	209,28	257,2	117,9	45,86%
30	37	10	50	10	ZK	14x80	147,97	37,91	37,76	148,62	75,81	403,88	167,3	79,2	47,32%
31	21	10	50	10	ERS	7x20	99,30	18,85	18,64	100,01	37,70	209,74	257,5	113,6	44,09%
32	5	10	50	10	ERS	14x80	150,38	33,64	33,50	151,32	67,29	320,39	167,9	80,3	47,80%
33	249	10	75	2	ZK	7x20	55,31	6,78	6,71	55,26	9,04	92,02	257,3	194,4	75,56%
34	233	10	75	2	ZK	14x80	84,40	11,53	11,49	84,39	15,38	120,94	167,7	125,1	74,62%
35	217	10	75	2	ERS	7x20	56,22	5,94	5,87	56,20	7,91	96,01	257,6	196,9	76,45%
36	201	10	75	2	ERS	14x80	85,79	10,19	10,14	85,74	13,58	122,32	167,3	125,3	74,90%
37	185	10	75	3	ZK	7x20	60,69	10,22	10,12	60,69	13,63	110,76	258,4	191,3	74,03%
38	169	10	75	3	ZK	14x80	92,42	17,21	17,15	92,40	22,95	146,97	167,6	124,3	74,15%
39	153	10	75	3	ERS	7x20	61,69	8,65	8,55	61,67	11,53	107,99	258,6	188,2	72,79%
40	137	10	75	3	ERS	14x80	93,94	15,20	15,13	94,10	20,26	164,95	168,5	123,7	73,41%
41	121	10	75	5	ZK	7x20	71,22	17,20	17,03	72,01	22,93	145,27	257,4	192,4	74,75%
42	105	10	75	5	ZK	14x80	108,24	28,63	28,52	108,93	38,18	177,99	168,4	125,2	74,34%
43	89	10	75	5	ERS	7x20	72,38	14,29	14,13	72,87	19,05	170,44	257,6	185,1	71,84%
44	73	10	75	5	ERS	14x80	110,01	24,93	24,82	110,78	33,24	228,07	168,4	124,3	73,81%
45	57	10	75	10	ZK	7x20	97,73	33,72	33,38	98,67	44,97	209,28	257,2	188,9	73,44%
46	41	10	75	10	ZK	14x80	147,97	56,86	56,64	148,90	75,81	403,88	167,3	123,3	73,70%
47	25	10	75	10	ERS	7x20	99,30	28,27	27,94	99,91	37,70	209,74	257,5	185,1	71,88%
48	9	10	75	10	ERS	14x80	150,38	50,46	50,23	151,31	67,29	320,39	167,9	125,8	74,90%

Anhang E Simulationsergebnisse

Standardreihenfolge	Durchlaufreihenfolge	LSP [%]	LGG [%]	Anzahl Gassen	Achskopplung	Regal [HxL]	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Max. Leistungsmittelwert mit LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Max. Leistungsmittelwert ohne LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Durchsatzleistung ohne LM	Durchsatzleistung mit LM	Relative Durchsatzleistung [%]
49	253	10	100	2	ZK	7x20	55,31	9,04	8,72	55,31	9,04	92,02	257,3	244,4	94,99%
50	237	10	100	2	ZK	14x80	84,40	15,38	15,07	84,38	15,38	120,94	167,7	161,8	96,49%
51	221	10	100	2	ERS	7x20	56,22	7,91	7,48	56,16	7,91	96,01	257,6	244,7	95,00%
52	205	10	100	2	ERS	14x80	85,79	13,58	13,14	85,79	13,58	122,32	167,3	162,1	96,88%
53	189	10	100	3	ZK	7x20	60,69	13,63	12,95	60,69	13,63	110,76	258,4	244,3	94,53%
54	173	10	100	3	ZK	14x80	92,42	22,95	22,34	93,05	22,95	146,97	167,6	161,6	96,38%
55	157	10	100	3	ERS	7x20	61,69	11,53	11,24	62,48	11,53	107,99	258,6	244,4	94,50%
56	141	10	100	3	ERS	14x80	93,94	20,26	19,92	93,94	20,26	164,95	168,5	162,3	96,31%
57	125	10	100	5	ZK	7x20	71,22	22,93	21,51	71,52	22,93	145,27	257,4	241,0	93,65%
58	109	10	100	5	ZK	14x80	108,24	38,18	37,00	108,77	38,18	177,99	168,4	161,7	96,07%
59	93	10	100	5	ERS	7x20	72,38	19,05	18,32	72,84	19,05	170,44	257,6	241,2	93,63%
60	77	10	100	5	ERS	14x80	110,01	33,24	32,36	110,76	33,24	228,07	168,4	161,7	96,04%
61	61	10	100	10	ZK	7x20	97,73	44,97	41,32	98,67	44,97	209,28	257,2	232,3	90,35%
62	45	10	100	10	ZK	14x80	147,97	75,81	72,23	148,87	75,81	403,88	167,3	158,0	94,42%
63	29	10	100	10	ERS	7x20	99,30	37,70	34,85	100,18	37,70	209,74	257,5	232,8	90,40%
64	13	10	100	10	ERS	14x80	150,38	67,29	64,04	151,20	67,29	320,39	167,9	159,0	94,69%
65	242	15	25	2	ZK	7x20	57,79	2,26	2,25	57,68	9,04	92,02	257,3	45,9	17,83%
66	226	15	25	2	ZK	14x80	88,20	3,84	3,83	88,12	15,38	120,94	167,7	36,2	21,60%
67	210	15	25	2	ERS	7x20	58,75	1,98	1,97	58,71	7,91	96,01	257,6	42,7	16,57%
68	194	15	25	2	ERS	14x80	89,66	3,40	3,39	89,56	13,58	122,32	167,3	33,0	19,72%
69	178	15	25	3	ZK	7x20	65,66	3,41	3,39	65,58	13,63	110,76	258,4	44,7	17,31%
70	162	15	25	3	ZK	14x80	100,03	5,74	5,72	100,01	22,95	146,97	167,6	34,8	20,77%
71	146	15	25	3	ERS	7x20	66,73	2,88	2,86	66,71	11,53	107,99	258,6	41,9	16,18%
72	130	15	25	3	ERS	14x80	101,68	5,07	5,05	101,53	20,26	164,95	168,5	32,8	19,47%
73	114	15	25	5	ZK	7x20	81,14	5,73	5,69	81,26	22,93	145,27	257,4	48,2	18,72%
74	98	15	25	5	ZK	14x80	123,45	9,54	9,51	123,69	38,18	177,99	168,4	36,0	21,36%
75	82	15	25	5	ERS	7x20	82,47	4,76	4,73	82,70	19,05	170,44	257,6	40,8	15,84%
76	66	15	25	5	ERS	14x80	125,48	8,31	8,28	125,45	33,24	228,07	168,4	33,8	20,09%
77	50	15	25	10	ZK	7x20	120,06	11,24	11,16	120,03	44,97	209,28	257,2	47,3	18,41%
78	34	15	25	10	ZK	14x80	182,20	18,95	18,90	182,31	75,81	403,88	167,3	34,9	20,85%
79	18	15	25	10	ERS	7x20	122,00	9,42	9,35	122,61	37,70	209,74	257,5	42,2	16,37%
80	2	15	25	10	ERS	14x80	185,18	16,82	16,76	185,16	67,29	320,39	167,9	34,9	20,80%
81	246	15	50	2	ZK	7x20	57,79	4,52	4,48	57,69	9,04	92,02	257,3	120,6	46,85%
82	230	15	50	2	ZK	14x80	88,20	7,69	7,66	88,13	15,38	120,94	167,7	80,4	47,98%
83	214	15	50	2	ERS	7x20	58,75	3,96	3,92	58,71	7,91	96,01	257,6	120,2	46,68%
84	198	15	50	2	ERS	14x80	89,66	6,79	6,76	89,60	13,58	122,32	167,3	79,4	47,48%
85	182	15	50	3	ZK	7x20	65,66	6,82	6,75	65,62	13,63	110,76	258,4	118,4	45,83%
86	166	15	50	3	ZK	14x80	100,03	11,48	11,44	100,02	22,95	146,97	167,6	79,3	47,28%
87	150	15	50	3	ERS	7x20	66,73	5,77	5,71	67,51	11,53	107,99	258,6	115,2	44,54%
88	134	15	50	3	ERS	14x80	101,68	10,13	10,09	101,66	20,26	164,95	168,5	78,1	46,33%
89	118	15	50	5	ZK	7x20	81,14	11,47	11,36	81,37	22,93	145,27	257,4	121,9	47,37%
90	102	15	50	5	ZK	14x80	123,45	19,09	19,02	123,94	38,18	177,99	168,4	80,9	48,07%
91	86	15	50	5	ERS	7x20	82,47	9,53	9,43	82,46	19,05	170,44	257,6	113,4	44,01%
92	70	15	50	5	ERS	14x80	125,48	16,62	16,55	125,98	33,24	228,07	168,4	78,4	46,59%
93	54	15	50	10	ZK	7x20	120,06	22,48	22,28	120,94	44,97	209,28	257,2	118,1	45,92%
94	38	15	50	10	ZK	14x80	182,20	37,91	37,77	182,52	75,81	403,88	167,3	79,3	47,38%
95	22	15	50	10	ERS	7x20	122,00	18,85	18,65	122,03	37,70	209,74	257,5	113,8	44,17%
96	6	15	50	10	ERS	14x80	185,18	33,64	33,50	185,81	67,29	320,39	167,9	80,3	47,80%
97	250	15	75	2	ZK	7x20	57,79	6,78	6,71	57,75	9,04	92,02	257,3	194,3	75,52%
98	234	15	75	2	ZK	14x80	88,20	11,53	11,49	88,13	15,38	120,94	167,7	125,1	74,62%
99	218	15	75	2	ERS	7x20	58,75	5,94	5,87	58,75	7,91	96,01	257,6	196,8	76,40%
100	202	15	75	2	ERS	14x80	89,66	10,19	10,14	89,60	13,58	122,32	167,3	125,2	74,83%
101	186	15	75	3	ZK	7x20	65,66	10,22	10,12	65,90	13,63	110,76	258,4	191,4	74,06%

