



## **DIAGNOSE VON REGALBEDIENGERÄTEN MITTELS ENERGIEBEDARFSANALYSE**

**Titel:** eDiagRBG

**Auftraggeber:** Forschungsgemeinschaft IFL

**Auftragnehmer:** Technische Universität Dresden  
Fakultät Maschinenwesen

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Armin Siegel, M.Sc.

**Datum:** Dresden, 15.03.2016

.....

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt

Berichtsumfang:	46 Seiten inklusive Anhang
Beginn der Arbeiten:	01.03.2015
Ende der Arbeiten:	29.02.2016
Zuschussgeber:	Forschungsgemeinschaft Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme e. V. - FG IFL Johannes Rehner Lyoner Straße 18 60528 Frankfurt am Main
Forschungsstelle:	Technische Universität Dresden Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme 01062 Dresden Tel.: +49 351 463 32538
Bearbeiter und Verfasser:	Armin Siegel
Projektbegleitender Ausschuss:	Busch-Jaeger Elektro GmbH <ul style="list-style-type: none"><li>• Günter Ketelhut</li><li>• Wolfgang Niggemann</li><li>• Martin Olschok</li><li>• Stephan Röntgen</li><li>• Jörg Siemers</li></ul> Jungheinrich Logistiksysteme GmbH <ul style="list-style-type: none"><li>• Dr. Peter Tenerowicz-Wirth</li></ul> MLOG Logistics GmbH <ul style="list-style-type: none"><li>• Georg Leichtle</li></ul> Stöcklin Logistik AG <ul style="list-style-type: none"><li>• Christian Kuner</li></ul> Viastore Systems GmbH <ul style="list-style-type: none"><li>• Paul Hahn-Woernle</li></ul>

# Inhalt

1	Forschungsthema .....	4
2	Ziel des Projektes .....	4
3	Messgerätaufbau und Messwerterfassung .....	6
4	Anschluss der Messgeräte .....	9
5	Messeinsätze .....	10
6	Messdatenerfassung und Aufbereitung .....	11
7	Weiterentwicklung des Berechnungsmodells .....	13
7.1	Horizontale Bewegung .....	13
7.2	Vertikale Bewegung .....	14
7.3	Lastaufnahmezyklus .....	14
7.4	Modellerweiterung .....	14
8	Identifizierung und vergleichende Analyse .....	15
8.1	Parameteridentifikation .....	15
8.1.1	Fahrwerk .....	15
8.1.2	Hubwerk .....	18
8.1.3	Lastaufnahmemittel .....	20
8.1.4	Zusammenfassung .....	20
8.2	Analyse der Messergebnisse .....	21
8.2.1	Palettenlager-Fahrwerk .....	22
8.2.2	Palettenlager-Hubwerk .....	25
8.2.3	Palettenlager-Lastaufnahmemittel .....	27
8.2.4	AKL-Regalbediengeräte .....	27
8.2.5	Zusammenfassung .....	30
9	Dokumentation Vorgehensweise, Verfahren .....	31
10	Bewertung des entwickelten Verfahrens .....	31
	Literatur .....	32
	Anhang .....	33
	Gasse 3 .....	33
	Gasse 4 .....	36
	Gasse 5 .....	39
	Gasse 6 .....	42

## **1 FORSCHUNGSTHEMA**

Gegenstand des Forschungsprojektes war die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur energetischen Analyse und Diagnose von Regalbediengeräten (RBG). Das Verfahren soll Auskunft über die technischen Abweichungen von einem Normzustand liefern, die sich in einem veränderten Energiebedarf der Fördertechnik niederschlagen. Die Abweichungen können durch Verschleiß oder ungünstige Konfigurierung des Systems verursacht werden. Ausgangspunkt der Analyse und Diagnose waren Messungen zum Leistungsbedarfsverlauf während verschiedener Transportfahrten und der Vergleich mit einem Energie- bzw. Leistungsbedarfsmodell, welches von der TU Dresden weiterentwickelt wurde. Weiterhin wurde die Leistungsmessung um eine Wegmessung ergänzt.

Das Verfahren zielt nicht darauf ab, die technischen Ursachen der Abweichungen exakt zu benennen, sondern qualitativ Auskunft über den Systemzustand zu geben und durch die Art und Größenordnung der energetischen Abweichung die möglichen Ursachen einzugrenzen. Im Forschungsprojekt wurden deshalb die Möglichkeiten und Grenzen einer Diagnostik auf der Basis von Leistungsbedarfs- und Bewegungsablaufmessung analysiert.

## **2 ZIEL DES PROJEKTES**

Ziel war die Entwicklung eines Verfahrens, um aus den Aufzeichnungen der Leistungsaufnahme während des Betriebs eines Regalbediengerätes, ergänzt um eine Wegmessung, Unregelmäßigkeiten in Bezug auf den Leistungs- bzw. Energiebedarf zu identifizieren. Die Identifikation sollte für das Fahrwerk und das Hubwerk sowie das Lastaufnahmemittel geschehen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Energieeffiziente Steuerungsstrategien“ (AiF-Vorhaben Nr. 17014 BR) wurde ein parametrisches Berechnungsmodell für den Leistungsbedarf von RBG entwickelt. Das Berechnungsmodell berücksichtigt neben der erbrachten mechanischen Leistung im Transportvorgang weitere Bestandteile wie den Fahrwiderstand der Räder, die Wirkungsgrade von Motor und Getriebe, Verluste im Gleichrichter sowie einen Grundverbrauch. Der Modellansatz wurde durch Messungen der Leistungsaufnahme an verschiedenen RBG in seiner Grundstruktur validiert.

Das validierte Modell liefert mit guter Genauigkeit eine Nachbildung der gemessenen Leistungsverläufe. Für das Vorhaben der Parameteridentifikation stellt das Modell eine geeignete

Ausgangsbasis dar, erforderte aber eine Weiterentwicklung hinsichtlich Modelldetaillierung (Genauigkeit und Präzision), um zur sicheren Diagnose eingesetzt werden zu können.

Das Projekt zur Diagnose von Regalbediengeräten auf der Basis einer Energie- bzw. Leistungsbedarfsanalyse beinhaltete die nachfolgenden Teilziele.

- Generierung von vergleichbaren Messungen an verschiedenen RBG als Datenbasis,
- Erstellung einer datenbankbasierten Messdatenspeicherung und Datenaufbereitung,
- Entwicklung des Berechnungsmodells für den Einsatz zur Diagnose,
- Bestimmung eines Verfahrens zur Identifikation von Systemparametern der gemessenen Anlagen auf Basis des Berechnungsmodells,
- Schaffung der Grundlage zur Ausgestaltung einer automatisierten Messauswertung und Parameterableitung,
- Eine Verfahrensanleitung, die als Grundlage dient für
  - o Wartungstechniker, unter Einsatz der vorgeschlagenen Messtechnik Abweichungen vom Normzustand zu identifizieren, und
  - o Hersteller, das entwickelte Verfahren in ihre Anlagen zur ständigen Überwachung dieser Systeme zu integrieren.
- Bewertung der identifizierten Parameter und Generierung von Diagnoseinformationen.

### 3 MESSGERÄTEAUFBAU UND MESSWERTERFASSUNG

Für die Untersuchungen war ein Messwerterfassungssystem zu entwerfen, mit dem sowohl die Leistungsaufnahme als auch der Bewegungsablauf eines Regalbediengerätes erfasst werden kann. Für die Leistungsmessung stand ein Messgerät vom Typ Hioki 3193 zur Verfügung. Dieses wurde mit einem GPIB-Interface so erweitert, dass die Messwerte digital über die USB-Schnittstelle von einem Rechner aufgezeichnet werden konnten.

Das Laserabstandsmessgerät wurde neu angeschafft, die Wahl entfiel auf den Sensor von Dimetix mit der Bezeichnung FLS-C 10. Insbesondere zeichnet er sich dadurch aus, dass das Abstandsmessen auf technischen Oberflächen möglich ist. Darüber hinaus ist die Messung mit einer Wiederholfrequenz von bis zu 250 Hz in einem Bereich bis 500 m bei einer zwei Sigma Wiederholgenauigkeit von  $\pm 1$  mm möglich. Der Sensor verfügt über die Schnittstellen RS232, RS422 und SSI. Für die Anbindung an den Messwerterfassungsrechner wurde die RS422 Schnittstelle in Verbindung mit einem Umsetzer (FDTI) auf USB verwendet. Abbildung 1 zeigt das Prinzip der Messgeräteanbindung.