Standardreihenfolge	Durchlaufreihenfolge	LSP [%]	LGG [%]	Anzahl Gassen	Achskopplung	Regal [HxL]	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Max. Leistungsmittelwert mit LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Max. Leistungsmittelwert ohne LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Durchsatzleistung ohne LM	Durchsatzleistung mit LM	Relative Durchsatzleistung [%]
102	170	15	75	3	ZK	14x80	100,03	17,21	17,15	100,02	22,95	146,97	167,6	124,4	74,19%
103	154	15	75	3	ERS	7x20	66,73	8,65	8,55	67,29	11,53	107,99	258,6	188,3	72,82%
104	138	15	75	3	ERS	14x80	101,68	15,20	15,13	102,56	20,26	164,95	168,5	123,8	73,45%
105	122	15	75	5	ZK	7x20	81,14	17,20	17,03	81,24	22,93	145,27	257,4	192,4	74,77%
106	106	15	75	5	ZK	14x80	123,45	28,63	28,52	124,20	38,18	177,99	168,4	125,2	74,37%
107	90	15	75	5	ERS	7x20	82,47	14,29	14,13	82,46	19,05	170,44	257,6	185,2	71,88%
108	74	15	75	5	ERS	14x80	125,48	24,93	24,82	126,30	33,24	228,07	168,4	124,2	73,79%
109	58	15	75	10	ZK	7x20	120,06	33,72	33,38	120,36	44,97	209,28	257,2	189,1	73,55%
110	42	15	75	10	ZK	14x80	182,20	56,86	56,63	183,14	75,81	403,88	167,3	123,5	73,81%
111	26	15	75	10	ERS	7x20	122,00	28,27	27,94	123,59	37,70	209,74	257,5	185,3	71,96%
112	10	15	75	10	ERS	14x80	185,18	50,46	50,23	185,95	67,29	320,39	167,9	125,9	74,95%
113	254	15	100	2	ZK	7x20	57,79	9,04	8,76	57,79	9,04	92,02	257,3	244,6	95,03%
114	238	15	100	2	ZK	14x80	88,20	15,38	15,15	88,13	15,38	120,94	167,7	161,8	96,49%
115	222	15	100	2	ERS	7x20	58,75	7,91	7,48	58,71	7,91	96,01	257,6	244,8	95,04%
116	206	15	100	2	ERS	14x80	89,66	13,58	13,14	89,62	13,58	122,32	167,3	162,1	96,88%
117	190	15	100	3	ZK	7x20	65,66	13,63	12,90	65,91	13,63	110,76	258,4	244,6	94,64%
118	174	15	100	3	ZK	14x80	100,03	22,95	22,45	100,00	22,95	146,97	167,6	161,7	96,46%
119	158	15	100	3	ERS	7x20	66,73	11,53	11,24	66,70	11,53	107,99	258,6	244,7	94,64%
120	142	15	100	3	ERS	14x80	101,68	20,26	19,96	101,84	20,26	164,95	168,5	162,6	96,48%
121	126	15	100	5	ZK	7x20	81,14	22,93	21,56	81,69	22,93	145,27	257,4	242,0	94,01%
122	110	15	100	5	ZK	14x80	123,45	38,18	37,07	124,19	38,18	177,99	168,4	162,1	96,30%
123	94	15	100	5	ERS	7x20	82,47	19,05	18,32	82,96	19,05	170,44	257,6	242,0	93,93%
124	78	15	100	5	ERS	14x80	125,48	33,24	32,24	126,23	33,24	228,07	168,4	162,0	96,25%
125	62	15	100	10	ZK	7x20	120,06	44,97	41,59	120,70	44,97	209,28	257,2	234,6	91,25%
126	46	15	100	10	ZK	14x80	182,20	75,81	72,40	182,75	75,81	403,88	167,3	159,3	95,22%
127	30	15	100	10	ERS	7x20	122,00	37,70	35,06	122,44	37,70	209,74	257,5	235,2	91,33%
128	14	15	100	10	ERS	14x80	185,18	67,29	64,15	186,08	67,29	320,39	167,9	160,1	95,32%
129	243	20	25	2	ZK	7x20	60,28	2,26	2,25	60,22	9,04	92,02	257,3	45,9	17,83%
130	227	20	25	2	ZK	14x80	92,01	3,84	3,83	91,99	15,38	120,94	167,7	36,2	21,60%
131	211	20	25	2	ERS	7x20	61,27	1,98	1,97	61,14	7,91	96,01	257,6	42,6	16,52%
132	195	20	25	2	ERS	14x80	93,53	3,40	3,39	93,11	13,58	122,32	167,3	33,0	19,72%
133	179	20	25	3	ZK	7x20	70,62	3,41	3,39	70,45	13,63	110,76	258,4	44,7	17,28%
134	163	20	25	3	ZK	14x80	107,64	5,74	5,72	107,12	22,95	146,97	167,6	34,8	20,77%
135	147	20	25	3	ERS	7x20	71,77	2,88	2,86	71,62	11,53	107,99	258,6	41,8	16,16%
136	131	20	25	3	ERS	14x80	109,41	5,07	5,05	109,35	20,26	164,95	168,5	32,8	19,47%
137	115	20	25	5	ZK	7x20	91,07	5,73	5,70	91,04	22,93	145,27	257,4	48,2	18,72%
138	99	20	25	5	ZK	14x80	138,66	9,54	9,52	138,51	38,18	177,99	168,4	36,0	21,36%
139	83	20	25	5	ERS	7x20	92,56	4,76	4,73	92,52	19,05	170,44	257,6	40,8	15,86%
140	67	20	25	5	ERS	14x80	140,94	8,31	8,28	140,91	33,24	228,07	168,4	33,9	20,12%
141	51	20	25	10	ZK	7x20	142,39	11,24	11,17	141,44	44,97	209,28	257,2	47,4	18,42%
142	35	20	25	10	ZK	14x80	216,43	18,95	18,90	216,39	75,81	403,88	167,3	34,8	20,83%
143	19	20	25	10	ERS	7x20	144,71	9,42	9,35	144,48	37,70	209,74	257,5	42,2	16,38%
144	3	20	25	10	ERS	14x80	219,97	16,82	16,76	219,35	67,29	320,39	167,9	34,9	20,78%
145	247	20	50	2	ZK	7x20	60,28	4,52	4,48	60,19	9,04	92,02	257,3	120,6	46,85%
146	231	20	50	2	ZK	14x80	92,01	7,69	7,66	91,59	15,38	120,94	167,7	80,4	47,98%
147	215	20	50	2	ERS	7x20	61,27	3,96	3,92	61,26	7,91	96,01	257,6	120,2	46,68%
148	199	20	50	2	ERS	14x80	93,53	6,79	6,76	93,19	13,58	122,32	167,3	79,4	47,48%
149	183	20	50	3	ZK	7x20	70,62	6,82	6,75	70,56	13,63	110,76	258,4	118,4	45,83%
150	167	20	50	3	ZK	14x80	107,64	11,48	11,44	107,43	22,95	146,97	167,6	79,3	47,28%
151	151	20	50	3	ERS	7x20	71,77	5,77	5,71	71,77	11,53	107,99	258,6	115,3	44,60%
152	135	20	50	3	ERS	14x80	109,41	10,13	10,09	109,39	20,26	164,95	168,5	78,1	46,37%
153	119	20	50	5	ZK	7x20	91,07	11,47	11,36	91,29	22,93	145,27	257,4	121,9	47,37%
154	103	20	50	5	ZK	14x80	138,66	19,09	19,02	138,68	38,18	177,99	168,4	80,9	48,05%

Anhang E Simulationsergebnisse

Standardreihenfolge	Durchlaufreihenfolge	LSP [%]	LGG [%]	Anzahl Gassen	Achskopplung	Regal [HxL]	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Max. Leistungsmittelwert mit LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Max. Leistungsmittelwert ohne LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Durchsatzleistung ohne LM	Durchsatzleistung mit LM	Relative Durchsatzleistung [%]
155	87	20	50	5	ERS	7x20	92,56	9,53	9,43	92,52	19,05	170,44	257,6	113,5	44,06%
156	71	20	50	5	ERS	14x80	140,94	16,62	16,55	141,25	33,24	228,07	168,4	78,5	46,65%
157	55	20	50	10	ZK	7x20	142,39	22,48	22,27	142,35	44,97	209,28	257,2	118,0	45,90%
158	39	20	50	10	ZK	14x80	216,43	37,91	37,76	216,42	75,81	403,88	167,3	79,2	47,34%
159	23	20	50	10	ERS	7x20	144,71	18,85	18,65	144,68	37,70	209,74	257,5	113,7	44,15%
160	7	20	50	10	ERS	14x80	219,97	33,64	33,49	219,35	67,29	320,39	167,9	80,3	47,82%
161	251	20	75	2	ZK	7x20	60,28	6,78	6,71	60,23	9,04	92,02	257,3	194,3	75,52%
162	235	20	75	2	ZK	14x80	92,01	11,53	11,49	91,96	15,38	120,94	167,7	125,1	74,62%
163	219	20	75	2	ERS	7x20	61,27	5,94	5,87	61,17	7,91	96,01	257,6	196,8	76,40%
164	203	20	75	2	ERS	14x80	93,53	10,19	10,14	93,49	13,58	122,32	167,3	125,2	74,83%
165	187	20	75	3	ZK	7x20	70,62	10,22	10,12	71,03	13,63	110,76	258,4	191,4	74,06%
166	171	20	75	3	ZK	14x80	107,64	17,21	17,15	107,62	22,95	146,97	167,6	124,3	74,15%
167	155	20	75	3	ERS	7x20	71,77	8,65	8,55	71,71	11,53	107,99	258,6	188,4	72,84%
168	139	20	75	3	ERS	14x80	109,41	15,20	15,13	109,18	20,26	164,95	168,5	123,7	73,41%
169	123	20	75	5	ZK	7x20	91,07	17,20	17,04	91,29	22,93	145,27	257,4	192,7	74,86%
170	107	20	75	5	ZK	14x80	138,66	28,63	28,52	139,08	38,18	177,99	168,4	125,2	74,34%
171	91	20	75	5	ERS	7x20	92,56	14,29	14,13	92,55	19,05	170,44	257,6	185,2	71,89%
172	75	20	75	5	ERS	14x80	140,94	24,93	24,82	140,91	33,24	228,07	168,4	124,3	73,81%
173	59	20	75	10	ZK	7x20	142,39	33,72	33,38	142,36	44,97	209,28	257,2	189,2	73,57%
174	43	20	75	10	ZK	14x80	216,43	56,86	56,63	216,42	75,81	403,88	167,3	123,4	73,77%
175	27	20	75	10	ERS	7x20	144,71	28,27	27,94	144,63	37,70	209,74	257,5	185,4	72,01%
176	11	20	75	10	ERS	14x80	219,97	50,46	50,23	219,85	67,29	320,39	167,9	125,8	74,94%
177	255	20	100	2	ZK	7x20	60,28	9,04	8,75	60,18	9,04	92,02	257,3	244,7	95,08%
178	239	20	100	2	ZK	14x80	92,01	15,38	15,15	91,92	15,38	120,94	167,7	161,8	96,49%
179	223	20	100	2	ERS	7x20	61,27	7,91	7,48	61,23	7,91	96,01	257,6	244,8	95,04%
180	207	20	100	2	ERS	14x80	93,53	13,58	13,14	93,51	13,58	122,32	167,3	162,2	96,95%
181	191	20	100	3	ZK	7x20	70,62	13,63	12,95	70,61	13,63	110,76	258,4	244,7	94,67%
182	175	20	100	3	ZK	14x80	107,64	22,95	22,36	107,58	22,95	146,97	167,6	161,8	96,51%
183	159	20	100	3	ERS	7x20	71,77	11,53	11,28	72,69	11,53	107,99	258,6	244,9	94,70%
184	143	20	100	3	ERS	14x80	109,41	20,26	19,95	109,40	20,26	164,95	168,5	162,6	96,48%
185	127	20	100	5	ZK	7x20	91,07	22,93	21,54	91,44	22,93	145,27	257,4	242,4	94,16%
186	111	20	100	5	ZK	14x80	138,66	38,18	37,08	138,65	38,18	177,99	168,4	162,2	96,36%
187	95	20	100	5	ERS	7x20	92,56	19,05	18,24	92,71	19,05	170,44	257,6	242,2	94,01%
188	79	20	100	5	ERS	14x80	140,94	33,24	32,18	141,39	33,24	228,07	168,4	162,2	96,36%
189	63	20	100	10	ZK	7x20	142,39	44,97	41,43	142,43	44,97	209,28	257,2	235,0	91,38%
190	47	20	100	10	ZK	14x80	216,43	75,81	72,34	217,25	75,81	403,88	167,3	159,5	95,32%
191	31	20	100	10	ERS	7x20	144,71	37,70	35,08	145,59	37,70	209,74	257,5	235,5	91,43%
192	15	20	100	10	ERS	14x80	219,97	67,29	64,03	220,19	67,29	320,39	167,9	160,2	95,41%
193	244	100	25	2	ZK	7x20	99,97	2,26	2,25	80,47	9,04	92,02	257,3	45,9	17,83%
194	228	100	25	2	ZK	14x80	152,86	3,84	3,83	114,69	15,38	120,94	167,7	36,1	21,54%
195	212	100	25	2	ERS	7x20	101,63	1,98	1,97	81,79	7,91	96,01	257,6	42,6	16,52%
196	196	100	25	2	ERS	14x80	155,39	3,40	3,39	108,00	13,58	122,32	167,3	33,0	19,72%
197	180	100	25	3	ZK	7x20	150,01	3,41	3,39	103,49	13,63	110,76	258,4	44,7	17,28%
198	164	100	25	3	ZK	14x80	229,34	5,74	5,72	130,56	22,95	146,97	167,6	34,8	20,77%
199	148	100	25	3	ERS	7x20	152,49	2,88	2,86	105,52	11,53	107,99	258,6	41,8	16,16%
200	132	100	25	3	ERS	14x80	233,14	5,07	5,05	157,83	20,26	164,95	168,5	32,8	19,47%
201	116	100	25	5	ZK	7x20	249,86	5,73	5,69	116,34	22,93	145,27	257,4	48,2	18,74%
202	100	100	25	5	ZK	14x80	382,06	9,54	9,52	168,64	38,18	177,99	168,4	36,0	21,36%
203	84	100	25	5	ERS	7x20	253,99	4,76	4,73	126,67	19,05	170,44	257,6	40,8	15,84%
204	68	100	25	5	ERS	14x80	388,40	8,31	8,28	178,28	33,24	228,07	168,4	33,9	20,14%
205	52	100	25	10	ZK	7x20	499,67	11,24	11,17	155,28	44,97	209,28	257,2	47,4	18,43%
206	36	100	25	10	ZK	14x80	764,08	18,95	18,90	262,98	75,81	403,88	167,3	34,8	20,81%
207	20	100	25	10	ERS	7x20	507,93	9,42	9,35	162,50	37,70	209,74	257,5	42,2	16,38%