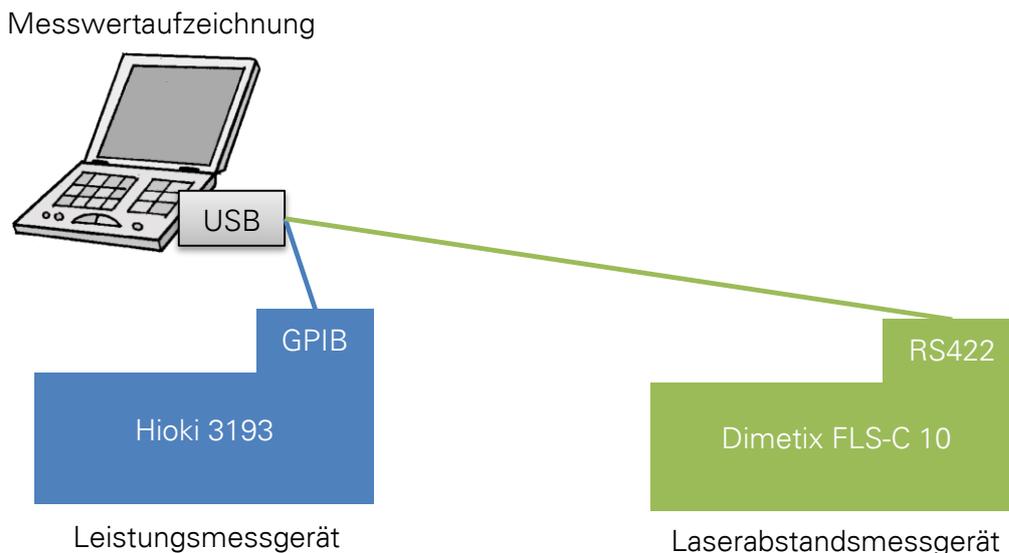


Abbildung 1: Anbindung der Messgeräte

Zur Messwerterfassung im Computer kam Labview zum Einsatz. Dafür wurde ein Messwertausleseprogramm entwickelt, das es ermöglicht synchron Messwerte des Leistungsmessgerätes und des Abstandssensors aufzuzeichnen. Zur Wertaufzeichnung müssen die Messwerte jeweils aufgenommen, dekodiert und aufbereitet werden, sodass sie gemeinsam in eine Textdatei geschrieben werden können.

Abbildung 2 zeigt das sogenannte Front Panel (Benutzerschnittstelle) des entwickelten Labview-Programms. Es können unter anderem die COM- und GPIB-Schnittstelle parametrisiert, der Pfad für die zu speichernden Textdateien festgelegt und die Messwertaufzeich-

nung im Diagramm beobachtet werden. Insbesondere ist eine einfache Dateiweitschaltung implementiert, die es ermöglicht mehrere Messungen hintereinander auszuführen. Dabei ist sicherstellt, dass keine Datei überschrieben wird. Darüber hinaus dient die direkte Beobachtung der aufgenommenen Messwerte in den beiden Diagrammfenstern zur schnellen Überprüfung der richtigen Funktionsweise. Insgesamt ist somit eine komfortable Messwerterfassungsumgebung geschaffen worden.

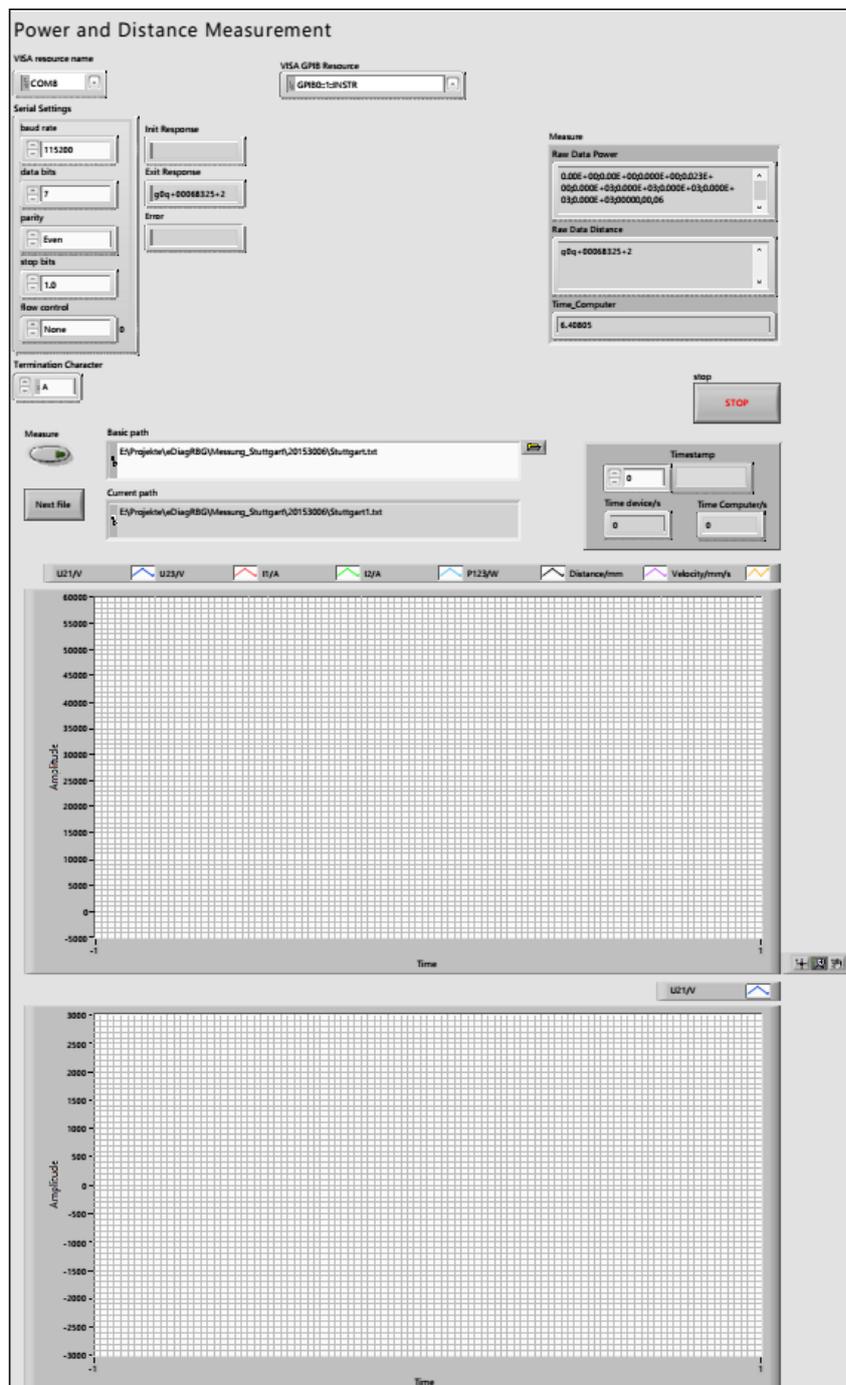


Abbildung 2: Labview Front Panel der Messwerterfassung

## Diagnose von Regalbediengeräten mittels Energiebedarfsanalyse

Das zugrunde liegende Programm ist in Abbildung 3 dargestellt. Labview wird wie dargestellt grafisch programmiert. Im oberen Teil ist die Messwertaufzeichnung mit den jeweils vorgelagerten Initialisierungen der Messgeräte (links) zu sehen. Im unteren Teil findet die Messwertdekodierung statt. Dabei werden die Benutzereingaben, ob eine Aufzeichnung stattfinden soll und wohin die Messwerte gespeichert werden, berücksichtigt. Das Programm ist nach dem Designmuster Produzent und Konsument aufgebaut. Der Produzent nimmt in diesem Falle die Messwerte mit z. B. 50 Hz bzw. 20 ms zeitsynchron auf und schreibt diese in eine Warteschlange. Die Rechenzeit des Computers in dem keine Messwerte aufgenommen werden, steht dem Konsumenten zur Verfügung, der die Dekodierung und Speicherung übernimmt.