Standardreihenfolge	Durchlaufreihenfolge	LSP [%]	LGG [%]	Anzahl Gassen	Achskopplung	Regal [HxL]	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Max. Leistungsmittelwert mit LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Max. Leistungsmittelwert ohne LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Durchsatzleistung ohne LM	Durchsatzleistung mit LM	Relative Durchsatzleistung [%]
208	4	100	25	10	ERS	14x80	776,75	16,82	16,76	241,38	67,29	320,39	167,9	34,9	20,79%
209	248	100	50	2	ZK	7x20	99,97	4,52	4,48	84,87	9,04	92,02	257,3	120,6	46,85%
210	232	100	50	2	ZK	14x80	152,86	7,69	7,66	122,39	15,38	120,94	167,7	80,4	47,98%
211	216	100	50	2	ERS	7x20	101,63	3,96	3,92	93,65	7,91	96,01	257,6	120,3	46,72%
212	200	100	50	2	ERS	14x80	155,39	6,79	6,76	109,48	13,58	122,32	167,3	79,4	47,48%
213	184	100	50	3	ZK	7x20	150,01	6,82	6,75	97,69	13,63	110,76	258,4	118,6	45,89%
214	168	100	50	3	ZK	14x80	229,34	11,48	11,44	140,29	22,95	146,97	167,6	79,3	47,28%
215	152	100	50	3	ERS	7x20	152,49	5,77	5,71	100,18	11,53	107,99	258,6	115,3	44,60%
216	136	100	50	3	ERS	14x80	233,14	10,13	10,09	146,18	20,26	164,95	168,5	78,1	46,33%
217	120	100	50	5	ZK	7x20	249,86	11,47	11,36	128,36	22,93	145,27	257,4	121,9	47,37%
218	104	100	50	5	ZK	14x80	382,06	19,09	19,01	178,60	38,18	177,99	168,4	80,9	48,05%
219	88	100	50	5	ERS	7x20	253,99	9,53	9,43	126,67	19,05	170,44	257,6	113,5	44,06%
220	72	100	50	5	ERS	14x80	388,40	16,62	16,55	190,41	33,24	228,07	168,4	78,4	46,59%
221	56	100	50	10	ZK	7x20	499,67	22,48	22,28	178,30	44,97	209,28	257,2	118,1	45,91%
222	40	100	50	10	ZK	14x80	764,08	37,91	37,76	262,98	75,81	403,88	167,3	79,2	47,35%
223	24	100	50	10	ERS	7x20	507,93	18,85	18,64	178,84	37,70	209,74	257,5	113,7	44,16%
224	8	100	50	10	ERS	14x80	776,75	33,64	33,50	241,26	67,29	320,39	167,9	80,3	47,82%
225	252	100	75	2	ZK	7x20	99,97	6,78	6,71	88,37	9,04	92,02	257,3	194,4	75,56%
226	236	100	75	2	ZK	14x80	152,86	11,53	11,49	108,42	15,38	120,94	167,7	124,9	74,49%
227	220	100	75	2	ERS	7x20	101,63	5,94	5,87	89,85	7,91	96,01	257,6	197,0	76,49%
228	204	100	75	2	ERS	14x80	155,39	10,19	10,14	118,46	13,58	122,32	167,3	125,2	74,83%
229	188	100	75	3	ZK	7x20	150,01	10,22	10,12	112,96	13,63	110,76	258,4	191,3	74,03%
230	172	100	75	3	ZK	14x80	229,34	17,21	17,15	128,21	22,95	146,97	167,6	124,3	74,15%
231	156	100	75	3	ERS	7x20	152,49	8,65	8,55	116,89	11,53	107,99	258,6	188,4	72,84%
232	140	100	75	3	ERS	14x80	233,14	15,20	15,13	156,25	20,26	164,95	168,5	123,8	73,45%
233	124	100	75	5	ZK	7x20	249,86	17,20	17,03	129,88	22,93	145,27	257,4	192,5	74,81%
234	108	100	75	5	ZK	14x80	382,06	28,63	28,52	183,41	38,18	177,99	168,4	125,2	74,34%
235	92	100	75	5	ERS	7x20	253,99	14,29	14,12	129,18	19,05	170,44	257,6	185,2	71,89%
236	76	100	75	5	ERS	14x80	388,40	24,93	24,82	187,29	33,24	228,07	168,4	124,3	73,84%
237	60	100	75	10	ZK	7x20	499,67	33,72	33,39	186,64	44,97	209,28	257,2	189,2	73,57%
238	44	100	75	10	ZK	14x80	764,08	56,86	56,63	264,55	75,81	403,88	167,3	123,4	73,77%
239	28	100	75	10	ERS	7x20	507,93	28,27	27,93	163,75	37,70	209,74	257,5	185,3	71,96%
240	12	100	75	10	ERS	14x80	776,75	50,46	50,23	247,25	67,29	320,39	167,9	125,8	74,94%
241	256	100	100	2	ZK	7x20	99,97	9,04	8,78	88,07	9,04	92,02	257,3	244,8	95,12%
242	240	100	100	2	ZK	14x80	152,86	15,38	15,11	121,93	15,38	120,94	167,7	162,0	96,62%
243	224	100	100	2	ERS	7x20	101,63	7,91	7,48	93,65	7,91	96,01	257,6	244,9	95,08%
244	208	100	100	2	ERS	14x80	155,39	13,58	13,12	111,67	13,58	122,32	167,3	162,2	96,95%
245	192	100	100	3	ZK	7x20	150,01	13,63	12,94	121,74	13,63	110,76	258,4	245,0	94,78%
246	176	100	100	3	ZK	14x80	229,34	22,95	22,42	145,94	22,95	146,97	167,6	161,8	96,51%
247	160	100	100	3	ERS	7x20	152,49	11,53	11,28	106,27	11,53	107,99	258,6	245,2	94,82%
248	144	100	100	3	ERS	14x80	233,14	20,26	20,00	162,21	20,26	164,95	168,5	162,7	96,53%
249	128	100	100	5	ZK	7x20	249,86	22,93	21,50	125,12	22,93	145,27	257,4	242,5	94,23%
250	112	100	100	5	ZK	14x80	382,06	38,18	37,11	195,50	38,18	177,99	168,4	162,3	96,38%
251	96	100	100	5	ERS	7x20	253,99	19,05	18,39	137,60	19,05	170,44	257,6	242,4	94,10%
252	80	100	100	5	ERS	14x80	388,40	33,24	32,15	197,91	33,24	228,07	168,4	162,3	96,41%
253	64	100	100	10	ZK	7x20	499,67	44,97	41,44	172,39	44,97	209,28	257,2	235,2	91,45%
254	48	100	100	10	ZK	14x80	764,08	75,81	72,50	262,98	75,81	403,88	167,3	159,5	95,32%
255	32	100	100	10	ERS	7x20	507,93	37,70	35,16	194,71	37,70	209,74	257,5	235,6	91,50%
256	16	100	100	10	ERS	14x80	776,75	67,29	64,06	272,32	67,29	320,39	167,9	160,3	95,43%

E.4 Hauptuntersuchung APL

Tabelle E-4: Simulationsergebnisse Hauptuntersuchung APL

Standardreihenfolge	Durchlaufreihenfolge	LSP [%]	LGG [%]	Anzahl Gassen	Zuladung [kg]	Achskopplung	Achssteuerung	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Max. Leistungsmittelwert mit LM[kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Max. Leistungsmittelwert ohne LM[kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Durchsatzleistung ohne LM	Durchsatzleistung mit LM	Relative Durchschnittsleistung [%]
1	449	10	25	2	500	ZK	Einfach	106	5	5,00	19,74	148,28	4,94	105,13	58,11	13,00
2	481	10	25	2	500	ZK	Erweitert	106	5	5,00	18,89	141,10	4,73	105,63	57,67	13,33
3	385	10	25	2	500	ERS	Einfach	107	5	5,00	17,10	132,70	4,28	106,49	59,11	13,67
4	417	10	25	2	500	ERS	Erweitert	107	5	5,00	16,73	154,20	4,18	106,78	58,00	13,56
5	465	10	25	2	1000	ZK	Einfach	106	6	6,00	20,02	143,89	5,01	105,07	58,33	13,44
6	497	10	25	2	1000	ZK	Erweitert	106	6	6,01	20,94	145,00	5,24	105,83	57,89	13,56
7	401	10	25	2	1000	ERS	Einfach	107	5	5,00	17,43	151,05	4,36	106,72	57,89	12,67
8	433	10	25	2	1000	ERS	Erweitert	107	5	5,00	18,70	153,37	4,68	106,82	58,33	13,78
9	321	10	25	3	500	ZK	Einfach	116	8	8,00	30,69	180,15	7,68	115,72	58,00	14,37
10	353	10	25	3	500	ZK	Erweitert	116	8	8,00	28,04	163,29	7,01	115,66	57,33	12,89
11	257	10	25	3	500	ERS	Einfach	117	7	7,00	25,71	167,13	6,43	117,35	58,37	13,04
12	289	10	25	3	500	ERS	Erweitert	117	7	7,00	24,93	168,26	6,24	116,81	58,07	13,48
13	337	10	25	3	1000	ZK	Einfach	116	8	8,01	31,87	275,37	7,98	116,34	58,00	12,89
14	369	10	25	3	1000	ZK	Erweitert	116	8	8,01	31,62	228,10	7,91	116,37	57,63	13,63
15	273	10	25	3	1000	ERS	Einfach	117	7	7,01	26,55	245,60	6,65	118,12	57,56	12,52
16	305	10	25	3	1000	ERS	Erweitert	117	7	7,01	27,73	181,22	6,95	116,96	57,63	12,52
17	193	10	25	5	500	ZK	Einfach	136	13	13,00	48,79	288,34	12,20	136,22	58,22	13,38
18	225	10	25	5	500	ZK	Erweitert	136	12	12,00	45,65	225,32	11,41	136,53	58,36	13,24
19	129	10	25	5	500	ERS	Einfach	137	11	11,00	41,37	273,34	10,34	137,40	58,31	13,16
20	161	10	25	5	500	ERS	Erweitert	137	11	11,00	40,49	280,19	10,12	137,95	58,44	12,53
21	209	10	25	5	1000	ZK	Einfach	136	13	13,01	51,00	265,91	12,76	136,23	58,18	13,11
22	241	10	25	5	1000	ZK	Erweitert	136	13	13,01	49,50	262,67	12,38	136,47	58,00	13,11
23	145	10	25	5	1000	ERS	Einfach	137	12	12,01	45,06	268,32	11,28	137,84	58,53	13,51
24	177	10	25	5	1000	ERS	Erweitert	137	11	11,00	43,13	245,25	10,79	137,61	58,13	13,56
25	65	10	25	10	500	ZK	Einfach	185	24	24,00	95,39	423,24	23,84	185,87	58,56	13,27
26	97	10	25	10	500	ZK	Erweitert	185	23	22,99	90,76	351,34	22,69	185,91	57,91	13,11
27	1	10	25	10	500	ERS	Einfach	187	21	21,00	82,61	349,76	20,65	187,86	58,78	13,29
28	33	10	25	10	500	ERS	Erweitert	187	20	20,00	78,23	418,87	19,55	187,93	58,31	12,51
29	81	10	25	10	1000	ZK	Einfach	185	26	26,00	102,86	566,12	25,72	186,27	58,38	13,58
30	113	10	25	10	1000	ZK	Erweitert	185	25	25,00	99,04	554,65	24,77	186,12	58,20	13,18
31	17	10	25	10	1000	ERS	Einfach	187	22	22,00	87,07	650,54	21,77	188,04	58,20	12,87
32	49	10	25	10	1000	ERS	Erweitert	187	22	22,00	85,16	439,21	21,29	187,78	57,87	12,71
33	453	10	50	2	500	ZK	Einfach	106	10	10,00	19,74	148,28	9,87	105,63	58,11	30,00
34	485	10	50	2	500	ZK	Erweitert	106	10	10,00	18,89	141,10	9,44	105,56	57,67	29,00
35	389	10	50	2	500	ERS	Einfach	107	9	9,00	17,10	132,70	8,55	106,80	59,11	30,22
36	421	10	50	2	500	ERS	Erweitert	107	9	9,00	16,73	154,20	8,37	106,83	58,00	30,44
37	469	10	50	2	1000	ZK	Einfach	106	11	11,01	20,02	143,89	10,01	105,77	58,33	29,67
38	501	10	50	2	1000	ZK	Erweitert	106	11	11,01	20,94	145,00	10,48	105,83	57,89	29,67
39	405	10	50	2	1000	ERS	Einfach	107	9	9,01	17,43	151,05	8,72	106,71	57,89	29,11
40	437	10	50	2	1000	ERS	Erweitert	107	10	10,01	18,70	153,37	9,36	106,65	58,33	31,78
41	325	10	50	3	500	ZK	Einfach	116	16	16,01	30,69	180,15	15,35	116,59	58,00	31,33
42	357	10	50	3	500	ZK	Erweitert	116	15	15,00	28,04	163,29	14,02	115,76	57,33	28,67
43	261	10	50	3	500	ERS	Einfach	117	13	13,01	25,71	167,13	12,86	117,53	58,37	30,15
44	293	10	50	3	500	ERS	Erweitert	117	13	13,00	24,93	168,26	12,47	116,86	58,07	29,70
45	341	10	50	3	1000	ZK	Einfach	116	16	16,01	31,87	275,37	15,95	116,98	58,00	29,93
46	373	10	50	3	1000	ZK	Erweitert	116	16	16,01	31,62	228,10	15,82	115,78	57,63	29,48
47	277	10	50	3	1000	ERS	Einfach	117	14	14,02	26,55	245,60	13,29	118,12	57,56	28,22
48	309	10	50	3	1000	ERS	Erweitert	117	14	14,01	27,73	181,22	13,88	117,84	57,63	29,19