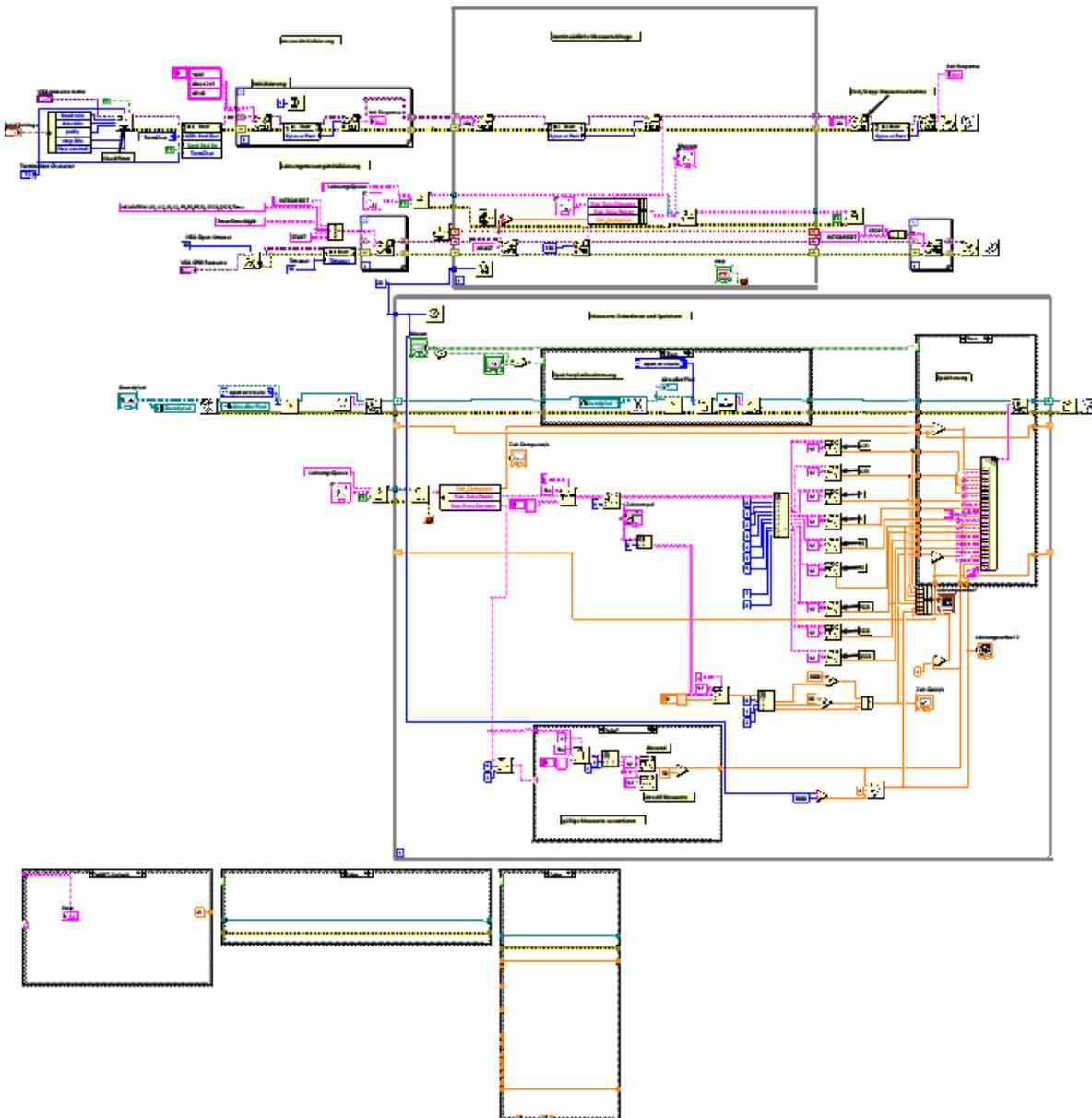


Abbildung 3: Labview Block Diagram der Messwertaufzeichnung im Designmuster Produzent Konsument

Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 4 gezeigt. Es wird entsprechend der Eingaben eine Messwertdatei erzeugt. In dieser sind im Header die gemessenen Größen mit ihren Einheiten notiert. Darunter folgen die Messwerte mit 20 ms Zeitabstand. Die einzelnen Werte sind jeweils durch Tabulatoren getrennt und als Dezimaltrennzeichen werden Punkte verwendet. Nach einer Anpassung des Trennzeichens ist es somit möglich, die erzeugten Textdateien beispielsweise mit Excel zu öffnen und zu betrachten.

	ZeitDevice/s	U1/V	-U2/V	I1/A	I3/A	P1/W	P2/W	P123/W	S123/VA	Q/VAh	Abstand/mm	Geschwindigkeit/mm/s
1	0.020055	0.000000	390.730000	390.460000	0.570000	0.250000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	170.000000	2695.700000
2	0.040062	0.000000	390.730000	390.460000	0.570000	0.250000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	170.000000	2695.700000
3	0.060069	0.000000	390.430000	390.440000	0.600000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
4	0.082139	0.000000	390.430000	390.440000	0.600000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
5	0.100299	0.000000	390.430000	390.440000	0.600000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
6	0.120461	0.000000	390.430000	390.440000	0.600000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
7	0.140471	0.000000	390.430000	390.440000	0.600000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
8	0.160474	0.000000	390.430000	390.440000	0.600000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
9	0.179675	0.000000	390.770000	390.410000	0.580000	0.250000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	190.000000	2695.700000
10	0.204678	0.000000	390.770000	390.410000	0.580000	0.250000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	190.000000	2695.700000
11	0.231681	0.000000	390.770000	390.410000	0.580000	0.250000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	190.000000	2695.700000
12	0.239688	0.000000	390.770000	390.410000	0.580000	0.250000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	190.000000	2695.700000
13	0.259725	0.000000	390.770000	390.410000	0.580000	0.250000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	190.000000	2695.700000
14	0.279744	0.000000	390.770000	390.410000	0.580000	0.250000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	190.000000	2695.700000
15	0.301269	0.000000	390.770000	390.410000	0.580000	0.250000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	190.000000	2695.700000
16	0.323273	0.000000	390.800000	390.330000	0.600000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
17	0.340285	0.000000	390.800000	390.330000	0.600000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
18	0.360313	0.000000	390.800000	390.330000	0.600000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
19	0.380366	0.000000	390.800000	390.330000	0.600000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
20	0.401348	0.000000	390.800000	390.330000	0.600000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
21	0.423367	0.000000	390.800000	390.330000	0.600000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
22	0.445373	0.000000	390.490000	390.250000	0.580000	0.250000	220.000000	0.000000	220.000000	320.000000	170.000000	2695.700000
23	0.460354	0.000000	390.490000	390.250000	0.580000	0.250000	220.000000	0.000000	220.000000	320.000000	170.000000	2695.700000
24	0.479710	0.000000	390.490000	390.250000	0.580000	0.250000	220.000000	0.000000	220.000000	320.000000	170.000000	2695.700000
25	0.500910	0.000000	390.490000	390.250000	0.580000	0.250000	220.000000	0.000000	220.000000	320.000000	170.000000	2695.700000
26	0.520939	0.000000	390.490000	390.250000	0.580000	0.250000	220.000000	0.000000	220.000000	320.000000	170.000000	2695.700000
27	0.539941	0.000000	390.490000	390.250000	0.580000	0.250000	220.000000	0.000000	220.000000	320.000000	170.000000	2695.700000
28	0.560980	1.000000	390.710000	390.350000	0.600000	0.270000	200.000000	0.000000	200.000000	330.000000	220.000000	2695.700000
29	0.582294	1.000000	390.710000	390.350000	0.600000	0.270000	200.000000	0.000000	200.000000	330.000000	220.000000	2695.700000
30	0.600982	1.000000	390.710000	390.350000	0.600000	0.270000	200.000000	0.000000	200.000000	330.000000	220.000000	2695.700000
31	0.619999	1.000000	390.710000	390.350000	0.600000	0.270000	200.000000	0.000000	200.000000	330.000000	220.000000	2695.700000
32	0.639992	1.000000	390.710000	390.350000	0.600000	0.270000	200.000000	0.000000	200.000000	330.000000	220.000000	2695.700000
33	0.660001	1.000000	390.730000	390.490000	0.580000	0.240000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	180.000000	2695.700000
34	0.681007	1.000000	390.730000	390.490000	0.580000	0.240000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	180.000000	2695.700000
35	0.707019	1.000000	390.730000	390.490000	0.580000	0.240000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	180.000000	2695.700000
36	0.721179	1.000000	390.730000	390.490000	0.580000	0.240000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	180.000000	2695.700000
37	0.740048	1.000000	390.730000	390.490000	0.580000	0.240000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	180.000000	2695.700000
38	0.760108	1.000000	390.730000	390.490000	0.580000	0.240000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	180.000000	2695.700000
39	0.780107	1.000000	390.730000	390.490000	0.580000	0.240000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	180.000000	2695.700000
40	0.800114	1.000000	390.730000	390.490000	0.580000	0.240000	210.000000	0.000000	210.000000	320.000000	180.000000	2695.700000
41	0.821130	1.000000	390.810000	390.540000	0.610000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	230.000000	2695.700000
42	0.840131	1.000000	390.810000	390.540000	0.610000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	230.000000	2695.700000
43	0.860269	1.000000	390.810000	390.540000	0.610000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	230.000000	2695.700000
44	0.880430	1.000000	390.810000	390.540000	0.610000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	230.000000	2695.700000
45	0.900438	1.000000	390.810000	390.540000	0.610000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	230.000000	2695.700000
46	0.920445	1.000000	390.810000	390.540000	0.610000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	230.000000	2695.700000
47	0.940450	1.000000	390.820000	390.650000	0.590000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
48	0.960510	1.000000	390.820000	390.650000	0.590000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
49	0.981581	1.000000	390.820000	390.650000	0.590000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
50	1.000593	1.000000	390.820000	390.650000	0.590000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
51	1.020600	1.000000	390.820000	390.650000	0.590000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000
52	1.040618	1.000000	390.820000	390.650000	0.590000	0.270000	210.000000	0.000000	210.000000	330.000000	200.000000	2695.700000

Abbildung 4: Aufbau Textdatei

## 4 ANSCHLUSS DER MESSGERÄTE

Der Messgerätsanschluss bzw. -aufbau wird nachfolgend für die beiden Sensoren getrennt betrachtet.

### Leistungserfassung

Das Leistungsmessgerät wird mit der Spannungsversorgung der Regalbediengerätenanlage verbunden. Dazu eignet sich der elektrische Gasseneingang direkt nach dem Hauptschalter des Gerätes. Nach dem Abschalten der Anlage am Hauptschalter sind die Leistungen zum Gerät spannungsfrei und die Spannungs клемmen können am Abgang des Hauptschalters angebracht werden. Die Strommessung erfolgt mittels sogenannter Strommesszangen. Diese umfassen die Kabel und messen den Strom induktiv. Die RBG-Anlagen werden dreiphasig mit Spannung versorgt. Um den Aufwand (zwei statt drei Leistungserfassungs Kanäle) gering zu halten, wird das Leistungsmessgerät stromrichtig in der sogenannten Aron-Schaltung angeschlossen. Abbildung 5 zeigt den Anschluss.

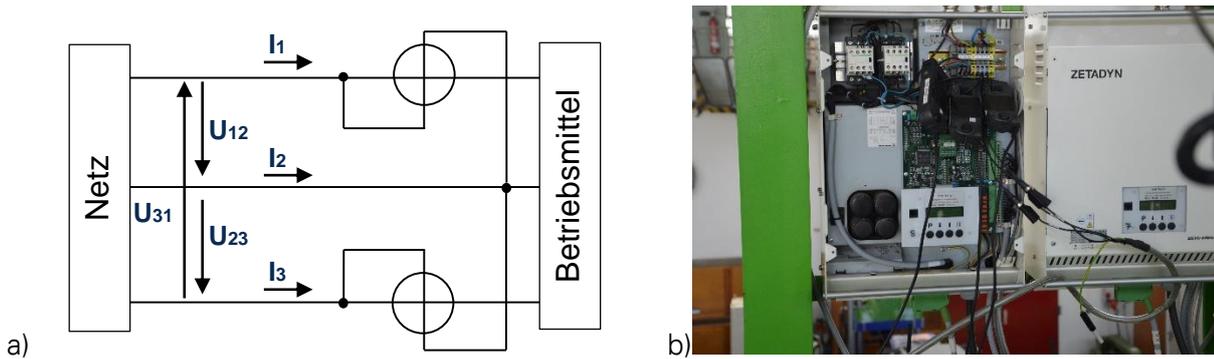


Abbildung 5: Leistungserfassung mit der Aronschaltung (stromrichtig) a) Schaltbild b) Anschluss am Aufzugsversuchsstand der TU Dresden

### Wegfassung

Der Anschluss bzw. Aufbau des Abstandssensors gestaltet sich deutlich einfacher als der des Leistungsmessgerätes. Es wird lediglich ein Stativ oder etwas Vergleichbares zum Aufbau des Gerätes benötigt. Im Projekt wurde ein Ständer aus Aluminiumprofilen mit einer Trägerplatte für den Sensor verwendet. Am Regalbediengerät ist eine Fläche zu identifizieren, die während der gesamten Fahrt (bzw. des gesamten Hubes) durch den Laser angestrahlt werden kann. Ist diese identifiziert muss der Sensor lediglich so ausgerichtet werden, dass er während der Fahrt die ganze Zeit auf dieselbe Fläche trifft. Abbildung 6 stellt den Sensor mit der Ausrichtung auf den Flansch des Fahrwerkes dar.

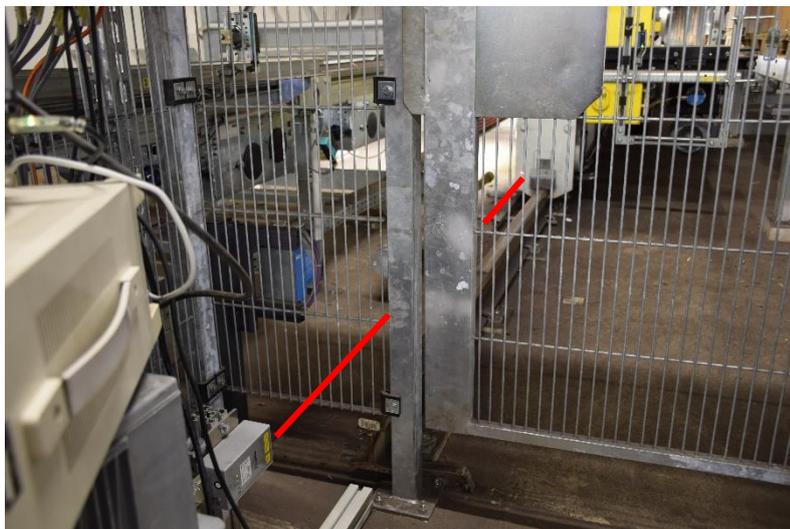


Abbildung 6: Laserabstusssensor auf den Frontflansch des RBG-Fahrwerkes ausgerichtet

## 5 MESSEINSÄTZE

Im Projekt wurden mehrere Messeinsätze mit unterschiedlichem Umfang durchgeführt. So wurden bei drei Anlagen die Leistungsaufnahme und der Bewegungsablauf, sowohl des Fahrwerkes als auch des Hubwerkes, mit unterschiedlichen kinematischen Größen (Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit) vermessen. Des Weiteren wurden im Lager von Busch-Jaeger in Lüdenscheid fünf der insgesamt sechs Paletten-RBG jeweils vor und nach

der Wartung vermessen. Als besondere Wartungsmaßnahmen erfolgte bei einem gemessenen Gerät der Fahrschienenschliff und bei vier Geräten der Laufradtausch. Die Änderung der kinematischen Größen war bei den Paletten-RBG aufgrund verschiedener Faktoren nicht möglich. Darüber hinaus erfolgte die Vermessung von fünf der insgesamt zehn AKL-Regalbediengeräte. Aufgrund der Wartungsarbeiten, die parallel während der Vermessung durchgeführt wurden, konnten keine Vergleichsmessungen vor und nach der Wartung durchgeführt werden. Somit können die Messergebnisse nur untereinander verglichen werden. Auch die Veränderung der kinematischen Größen wurde bei den AKL-RBG nicht durchgeführt. Im Detail wurden die nachfolgenden Messeinsätze in chronologischer Reihenfolge ausgeführt:

29.06.-03.06.2015 Viastore Systems GmbH/Sick AG, Bietigheim Bissingen/Waldkirch

- AKL-Regalbediengerät, Typ Viastore Viaspeed
- Paletten-Regalbediengerät, Typ Viastore Viapal mit Energierückspeisung

30.09.-01.10.2015 Busch-Jaeger GmbH, Lüdenscheid Vorabversuche

- Paletten-Regalbediengerät, Typ Mlog MSingle
- AKL-Regalbediengerät, Typ TGW Mustang

30.11.-10.12.2015 Busch-Jaeger GmbH, Lüdenscheid

- Fünf Paletten-Regalbediengeräte, Typ Mlog MSingle
- Fünf AKL-Regalbediengeräte, Typ TGW Mustang

12.01.-13.01.2016 Paul Hartmann AG, Herbrechtingen

- Paletten-Regalbediengerät, Typ Viastore Viapal mit Energierückspeisung (modernisiert)

## **6 MESSDATENERFASSUNG UND AUFBEREITUNG**

Die Messdatenerfassung erfolgte so, dass für eine Messung mit den gleichen kinematischen Größen mindestens fünf Wiederholungen durchgeführt wurden. Dies bedeutet für die Fahrwerksmessung, dass das Gerät fünfmal vor und wieder zurück gefahren wird und dabei die Leistungsaufnahme und der Bewegungsverlauf gemessen wird. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um im Nachgang mehrere Fahrten, in Bezug darauf, wie genau und präzise sich die Messergebnisse (Prozess und Messgeräte) wiederholen lassen bzw. wie groß die Abweichung sind, vergleichen zu können. Im Ergebnis entstand jeweils eine Datei in der mindestens fünf Wiederholungen mit einer Abtastrate von 50 Hz enthalten sind.