Standardreihenfolge	Durchlaufreihenfolge	LSP [%]	LGG [%]	Anzahl Gassen	Zuladung [kg]	Achskopplung	Achssteuerung	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Max. Leistungswert mit LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Max. Leistungswert ohne LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Durchsatzleistung ohne LM	Durchsatzleistung mit LM	Relative Durchsatzleistung [%]
49	197	10	50	5	500	ZK	Einfach	136	25	25,00	48,79	288,34	24,40	136,33	58,22	29,91
50	229	10	50	5	500	ZK	Erweitert	136	23	23,01	45,65	225,32	22,82	136,45	58,36	29,56
51	133	10	50	5	500	ERS	Einfach	137	21	21,00	41,37	273,34	20,68	137,87	58,31	29,07
52	165	10	50	5	500	ERS	Erweitert	137	21	21,00	40,49	280,19	20,25	137,96	58,44	28,71
53	213	10	50	5	1000	ZK	Einfach	136	26	26,01	51,00	265,91	25,51	136,49	58,18	28,84
54	245	10	50	5	1000	ZK	Erweitert	136	25	25,01	49,50	262,67	24,76	136,47	58,00	28,67
55	149	10	50	5	1000	ERS	Einfach	137	23	23,01	45,06	268,32	22,54	138,01	58,53	30,53
56	181	10	50	5	1000	ERS	Erweitert	137	22	22,01	43,13	245,25	21,57	138,09	58,13	30,22
57	69	10	50	10	500	ZK	Einfach	185	48	47,99	95,39	423,24	47,69	186,01	58,56	29,78
58	101	10	50	10	500	ZK	Erweitert	185	46	45,99	90,76	351,34	45,37	185,85	57,91	28,47
59	5	10	50	10	500	ERS	Einfach	187	42	41,99	82,61	349,76	41,29	187,92	58,78	29,98
60	37	10	50	10	500	ERS	Erweitert	187	40	39,99	78,23	418,87	39,10	187,91	58,31	28,44
61	85	10	50	10	1000	ZK	Einfach	185	52	52,00	102,86	566,12	51,44	186,03	58,38	29,87
62	117	10	50	10	1000	ZK	Erweitert	185	50	49,99	99,04	554,65	49,53	186,15	58,20	29,36
63	21	10	50	10	1000	ERS	Einfach	187	44	43,99	87,07	650,54	43,53	188,02	58,20	28,56
64	53	10	50	10	1000	ERS	Erweitert	187	43	42,99	85,16	439,21	42,57	188,04	57,87	28,87
65	457	10	75	2	500	ZK	Einfach	106	15	15,00	19,74	148,28	14,80	105,72	58,11	47,67
66	489	10	75	2	500	ZK	Erweitert	106	15	15,00	18,89	141,10	14,17	105,65	57,67	45,78
67	393	10	75	2	500	ERS	Einfach	107	13	13,01	17,10	132,70	12,83	106,82	59,11	47,33
68	425	10	75	2	500	ERS	Erweitert	107	13	13,01	16,73	154,20	12,55	106,86	58,00	46,44
69	473	10	75	2	1000	ZK	Einfach	106	16	16,00	20,02	143,89	15,02	105,65	58,33	45,56
70	505	10	75	2	1000	ZK	Erweitert	106	16	16,01	20,94	145,00	15,71	105,78	57,89	46,33
71	409	10	75	2	1000	ERS	Einfach	107	14	14,01	17,43	151,05	13,08	106,86	57,89	45,56
72	441	10	75	2	1000	ERS	Erweitert	107	15	15,02	18,70	153,37	14,03	106,90	58,33	49,89
73	329	10	75	3	500	ZK	Einfach	116	24	24,01	30,69	180,15	23,03	116,52	58,00	47,93
74	361	10	75	3	500	ZK	Erweitert	116	22	22,00	28,04	163,29	21,03	115,76	57,33	44,89
75	265	10	75	3	500	ERS	Einfach	117	20	20,00	25,71	167,13	19,29	117,66	58,37	47,33
76	297	10	75	3	500	ERS	Erweitert	117	19	19,00	24,93	168,26	18,69	117,73	58,07	46,44
77	345	10	75	3	1000	ZK	Einfach	116	24	24,01	31,87	275,37	23,91	116,61	58,00	46,22
78	377	10	75	3	1000	ZK	Erweitert	116	24	24,02	31,62	228,10	23,73	116,68	57,63	46,59
79	281	10	75	3	1000	ERS	Einfach	117	20	20,01	26,55	245,60	19,93	117,92	57,56	44,52
80	313	10	75	3	1000	ERS	Erweitert	117	21	21,01	27,73	181,22	20,82	117,40	57,63	46,96
81	201	10	75	5	500	ZK	Einfach	136	37	37,00	48,79	288,34	36,59	136,59	58,22	47,02
82	233	10	75	5	500	ZK	Erweitert	136	35	35,00	45,65	225,32	34,23	136,28	58,36	45,29
83	137	10	75	5	500	ERS	Einfach	137	32	32,00	41,37	273,34	31,02	137,89	58,31	45,16
84	169	10	75	5	500	ERS	Erweitert	137	31	31,00	40,49	280,19	30,36	137,97	58,44	45,78
85	217	10	75	5	1000	ZK	Einfach	136	39	39,01	51,00	265,91	38,27	136,66	58,18	44,40
86	249	10	75	5	1000	ZK	Erweitert	136	38	38,00	49,50	262,67	37,13	136,61	58,00	44,76
87	153	10	75	5	1000	ERS	Einfach	137	34	34,01	45,06	268,32	33,80	137,97	58,53	46,84
88	185	10	75	5	1000	ERS	Erweitert	137	33	33,01	43,13	245,25	32,35	137,90	58,13	45,87
89	73	10	75	10	500	ZK	Einfach	185	72	71,98	95,39	423,24	71,52	186,09	58,56	45,91
90	105	10	75	10	500	ZK	Erweitert	185	69	68,98	90,76	351,34	68,06	185,93	57,91	44,13
91	9	10	75	10	500	ERS	Einfach	187	62	61,98	82,61	349,76	61,93	188,07	58,78	46,47
92	41	10	75	10	500	ERS	Erweitert	187	59	58,98	78,23	418,87	58,65	187,98	58,31	44,13
93	89	10	75	10	1000	ZK	Einfach	185	78	77,98	102,86	566,12	77,14	186,14	58,38	45,60
94	121	10	75	10	1000	ZK	Erweitert	185	75	75,00	99,04	554,65	74,28	186,17	58,20	45,04
95	25	10	75	10	1000	ERS	Einfach	187	66	65,99	87,07	650,54	65,29	188,05	58,20	44,36
96	57	10	75	10	1000	ERS	Erweitert	187	64	63,99	85,16	439,21	63,86	188,01	57,87	44,42
97	461	10	100	2	500	ZK	Einfach	106	20	19,48	19,74	148,28	19,48	105,81	58,11	57,33
98	493	10	100	2	500	ZK	Erweitert	106	19	18,81	18,89	141,10	18,81	105,48	57,67	56,89
99	397	10	100	2	500	ERS	Einfach	107	18	16,55	17,10	132,70	16,55	106,90	59,11	58,33
100	429	10	100	2	500	ERS	Erweitert	107	17	16,66	16,73	154,20	16,66	106,86	58,00	57,22
101	477	10	100	2	1000	ZK	Einfach	106	21	20,36	20,02	143,89	20,01	105,62	58,33	57,33