Für den Vergleich der Messergebnisse und zum einfachen Experimentieren bei der Modellanpassung wurde eine Datenbank entwickelt, in der die Messergebnisse, das jeweils untersuchte Gerät sowie die Randbedingung des Versuches effizient zusammengehalten werden. Abbildung 7 zeigt dazu das Entity-Relationship-Modell der Datenbank. Kern sind die

Tabellenblätter Gerät, Experiment, Messung sowie die Daten selbst und spezifische Kennwerte wie z. B. Start der Rückfahrt.

Um die Daten aus den Textdateien zu extrahieren wurde ein Matlabtool entwickelt, das es auf grafischer Basis ermöglicht, die einzelnen Fahrten Anhand des Bewegungssignals voneinander zu separieren. Anschließend legt das Programm die Daten halbautomatisch in der Datenbank ab. Im Ergebnis sind die einzelnen Fahrten separat aus der Datenbank abrufbar.

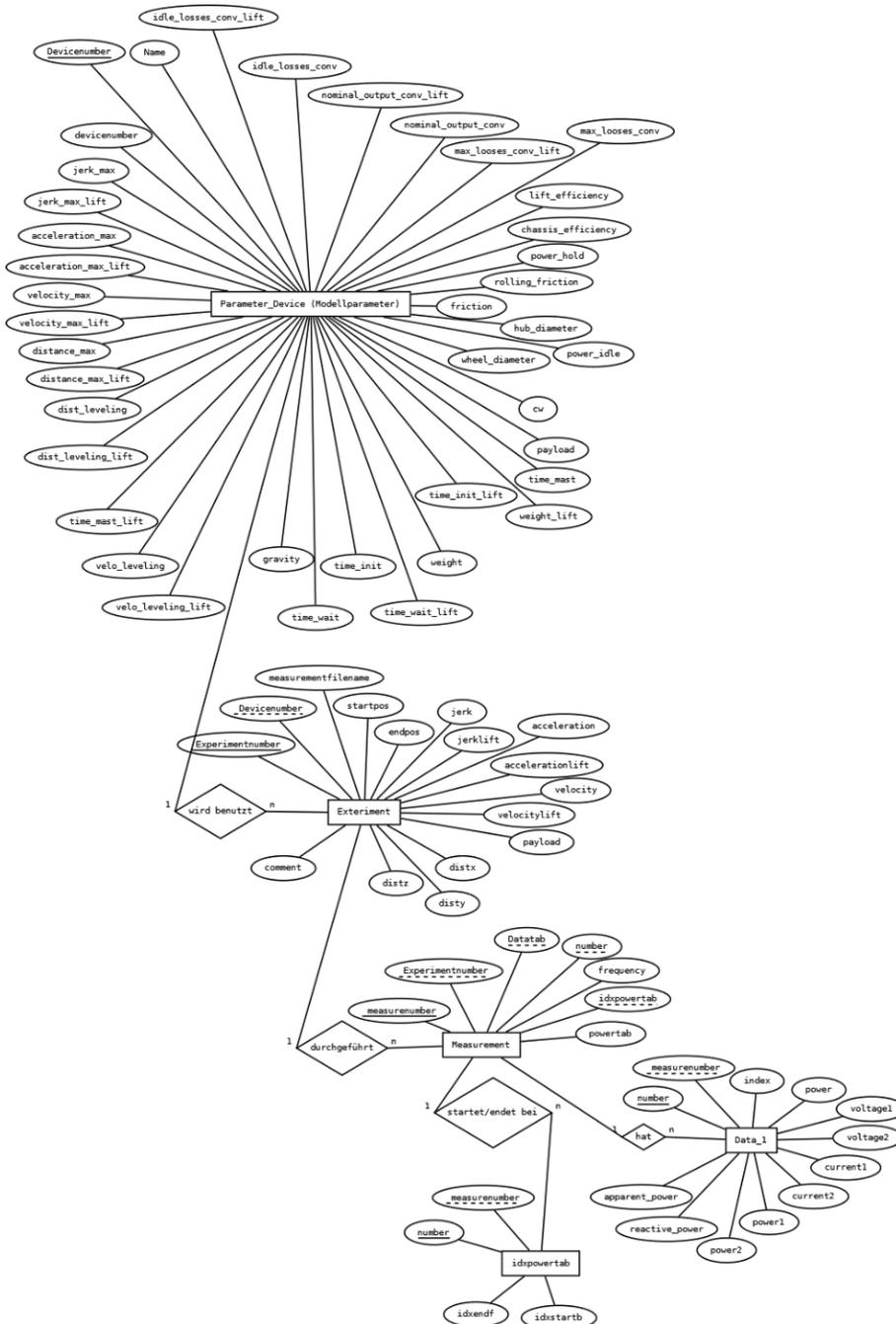


Abbildung 7: Entity Relationship Modell der Datenbank

## 7 WEITERENTWICKLUNG DES BERECHNUNGSMODELLS

Das Modell basiert auf physikalischen Gleichungen und technischen Systemwerten. Nachfolgend werden die Bestandteile des Leistungsmodells vorgestellt. Die Betrachtung des Fahr-, Hubvorgangs und Lastaufnahmezyklus erfolgt getrennt.

### 7.1 HORIZONTALE BEWEGUNG

Die Massenträgheit des RBG bewirkt einen Beschleunigungswiderstand während des Anfahrvorgangs. Über den gesamten Bewegungsvorgang wirkt der Fahrwiderstand der Rad-Schiene-Kombination. Das Produkt aus Normalkraft  $F_N$  und spezifischem Fahrwiderstand  $\mu_f$  ergibt die Widerstandskraft. Der spezifische Fahrwiderstand beinhaltet die Wirkung aus der rollenden Reibung und der Lagerreibung. Die dementsprechend erforderliche Antriebskraft wurde nach Scheffler (Scheffler 1994) mit folgender Formel bestimmt.

$$F_{FW} = (m + m_{\text{nutz}}) \cdot g \cdot \left[ \frac{2}{D} \cdot \left( \mu_L \cdot \frac{d}{2} + f \right) \right] \quad (1)$$

$m$  = Masse des RBG

$m_{\text{nutz}}$  = Masse der Nutzlast

$g$  = Erdbeschleunigung

$D$  = Raddurchmesser

$d$  = Nabendurchmesser

$f$  = Hebelarm der rollenden Reibung

$\mu_L$  = Lagerreibwert

Die Werkstoffpaarung zwischen Rad und Schiene bestimmt den Wert des Hebelarms der rollenden Reibung. Der Zahlenwert im Berechnungsmodell kann aus technischen Tabellen entnommen werden, ebenso der Wert für die Lagerreibung. Nachfolgend wird eine Methode beschrieben, wie er sich aus den Messdaten ermitteln lässt. Raddurchmesser und Nabendurchmesser wurden vor Ort gemessen. Die Annahme zur Masse des RBG beruht auf den Angaben in der Anlagenbeschreibung des Herstellers. Nachfolgende Formel fasst die aufzubringende mechanische Leistung der horizontalen Bewegung zusammen.

$$P_{\text{mech\_horizont}} = \left( (m + m_{\text{nutz}}) \cdot a + F_{FW} \right) \cdot v \quad (2)$$

Dabei ist  $v$  die Geschwindigkeit der Anlage. Der zusätzliche Energiebedarf von Getriebe und Kraftübertragung wird über angenommene Wirkungsgrade unabhängig von den kinematischen Parametern hinzugefügt, ebenso der Eigenbedarf des Antriebsmotors. Im Ergebnis ergibt sich die Verlustleistung, die im Antriebsstrang für die Bewegung verloren geht.

$$P_{V_{\text{mech}}} = |P_{\text{mech\_horizont}}| (1 - \mu_{\text{Motor}} \cdot \mu_{\text{Getriebe}} \cdot \mu_{\text{Kraftübertrag}}) \quad (3)$$

Zur Ermittlung der Verlustleistung  $P_{VU}$  am Frequenzumrichter wird ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Motoreingangsleistung ergänzt um die Verlustleistung  $P_{ME} = P_{\text{mech\_horizont}} + P_{V_{\text{mech}}}$  angenommen. Die Angaben zur maximalen Verlustleistung ( $P_{V_{\text{max}}}$ ) und maximaler Ausgangsleistung ( $P_{FU_{\text{max}}}$ ) des Umrichters werden aus der technischen Spezifikation dessen entnommen. Zusätzlich kann eine Grundverlustleistung ( $P_{GV}$ ) des Umrichters berücksichtigt werden. Zur Berechnung der aktuellen Verlustleistung  $P_{VU}$  wird folgende Gleichung herangezogen:

$$P_{VU} = \frac{|P_{ME}| \cdot P_{V_{\text{max}}}}{P_{FU_{\text{max}}}} + P_{GV}. \quad (4)$$

Der Grundverlust der Anlage entsteht aus dem Energiebedarf der betriebsbereiten Anlage und der Stromversorgung. Der Wert wird im Stillstand des RBG ermittelt und als konstante Größe dem Modell hinzugefügt. Der Leistungsbedarf für die horizontale Bewegung ist mit der Summe aus den Gleichungen (2) bis (4) und den Grundverlusten bestimmt.

## 7.2 VERTIKALE BEWEGUNG

Beim Heben und Senken der Last ist neben dem Beschleunigungswiderstand zusätzlich die Erdanziehungskraft zu berücksichtigen. Mit nach oben gerichtet definierter Bewegungsrichtung ergibt sich:

$$P_{\text{mech\_vertikal}} = (m_h + m_{\text{nutz}}) \cdot (a + g) \cdot v. \quad (5)$$

Der Leistungsverlust infolge von Widerständen in Motor, Getriebe und Kraftübertragung wird ebenfalls, siehe Gleichung (3), über angenommene Wirkungsgrade beschrieben. Abhängig vom jeweiligen RBG sind diese Werte anzupassen. Die Ermittlung der Verlustleistung  $P_{VU}$  am Frequenzumrichter erfolgt analog zum Fahrwerk.

## 7.3 LASTAUFNAHMEZYKLUS

Zur Modellierung des Energiebedarfs existiert noch kein Modell, in der ersten Annahme wird der Bedarf über eine Konstante während des LAM-Zyklus angenommen. Abhängig von den Messungen wird diese Annahme detailliert.

## 7.4 MODELLERWEITERUNG

Die Modelle wurden jeweils um die Berücksichtigung der Trägheitsmomente erweitert. Ziel dieser Erweiterung war die bessere Abbildung des dynamischen Verhaltens der Anlagen. Im Falle der horizontalen Bewegung ergibt sich mit dem Gesamtträgheitsmoment  $J$  bezogen auf die Radachse und dem Raddurchmesser  $D$  die mechanische Leistung der Horizontalbewegung zu:

$$P_{\text{mech\_horizont}} = \left( \left( m + m_{\text{nutz}} + \frac{4J}{D^2} \right) \cdot a + F_{FW} \right) \cdot v \quad (6)$$

Analog ergibt sich für das Hubwerk mit dem Gesamtträgheitsmoment  $J_{\text{HW}}$  der Hubeinheit und dem Umlenkrollendurchmesser  $D_{\text{HW}}$ .

$$P_{\text{mech\_vertikal}} = \left( (m_h + m_{\text{nutz}}) \cdot (a + g) + \frac{4J_{\text{HW}}}{D_{\text{HW}}^2} a \right) \cdot v. \quad (7)$$

Beide Erweiterungen wurden in das Modell aufgenommen und bilden mit diesem zusammen die Grundlage für die Parameteridentifikation.

## 8 IDENTIFIZIERUNG UND VERGLEICHENDE ANALYSE

Im folgenden Abschnitt wird zum einen die Modellparameteridentifikation dargestellt. Als zweiter Schwerpunkt werden die Messergebnisse analysiert und betrachtet, um zu entscheiden, wie das entwickelte Modell zur Fehlerdiagnose eingesetzt werden kann.

### 8.1 PARAMETERIDENTIFIKATION

Nachfolgend wird eine Möglichkeit aufgezeigt, wie aus dem gemessenen Leistungs- und Bewegungsverlauf auf die Modellparameter geschlossen werden kann. Es wird dabei zwischen Fahrwerk und Hubwerk unterschieden.

#### 8.1.1 Fahrwerk

Beim Fahrwerk wird davon ausgegangen, dass die nachfolgenden Größen als bekannt vorausgesetzt werden können.

$P_{\text{ges}}$	Gesamtleistungsaufnahme Fahrwerk
$P_{\text{GV}}$	Grundverlustleistung
$P_{\text{Vmax}}$	Maximale Verlustleistung Umrichter
$P_{\text{FUmax}}$	Maximale Ausgangsleistung Umrichter
$D$	Raddurchmesser
$d$	Nabendurchmesser
$m_{\text{ges}} = m + m_{\text{nutz}}$	Gesamtmasse

Die Gesamtleistungsaufnahme des Fahrwerks lautet (vgl. Abschnitt 7.1 und 7.4):

$$P_{\text{ges}} = 2 \cdot P_{\text{mech\_horizont}} \cdot \mu \cdot P_{\text{mech\_horizont}} + 2 \cdot P_{\text{mech\_horizont}} \frac{P_{\text{Vmax}}}{P_{\text{FUmax}}} - \mu \cdot P_{\text{mech\_horizont}} \frac{P_{\text{Vmax}}}{P_{\text{FUmax}}} + P_{\text{GV}} \text{ wenn } P_{\text{mech\_horizont}} \geq 0 \quad (8)$$

Mit  $\mu = \mu_{\text{Motor}} \cdot \mu_{\text{Getriebe}} \cdot \mu_{\text{Kraftübertrag}}$  als Gesamtwirkungsgrad

Durch Einsetzen und Umformen ergibt sich folgendes überbestimmtes Gleichungssystem:

$Ax=b$  mit

$$A = \begin{pmatrix} \frac{P_{ges} - P_{GV}}{\left(1 + \frac{P_{vmax}}{P_{FUmax}}\right)} & -\frac{4}{D^2} \bar{a} \bar{v} & -m_{ges} g \frac{d}{D} \bar{v} \cdot \text{sgn}(v) & -m_{ges} g \frac{2}{D} \bar{v} \cdot \text{sgn}(\bar{v}) \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$x = \begin{pmatrix} \frac{1}{(2-\mu)} \\ J \\ \mu_L \\ f \end{pmatrix} \text{ und}$$

$$b = m_{ges} \bar{a} \bar{v}$$

Gleichungssysteme dieser Art lassen sich grundsätzlich durch Rechtsmultiplikation mit der Transponierten von A und anschließender Invertierung von  $A^T A$  lösen. Das Ergebnis ist eine Lösung, die die Fehlerquadrate der einzelnen Zeilen optimiert (Least-Square-Lösung). Problematisch zeigt sich bei dem gegebenen Gleichungssystem, dass die Vektoren in A linear abhängig sind, weshalb die beschriebene Lösung kein brauchbares Ergebnis liefert. Da der Wertebereich für die Parameter allerdings bekannt ist, kann innerhalb dessen nach einer Lösung gesucht werden.

Die Implementation der Lösung wurde in Matlab durchgeführt. Matlab stellt die Funktion „lsqin“ für die Lösung von kleinste Quadrate Problemen bereit. Es können neben dem Gleichungssystem Nebenbedingungen in Form von Gleichungen und Ungleichungen, untere und obere Grenzen für die Parameter sowie eine Startlösung angegeben werden. Als Lösung werden der Vektor x zurückgegeben sowie optional Parameter zum Lösungsverfahren und Güte der Lösung.

Exemplarisch sei die Lösung für ein rückspeisefähiges Paletten-Regalbediengerät dargestellt. In der Grafik sind zum einen die gemessene Leistungsaufnahme (blau), die berechnete Leistungsaufnahme des Modells vor (rot) und nach der Anpassung (schwarz) sowie die Geschwindigkeit und Beschleunigung dargestellt.