Anhang E Simulationsergebnisse

Standardreihenfolge	Durchlaufreihenfolge	LSP [%]	LGG [%]	Anzahl Gassen	Zuladung [kg]	Achskopplung	Achssteuerung	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Max. Leistungsmittelwert mit LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Max. Leistungsmittelwert ohne LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Durchsatzleistung ohne LM	Durchsatzleistung mit LM	Relative Durchsatzleistung [%]
102	509	10	100	2	1000	ZK	Erweitert	106	21	20,70	20,94	145,00	20,70	105,83	57,89	56,78
103	413	10	100	2	1000	ERS	Einfach	107	18	17,44	17,43	151,05	17,42	106,86	57,89	56,89
104	445	10	100	2	1000	ERS	Erweitert	107	19	18,07	18,70	153,37	18,07	106,91	58,33	57,44
105	333	10	100	3	500	ZK	Einfach	116	31	28,25	30,69	180,15	28,56	116,69	58,00	56,96
106	365	10	100	3	500	ZK	Erweitert	116	29	27,49	28,04	163,29	27,49	116,25	57,33	56,59
107	269	10	100	3	500	ERS	Einfach	117	26	24,88	25,71	167,13	24,88	117,80	58,37	57,33
108	301	10	100	3	500	ERS	Erweitert	117	25	23,91	24,93	168,26	23,91	117,90	58,07	57,26
109	349	10	100	3	1000	ZK	Einfach	116	32	31,07	31,87	275,37	31,05	116,46	58,00	56,89
110	381	10	100	3	1000	ZK	Erweitert	116	32	30,73	31,62	228,10	31,25	116,44	57,63	56,44
111	285	10	100	3	1000	ERS	Einfach	117	27	26,93	26,55	245,60	26,56	117,93	57,56	56,44
112	317	10	100	3	1000	ERS	Erweitert	117	28	27,30	27,73	181,22	27,30	117,93	57,63	56,52
113	205	10	100	5	500	ZK	Einfach	136	49	46,43	48,79	288,34	46,00	136,40	58,22	57,20
114	237	10	100	5	500	ZK	Erweitert	136	46	44,58	45,65	225,32	44,52	136,43	58,36	57,47
115	141	10	100	5	500	ERS	Einfach	137	42	41,42	41,37	273,34	41,37	137,87	58,31	57,20
116	173	10	100	5	500	ERS	Erweitert	137	41	41,35	40,49	280,19	40,48	138,00	58,44	57,51
117	221	10	100	5	1000	ZK	Einfach	136	52	49,90	51,00	265,91	50,99	136,76	58,18	56,27
118	253	10	100	5	1000	ZK	Erweitert	136	50	48,64	49,50	262,67	48,44	136,48	58,00	56,44
119	157	10	100	5	1000	ERS	Einfach	137	46	42,63	45,06	268,32	43,34	137,89	58,53	56,71
120	189	10	100	5	1000	ERS	Erweitert	137	44	42,96	43,13	245,25	43,12	137,86	58,13	56,62
121	77	10	100	10	500	ZK	Einfach	185	96	91,37	95,39	423,24	92,21	186,06	58,56	57,04
122	109	10	100	10	500	ZK	Erweitert	185	91	89,06	90,76	351,34	88,60	186,05	57,91	56,76
123	13	10	100	10	500	ERS	Einfach	187	83	80,62	82,61	349,76	80,58	187,90	58,78	57,44
124	45	10	100	10	500	ERS	Erweitert	187	79	76,58	78,23	418,87	77,73	187,97	58,31	57,09
125	93	10	100	10	1000	ZK	Einfach	185	103	97,49	102,86	566,12	95,85	186,29	58,38	55,91
126	125	10	100	10	1000	ZK	Erweitert	185	100	95,46	99,04	554,65	95,64	186,12	58,20	56,20
127	29	10	100	10	1000	ERS	Einfach	187	88	85,15	87,07	650,54	84,21	188,05	58,20	56,11
128	61	10	100	10	1000	ERS	Erweitert	187	86	81,54	85,16	439,21	82,26	188,01	57,87	56,20
129	450	15	25	2	500	ZK	Einfach	111	5	5,00	19,74	148,28	4,94	109,92	58,11	13,00
130	482	15	25	2	500	ZK	Erweitert	111	5	5,00	18,89	141,10	4,73	110,34	57,67	13,33
131	386	15	25	2	500	ERS	Einfach	112	5	5,00	17,10	132,70	4,28	111,70	59,11	13,67
132	418	15	25	2	500	ERS	Erweitert	112	5	5,00	16,73	154,20	4,18	111,62	58,00	13,56
133	466	15	25	2	1000	ZK	Einfach	111	6	6,00	20,02	143,89	5,01	110,57	58,33	13,44
134	498	15	25	2	1000	ZK	Erweitert	111	6	6,01	20,94	145,00	5,24	110,51	57,89	13,56
135	402	15	25	2	1000	ERS	Einfach	112	5	5,01	17,43	151,05	4,36	111,69	57,89	12,89
136	434	15	25	2	1000	ERS	Erweitert	112	5	5,00	18,70	153,37	4,68	111,12	58,33	13,67
137	322	15	25	3	500	ZK	Einfach	126	8	8,00	30,69	180,15	7,67	125,01	58,00	14,37
138	354	15	25	3	500	ZK	Erweitert	126	8	8,00	28,04	163,29	7,01	125,30	57,33	12,81
139	258	15	25	3	500	ERS	Einfach	127	7	7,00	25,71	167,13	6,43	126,60	58,37	13,04
140	290	15	25	3	500	ERS	Erweitert	127	7	7,00	24,93	168,26	6,24	126,08	58,07	13,33
141	338	15	25	3	1000	ZK	Einfach	126	8	8,00	31,87	275,37	7,98	126,28	58,00	12,96
142	370	15	25	3	1000	ZK	Erweitert	126	8	8,01	31,62	228,10	7,91	126,17	57,63	13,63
143	274	15	25	3	1000	ERS	Einfach	127	7	7,01	26,55	245,60	6,65	127,29	57,56	12,52
144	306	15	25	3	1000	ERS	Erweitert	127	7	7,01	27,73	181,22	6,95	126,51	57,63	12,52
145	194	15	25	5	500	ZK	Einfach	155	13	13,00	48,79	288,34	12,20	154,93	58,22	13,33
146	226	15	25	5	500	ZK	Erweitert	155	12	12,00	45,65	225,32	11,41	154,80	58,36	13,29
147	130	15	25	5	500	ERS	Einfach	157	11	11,00	41,37	273,34	10,34	156,73	58,31	13,11
148	162	15	25	5	500	ERS	Erweitert	157	11	11,00	40,49	280,19	10,12	156,82	58,44	12,58
149	210	15	25	5	1000	ZK	Einfach	155	13	13,00	51,00	265,91	12,76	155,77	58,18	13,11
150	242	15	25	5	1000	ZK	Erweitert	155	13	13,00	49,50	262,67	12,38	155,30	58,00	13,24
151	146	15	25	5	1000	ERS	Einfach	157	12	12,00	45,06	268,32	11,27	156,53	58,53	13,38
152	178	15	25	5	1000	ERS	Erweitert	157	11	11,00	43,13	245,25	10,79	156,14	58,13	13,56
153	66	15	25	10	500	ZK	Einfach	228	24	23,99	95,39	423,24	23,84	228,48	58,56	13,29
154	98	15	25	10	500	ZK	Erweitert	228	23	23,00	90,76	351,34	22,69	227,87	57,91	13,20