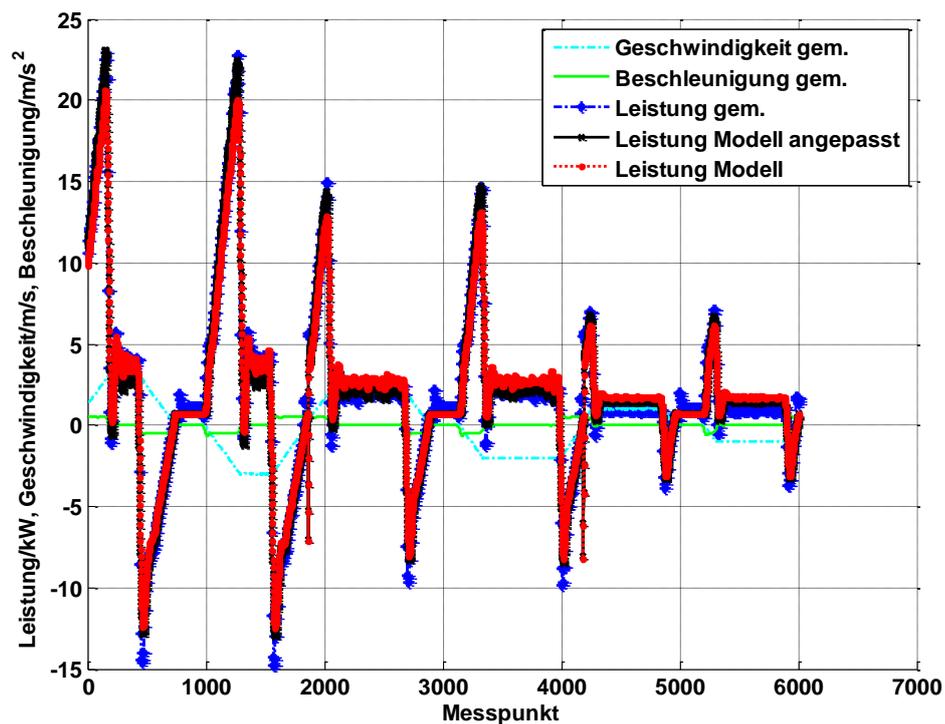


Abbildung 8: Modellanpassung des Fahrwerkes für die Geschwindigkeiten 3, 2 und 1 m/s

Es zeigt sich insgesamt eine gute Abbildung der gemessenen Werte zu den Modellwerten. Für das Beispiel sind in der nachfolgenden Tabelle die unbekannt Parameter in ihren Werten vor und nach der Anpassung dargestellt.

Größe	Einheit	Parameter initial	Parameter angepasst
Gesamtwirkungsgrad	-	0.88	0.78
Gesamtträgheitsmoment bezogen auf Radachse	kg m <sup>2</sup>	0	40
Lagerreibwert	-	0.0032	0.0014
Hebelarm der rollenden Reibung	m	0.0015	0.0011

Allerdings fällt bei den Kurven auf, dass im Bereich der Konstantfahrt auch nach der Anpassung weiterhin Abweichungen bestehen. Im Beispiel insbesondere bei den Geschwindigkeiten 3 m/s und 1 m/s. Die Ursache für dieses Verhalten ist in dem Modellansatz mit konstanten Wirkungsgraden über den gesamten Bereich der Leistungsanforderung zu suchen. Abbildung 9 zeigt den Wirkungsgradverlauf für drei Asynchronmotoren über der relativen Leistungsanforderung.

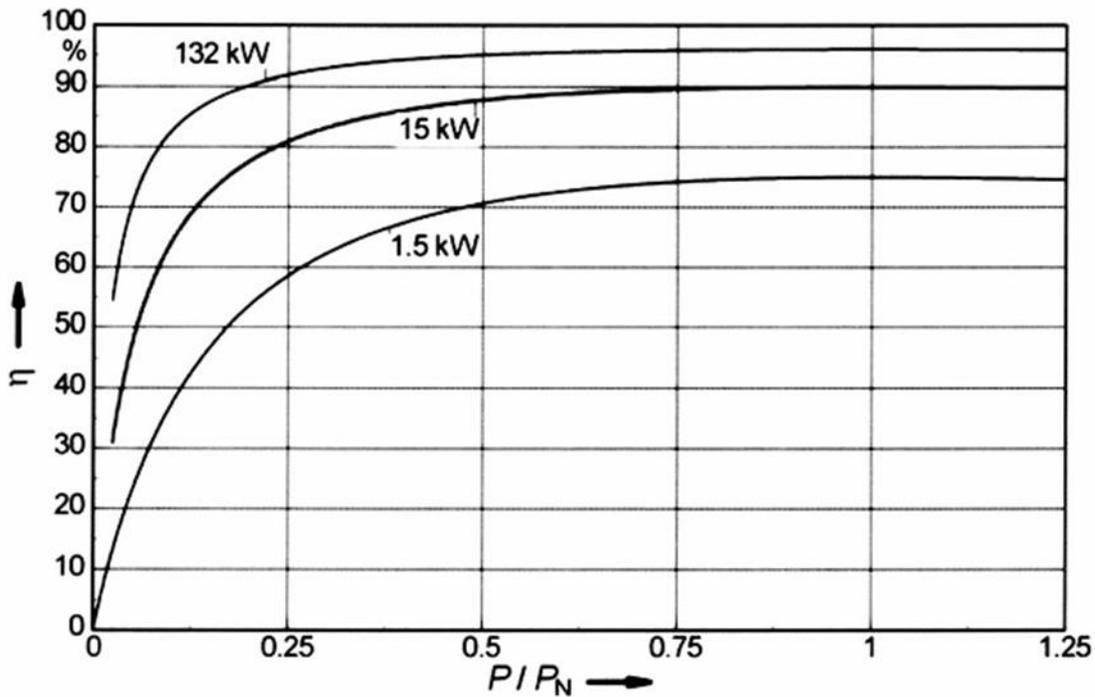


Abbildung 9: Wirkungsgradverlauf von Asynchronmotoren in Abhängigkeit der relativen Belastung P/P<sub>N</sub> (Volz 2010)

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich der Wirkungsgrad über der Leistungsanforderung ändert. Um eine bessere Modellanpassung zu erreichen, müsste dieses lastabhängige Verhalten im Modell Berücksichtigung finden.

### 8.1.2 Hubwerk

Analog zum Fahrwerk lässt sich die vorgeschlagene Anpassung auch für das Hubwerk durchführen. Die Gesamtleistungsaufnahme ergibt sich mit dem oben vorgestellten Modell zu:

$$\begin{aligned}
 P_{ges} = & 2 \cdot P_{mech\_vertikal} \cdot \mu_{HW} \cdot P_{mech\_vertika} + 2 \cdot P_{mech\_vertika} \frac{P_{VmaxHW}}{P_{FUmaxHW}} & (10) \\
 & - \mu_{HW} \cdot P_{mech\_vertika} \frac{P_{VmaxHW}}{P_{FUmaxHW}} + P_{GV} \\
 & + \left( 1 - \frac{v_{HW}}{v_{HWmax}} \right) P_{hold} \text{ wenn } P_{mech\_horizont} \geq 0
 \end{aligned}$$

Mit  $\mu_{HW} = \mu_{MotorHW} \cdot \mu_{GetriebeHW} \cdot \mu_{KraftübertragHW}$  als Gesamtwirkungsgrad des Hubwerkes

Der letzte Term berücksichtigt zusätzlich die Halteleistung, die aufgebracht werden muss, solange die mechanische Bremse des Hubwerkes nicht eingreift. Das zugrunde gelegte Gleichungssystem zur Parameteridentifikation ist nachfolgend dargestellt.

$$Ax=b$$

$$A = \begin{pmatrix} -8\bar{a}_{HW}\bar{v}_{HW} & 4\bar{a}_{HW}\bar{v}_{HW} \frac{1}{D_{HW}^2} + (\bar{a}_{HW} + g)m_{lift}\bar{v}_{HW} \end{pmatrix}$$

$$x = \begin{pmatrix} J_{HW} \\ J_{HW}\mu_{HW} \\ \mu_{HW} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$b = 2m_{lift}\bar{v}_{HW}(\bar{a}_{HW} + g) - \frac{P_{gesHW} - P_{GVHW} - \left(1 - \frac{\bar{v}_{HW}}{v_{HWmax}}\right)P_{Hold}}{\left(1 + \frac{P_{vmaxHW}}{P_{FUmaxHW}}\right)}$$

Für die beiden Parameter Trägheitsmoment und Gesamtwirkungsgrad des Lifts ergeben sich folgende Werte vor und nach der Anpassung.