Standardreihenfolge	Durchlaufreihenfolge	LSP [%]	LGG [%]	Anzahl Gassen	Zuladung [kg]	Achskopplung	Achssteuerung	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Max. Leistungsmittelwert mit LM[kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Max. Leistungsmittelwert ohne LM[kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Durchsatzleistung ohne LM	Durchsatzleistung mit LM	Relative Durchsatzleistung [%]
261	467	20	25	2	1000	ZK	Einfach	116	6	6,00	20,02	143,89	5,01	115,10	58,33	13,44
262	499	20	25	2	1000	ZK	Erweitert	116	6	6,01	20,94	145,00	5,24	115,37	57,89	13,56
263	403	20	25	2	1000	ERS	Einfach	117	5	5,01	17,43	151,05	4,36	116,57	57,89	12,89
264	435	20	25	2	1000	ERS	Erweitert	117	5	5,01	18,70	153,37	4,68	116,07	58,33	13,67
265	323	20	25	3	500	ZK	Einfach	135	8	8,00	30,69	180,15	7,67	134,66	58,00	14,44
266	355	20	25	3	500	ZK	Erweitert	135	8	8,00	28,04	163,29	7,01	134,47	57,33	12,81
267	259	20	25	3	500	ERS	Einfach	137	7	7,00	25,71	167,13	6,43	136,24	58,37	13,11
268	291	20	25	3	500	ERS	Erweitert	137	7	7,00	24,93	168,26	6,24	135,75	58,07	13,26
269	339	20	25	3	1000	ZK	Einfach	135	8	8,01	31,87	275,37	7,98	134,79	58,00	13,04
270	371	20	25	3	1000	ZK	Erweitert	135	8	8,01	31,62	228,10	7,91	134,87	57,63	13,63
271	275	20	25	3	1000	ERS	Einfach	137	7	7,00	26,55	245,60	6,64	136,23	57,56	12,44
272	307	20	25	3	1000	ERS	Erweitert	137	7	7,01	27,73	181,22	6,95	137,38	57,63	12,52
273	195	20	25	5	500	ZK	Einfach	174	13	13,00	48,79	288,34	12,20	174,10	58,22	13,33
274	227	20	25	5	500	ZK	Erweitert	174	12	12,00	45,65	225,32	11,41	173,22	58,36	13,29
275	131	20	25	5	500	ERS	Einfach	176	11	11,00	41,37	273,34	10,34	175,30	58,31	13,11
276	163	20	25	5	500	ERS	Erweitert	176	11	11,00	40,49	280,19	10,12	175,96	58,44	12,58
277	211	20	25	5	1000	ZK	Einfach	174	13	13,00	51,00	265,91	12,76	173,93	58,18	13,20
278	243	20	25	5	1000	ZK	Erweitert	174	13	13,00	49,50	262,67	12,38	173,58	58,00	13,29
279	147	20	25	5	1000	ERS	Einfach	176	12	12,00	45,06	268,32	11,27	176,49	58,53	13,51
280	179	20	25	5	1000	ERS	Erweitert	176	11	11,00	43,13	245,25	10,78	175,22	58,13	13,56
281	67	20	25	10	500	ZK	Einfach	271	24	23,99	95,39	423,24	23,84	271,69	58,56	13,27
282	99	20	25	10	500	ZK	Erweitert	271	23	23,00	90,76	351,34	22,69	271,24	57,91	13,11
283	3	20	25	10	500	ERS	Einfach	274	21	20,99	82,61	349,76	20,65	273,20	58,78	13,20
284	35	20	25	10	500	ERS	Erweitert	274	20	19,99	78,23	418,87	19,55	274,24	58,31	12,53
285	83	20	25	10	1000	ZK	Einfach	271	26	26,00	102,86	566,12	25,71	271,87	58,38	13,51
286	115	20	25	10	1000	ZK	Erweitert	271	25	25,01	99,04	554,65	24,77	271,66	58,20	13,13
287	19	20	25	10	1000	ERS	Einfach	274	22	22,00	87,07	650,54	21,77	274,82	58,20	12,91
288	51	20	25	10	1000	ERS	Erweitert	274	22	22,01	85,16	439,21	21,30	273,73	57,87	12,73
289	455	20	50	2	500	ZK	Einfach	116	10	10,00	19,74	148,28	9,88	115,29	58,11	30,00
290	487	20	50	2	500	ZK	Erweitert	116	10	10,00	18,89	141,10	9,44	115,16	57,67	29,11
291	391	20	50	2	500	ERS	Einfach	117	9	9,00	17,10	132,70	8,55	116,31	59,11	30,22
292	423	20	50	2	500	ERS	Erweitert	117	9	9,00	16,73	154,20	8,37	116,41	58,00	30,44
293	471	20	50	2	1000	ZK	Einfach	116	11	11,00	20,02	143,89	10,01	115,15	58,33	29,67
294	503	20	50	2	1000	ZK	Erweitert	116	11	11,01	20,94	145,00	10,48	115,37	57,89	29,67
295	407	20	50	2	1000	ERS	Einfach	117	9	9,00	17,43	151,05	8,72	116,37	57,89	29,11
296	439	20	50	2	1000	ERS	Erweitert	117	10	10,00	18,70	153,37	9,36	116,54	58,33	31,78
297	327	20	50	3	500	ZK	Einfach	135	16	16,00	30,69	180,15	15,34	134,29	58,00	31,26
298	359	20	50	3	500	ZK	Erweitert	135	15	15,00	28,04	163,29	14,02	134,79	57,33	28,74
299	263	20	50	3	500	ERS	Einfach	137	13	13,00	25,71	167,13	12,86	136,27	58,37	30,15
300	295	20	50	3	500	ERS	Erweitert	137	13	13,00	24,93	168,26	12,47	136,16	58,07	29,78
301	343	20	50	3	1000	ZK	Einfach	135	16	16,00	31,87	275,37	15,94	135,42	58,00	29,85
302	375	20	50	3	1000	ZK	Erweitert	135	16	16,00	31,62	228,10	15,81	134,82	57,63	29,48
303	279	20	50	3	1000	ERS	Einfach	137	14	14,00	26,55	245,60	13,28	136,22	57,56	28,15
304	311	20	50	3	1000	ERS	Erweitert	137	14	14,01	27,73	181,22	13,88	136,21	57,63	29,33
305	199	20	50	5	500	ZK	Einfach	174	25	25,00	48,79	288,34	24,39	174,27	58,22	29,96
306	231	20	50	5	500	ZK	Erweitert	174	23	23,00	45,65	225,32	22,82	173,56	58,36	29,51
307	135	20	50	5	500	ERS	Einfach	176	21	20,99	41,37	273,34	20,68	176,42	58,31	29,02
308	167	20	50	5	500	ERS	Erweitert	176	21	20,99	40,49	280,19	20,24	176,14	58,44	28,62
309	215	20	50	5	1000	ZK	Einfach	174	26	26,00	51,00	265,91	25,50	174,40	58,18	28,80
310	247	20	50	5	1000	ZK	Erweitert	174	25	25,00	49,50	262,67	24,75	173,44	58,00	28,67
311	151	20	50	5	1000	ERS	Einfach	176	23	22,99	45,06	268,32	22,53	176,51	58,53	30,53
312	183	20	50	5	1000	ERS	Erweitert	176	22	21,99	43,13	245,25	21,56	174,60	58,13	30,13
313	71	20	50	10	500	ZK	Einfach	271	48	47,98	95,39	423,24	47,68	271,69	58,56	29,78

Anhang E Simulationsergebnisse

Standardreihenfolge	Durchlaufreihenfolge	LSP [%]	LGG [%]	Anzahl Gassen	Zuladung [kg]	Achskopplung	Achssteuerung	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Max. Leistungsmittelwert mit LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Max. Leistungsmittelwert ohne LM [kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Durchsatzleistung ohne LM	Durchsatzleistung mit LM	Relative Durchsatzleistung [%]
314	103	20	50	10	500	ZK	Erweitert	271	46	45,99	90,76	351,34	45,37	271,24	57,91	28,53
315	7	20	50	10	500	ERS	Einfach	274	42	41,98	82,61	349,76	41,29	273,70	58,78	29,98
316	39	20	50	10	500	ERS	Erweitert	274	40	39,98	78,23	418,87	39,10	274,24	58,31	28,49
317	87	20	50	10	1000	ZK	Einfach	271	52	51,99	102,86	566,12	51,41	271,78	58,38	30,00
318	119	20	50	10	1000	ZK	Erweitert	271	50	49,99	99,04	554,65	49,52	271,30	58,20	29,44
319	23	20	50	10	1000	ERS	Einfach	274	44	43,99	87,07	650,54	43,52	274,87	58,20	28,60
320	55	20	50	10	1000	ERS	Erweitert	274	43	42,99	85,16	439,21	42,57	273,71	57,87	28,96
321	459	20	75	2	500	ZK	Einfach	116	15	15,00	19,74	148,28	14,80	114,83	58,11	47,67
322	491	20	75	2	500	ZK	Erweitert	116	15	15,00	18,89	141,10	14,17	115,37	57,67	45,78
323	395	20	75	2	500	ERS	Einfach	117	13	13,00	17,10	132,70	12,82	116,38	59,11	47,33
324	427	20	75	2	500	ERS	Erweitert	117	13	13,01	16,73	154,20	12,55	116,50	58,00	46,67
325	475	20	75	2	1000	ZK	Einfach	116	16	16,00	20,02	143,89	15,02	115,26	58,33	45,56
326	507	20	75	2	1000	ZK	Erweitert	116	16	16,00	20,94	145,00	15,71	115,37	57,89	46,44
327	411	20	75	2	1000	ERS	Einfach	117	14	14,00	17,43	151,05	13,08	116,57	57,89	45,56
328	443	20	75	2	1000	ERS	Erweitert	117	15	15,02	18,70	153,37	14,02	116,57	58,33	49,89
329	331	20	75	3	500	ZK	Einfach	135	24	24,01	30,69	180,15	23,01	134,89	58,00	47,93
330	363	20	75	3	500	ZK	Erweitert	135	22	21,99	28,04	163,29	21,03	134,88	57,33	44,74
331	267	20	75	3	500	ERS	Einfach	137	20	20,00	25,71	167,13	19,28	136,27	58,37	47,33
332	299	20	75	3	500	ERS	Erweitert	137	19	19,00	24,93	168,26	18,69	136,12	58,07	46,52
333	347	20	75	3	1000	ZK	Einfach	135	24	24,00	31,87	275,37	23,90	135,42	58,00	46,22
334	379	20	75	3	1000	ZK	Erweitert	135	24	24,00	31,62	228,10	23,72	135,48	57,63	46,59
335	283	20	75	3	1000	ERS	Einfach	137	20	20,00	26,55	245,60	19,91	136,19	57,56	44,67
336	315	20	75	3	1000	ERS	Erweitert	137	21	21,00	27,73	181,22	20,81	136,24	57,63	46,96
337	203	20	75	5	500	ZK	Einfach	174	37	36,99	48,79	288,34	36,59	174,37	58,22	47,02
338	235	20	75	5	500	ZK	Erweitert	174	35	34,99	45,65	225,32	34,23	173,72	58,36	45,20
339	139	20	75	5	500	ERS	Einfach	176	32	31,99	41,37	273,34	31,02	175,43	58,31	45,20
340	171	20	75	5	500	ERS	Erweitert	176	31	30,99	40,49	280,19	30,35	175,17	58,44	45,78
341	219	20	75	5	1000	ZK	Einfach	174	39	39,00	51,00	265,91	38,25	174,74	58,18	44,44
342	251	20	75	5	1000	ZK	Erweitert	174	38	37,99	49,50	262,67	37,12	174,39	58,00	44,76
343	155	20	75	5	1000	ERS	Einfach	176	34	33,99	45,06	268,32	33,79	176,21	58,53	46,93
344	187	20	75	5	1000	ERS	Erweitert	176	33	32,99	43,13	245,25	32,34	175,51	58,13	46,00
345	75	20	75	10	500	ZK	Einfach	271	72	71,98	95,39	423,24	71,52	271,69	58,56	45,98
346	107	20	75	10	500	ZK	Erweitert	271	69	68,98	90,76	351,34	68,05	271,24	57,91	44,16
347	11	20	75	10	500	ERS	Einfach	274	62	61,98	82,61	349,76	61,93	274,25	58,78	46,38
348	43	20	75	10	500	ERS	Erweitert	274	59	58,97	78,23	418,87	58,65	274,24	58,31	44,20
349	91	20	75	10	1000	ZK	Einfach	271	78	77,98	102,86	566,12	77,12	271,78	58,38	45,76
350	123	20	75	10	1000	ZK	Erweitert	271	75	74,98	99,04	554,65	74,27	271,79	58,20	45,18
351	27	20	75	10	1000	ERS	Einfach	274	66	65,98	87,07	650,54	65,28	274,82	58,20	44,44
352	59	20	75	10	1000	ERS	Erweitert	274	64	63,98	85,16	439,21	63,85	273,71	57,87	44,51
353	463	20	100	2	500	ZK	Einfach	116	20	19,49	19,74	148,28	19,49	115,11	58,11	57,33
354	495	20	100	2	500	ZK	Erweitert	116	19	18,81	18,89	141,10	18,81	115,11	57,67	56,89
355	399	20	100	2	500	ERS	Einfach	117	18	16,50	17,10	132,70	16,51	116,37	59,11	58,33
356	431	20	100	2	500	ERS	Erweitert	117	17	16,65	16,73	154,20	16,65	116,31	58,00	57,22
357	479	20	100	2	1000	ZK	Einfach	116	21	20,23	20,02	143,89	20,02	115,37	58,33	57,56
358	511	20	100	2	1000	ZK	Erweitert	116	21	20,96	20,94	145,00	20,77	115,37	57,89	57,00
359	415	20	100	2	1000	ERS	Einfach	117	18	17,48	17,43	151,05	17,43	116,57	57,89	56,89
360	447	20	100	2	1000	ERS	Erweitert	117	19	18,03	18,70	153,37	18,05	116,57	58,33	57,44
361	335	20	100	3	500	ZK	Einfach	135	31	29,19	30,69	180,15	29,19	135,57	58,00	57,33
362	367	20	100	3	500	ZK	Erweitert	135	29	27,66	28,04	163,29	27,66	134,89	57,33	56,74
363	271	20	100	3	500	ERS	Einfach	137	26	24,51	25,71	167,13	24,60	136,12	58,37	57,56
364	303	20	100	3	500	ERS	Erweitert	137	25	23,90	24,93	168,26	23,90	136,18	58,07	57,48
365	351	20	100	3	1000	ZK	Einfach	135	32	31,46	31,87	275,37	31,46	135,42	58,00	57,11
366	383	20	100	3	1000	ZK	Erweitert	135	32	30,68	31,62	228,10	30,68	135,41	57,63	56,89

Standardreihenfolge	Durchlaufreihenfolge	LSP [%]	LGG [%]	Anzahl Gassen	Zuladung [kg]	Achskopplung	Achssteuerung	GWLSP [kW]	GWLG [kW]	Max. Leistungsmittelwert mit LM[kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Max. Leistungsmittelwert ohne LM[kW]	Max. Leistungsbedarf mit LM [kW]	Durchsatzleistung ohne LM	Durchsatzleistung mit LM	Relative Durchsatzleistung [%]
473	76	100	75	10	500	ZK	Einfach	959	72	71,97	95,39	423,24	71,52	396,27	58,56	45,98
474	108	100	75	10	500	ZK	Erweitert	959	69	68,98	90,76	351,34	68,05	352,44	57,91	44,22
475	12	100	75	10	500	ERS	Einfach	969	62	61,98	82,61	349,76	61,93	327,37	58,78	46,33
476	44	100	75	10	500	ERS	Erweitert	969	59	58,97	78,23	418,87	58,65	392,68	58,31	44,16
477	92	100	75	10	1000	ZK	Einfach	959	78	77,98	102,86	566,12	77,12	539,49	58,38	45,73
478	124	100	75	10	1000	ZK	Erweitert	959	75	74,98	99,04	554,65	74,26	490,85	58,20	45,04
479	28	100	75	10	1000	ERS	Einfach	969	66	65,98	87,07	650,54	65,28	579,63	58,20	44,42
480	60	100	75	10	1000	ERS	Erweitert	969	64	63,97	85,16	439,21	63,84	391,59	57,87	44,47
481	464	100	100	2	500	ZK	Einfach	192	20	19,49	19,74	148,28	19,49	165,35	58,11	57,44
482	496	100	100	2	500	ZK	Erweitert	192	19	18,81	18,89	141,10	18,81	127,52	57,67	56,89
483	400	100	100	2	500	ERS	Einfach	194	18	16,73	17,10	132,70	16,73	143,78	59,11	58,44
484	432	100	100	2	500	ERS	Erweitert	194	17	16,57	16,73	154,20	16,57	135,27	58,00	57,33
485	480	100	100	2	1000	ZK	Einfach	192	21	20,19	20,02	143,89	20,02	143,89	58,33	57,67
486	512	100	100	2	1000	ZK	Erweitert	192	21	20,59	20,94	145,00	20,59	144,03	57,89	57,11
487	416	100	100	2	1000	ERS	Einfach	194	18	17,26	17,43	151,05	17,26	154,15	57,89	57,22
488	448	100	100	2	1000	ERS	Erweitert	194	19	18,07	18,70	153,37	18,07	167,21	58,33	57,67
489	336	100	100	3	500	ZK	Einfach	288	31	29,20	30,69	180,15	29,20	168,32	58,00	57,33
490	368	100	100	3	500	ZK	Erweitert	288	29	27,65	28,04	163,29	27,65	158,47	57,33	56,74
491	272	100	100	3	500	ERS	Einfach	291	26	24,48	25,71	167,13	24,48	170,23	58,37	57,56
492	304	100	100	3	500	ERS	Erweitert	291	25	23,93	24,93	168,26	23,93	168,26	58,07	57,48
493	352	100	100	3	1000	ZK	Einfach	288	32	31,73	31,87	275,37	31,73	267,83	58,00	57,33
494	384	100	100	3	1000	ZK	Erweitert	288	32	30,74	31,62	228,10	30,74	227,27	57,63	57,11
495	288	100	100	3	1000	ERS	Einfach	291	27	27,05	26,55	245,60	26,55	250,45	57,56	56,89
496	320	100	100	3	1000	ERS	Erweitert	291	28	27,91	27,73	181,22	27,73	218,84	57,63	56,96
497	208	100	100	5	500	ZK	Einfach	480	49	46,88	48,79	288,34	46,88	283,06	58,22	57,51
498	240	100	100	5	500	ZK	Erweitert	480	46	45,44	45,65	225,32	45,44	194,58	58,36	57,69
499	144	100	100	5	500	ERS	Einfach	485	42	41,41	41,37	273,34	41,35	248,57	58,31	57,69
500	176	100	100	5	500	ERS	Erweitert	485	41	40,62	40,49	280,19	40,47	247,83	58,44	57,78
501	224	100	100	5	1000	ZK	Einfach	480	52	49,99	51,00	265,91	50,44	245,31	58,18	57,47
502	256	100	100	5	1000	ZK	Erweitert	480	50	49,98	49,50	262,67	49,50	291,69	58,00	57,07
503	160	100	100	5	1000	ERS	Einfach	485	46	44,78	45,06	268,32	44,78	240,33	58,53	57,82
504	192	100	100	5	1000	ERS	Erweitert	485	44	42,91	43,13	245,25	42,91	268,57	58,13	57,42
505	80	100	100	10	500	ZK	Einfach	959	96	94,54	95,39	423,24	94,54	396,27	58,56	57,82
506	112	100	100	10	500	ZK	Erweitert	959	91	90,37	90,76	351,34	90,37	352,44	57,91	57,20
507	16	100	100	10	500	ERS	Einfach	969	83	81,31	82,61	349,76	81,31	324,23	58,78	58,09
508	48	100	100	10	500	ERS	Erweitert	969	79	77,86	78,23	418,87	77,86	392,68	58,31	57,64
509	96	100	100	10	1000	ZK	Einfach	959	103	99,97	102,86	566,12	100,50	539,49	58,38	57,78
510	128	100	100	10	1000	ZK	Erweitert	959	100	97,48	99,04	554,65	97,48	490,85	58,20	57,47
511	32	100	100	10	1000	ERS	Einfach	969	88	86,35	87,07	650,54	86,35	579,63	58,20	57,53
512	64	100	100	10	1000	ERS	Erweitert	969	86	83,57	85,16	439,21	83,57	391,59	57,87	57,22