Größe	Einheit	Parameter initial	Parameter angepasst
Gesamtwirkungsgrad Lift	-	0.8910	0.6748
Gesamtträgheitsmoment bezogen auf Radachse Lift	kg m <sup>2</sup>	0	300

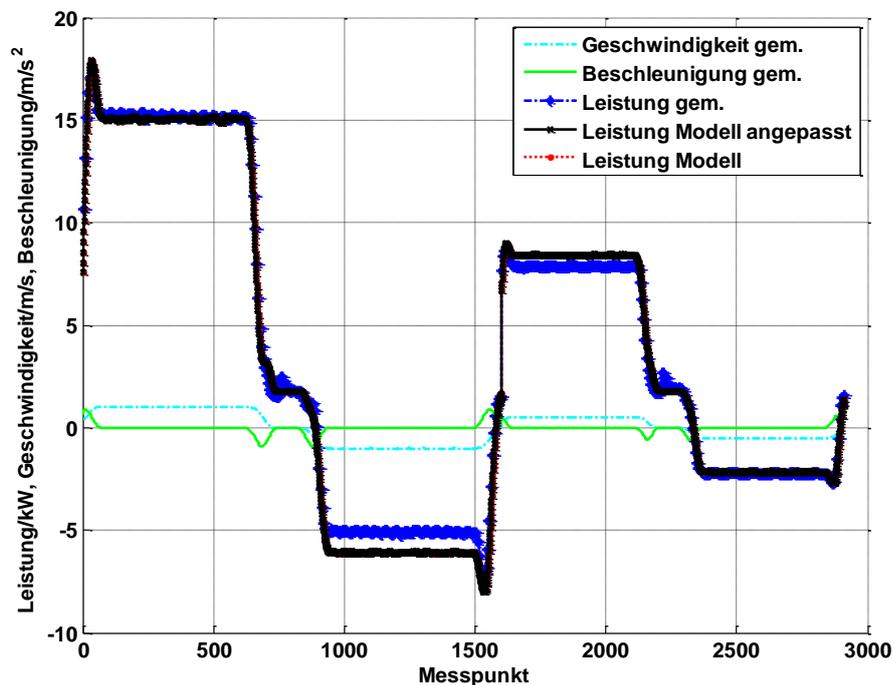


Abbildung 10: Modellanpassung des Hubwerkes für die Geschwindigkeiten 0,5 und 1 m/s

Das Ergebnis der Anpassung zeigt Abbildung 10. Es ist zu erkennen, dass das Modell und die Messung verglichen mit der Messung des Fahrwerkes deutlichere Abweichungen aufweist. Neben der Änderung des Wirkungsgrades in Abhängigkeit der Leistungsanforderung

kommt hinzu, dass die Optimierungslösung nur für den positiven Teil der Leistungskurve angewandt werden kann, da streng genommen die Verluste in ihrem Betrag in den Gleichungen erfasst werden müssten. Eine Berücksichtigung dieses Sachverhaltes ändert das dargestellte Gleichungssystem in ein nichtlineares Optimierungsproblem, was deutlich aufwendigere Lösungsverfahren erfordert. Des Weiteren weist die Anlage bei der Rückspesung einen deutlich geänderten Gesamtwirkungsgrad auf.

### 8.1.3 Lastaufnahmemittel

Abbildung 11 zeigt die Leistungsaufnahme eines RBG ohne und mit Lastaufnahmemittel (LAM).

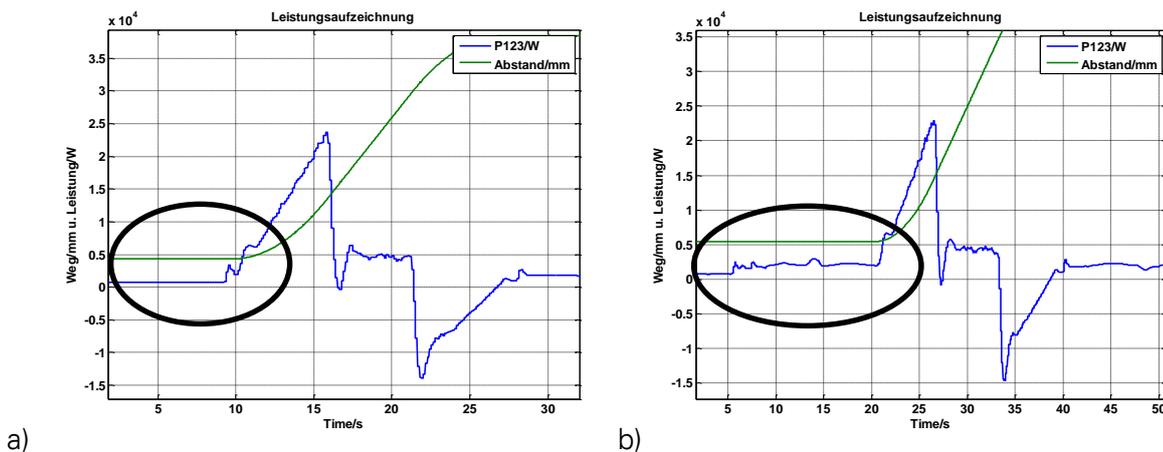


Abbildung 11: Leistungsaufnahme des RBG ohne a) und mit b) LAM-Zyklus

Wie zu erkennen, ist die Erfassung der Leistungsaufnahme mit einem konstanten Bedarf nur eine Näherung zum tatsächlichen Verlauf. Ohne zusätzliche Erfassung der Bewegung ist eine Anpassung aufgrund der Zeitdauer und Höhe der erfassten Leistung möglich, womit die Eignung zur Onlinediagnose nur eingeschränkt gegeben ist. Die externe Messung des Bewegungsablaufes ist nur mit einem erheblichen Aufwand möglich, da dafür eine Erfassung aus dem Regal erforderlich ist. Darüber hinaus besteht die Herausforderung darin, den LAM-Zyklus (im Beispiel ca. 300 W Leistungsaufnahme) zusammen mit den Fahrmotoren aufzuzeichnen (2,3 kW). Grundsätzlich bedeutet dies, dass der Messbereich durch das Lastaufnahmemittel nicht optimal ausgenutzt wird und sich im Vergleich große Messtoleranzen ergeben. Aus diesem Grund ist eine Erfassung der Leistungsaufnahme am Umrichter des LAM selbst und damit die ausschließliche Erfassung nur dieses Leistungsbedarfes sinnvoll.

### 8.1.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann die automatische Anpassung des Modells insbesondere beim Fahrwerk als zufriedenstellend bewertet werden. Die Modellierung der Leistungsaufnahme des Hubwerkes weist im Vergleich mit dem Fahrwerk größere Ungenauigkeiten auf. Beim Lastaufnahmemittel wird auf ein detailliertes Modell verzichtet und mit einer konstanten Leistungsaufnahme für die Zeit des LAM-Zyklus gearbeitet.

Im folgenden Abschnitt werden die Messergebnisse dargelegt. Des Weiteren wird eingeschätzt, ob sich die Leistungs- und Bewegungsablaufmessung zur Diagnose eignen.

## 8.2 ANALYSE DER MESSERGEBNISSE

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Messeinsätze untersucht. Im Vordergrund stehen die Messungen bei Busch-Jaeger, da es bei diesen möglich war zum einen die Palettengeräte vor und nach der Wartung in ihrer Leistungsaufnahme zu vermessen. Zu anderen können baugleiche Geräte (jeweils Paletten und Kleinteilelager) untereinander verglichen werden.

Das Lager bei Busch-Jaeger in Lüdenscheid besteht aus sechs Gassen Palettenlager mit je einem Regalbediengerät MSingle von Mlog. Gasse eins ist mit einer zweifach tiefen Lagerung ausgestattet. Die Geräte haben eine maximale Geschwindigkeit des Fahrwerkes von 2,3 m/s und des Hubwerkes von 0.67 m/s.

Darüber hinaus ist das Logistiksystem mit einem Automatischen Kleinteilelager (AKL) ausgestattet. In 10 Gassen befinden sich jeweils Geräte der Firma TGW von Typ Mustang mit einer Höchstgeschwindigkeit des Fahrwerkes von 6 m/s und des Hubwerkes von 3 m/s.

Die Wartungsarbeiten wurden in zwei Phasen jeweils während der Nachtschichten durchgeführt. Zwischen Ende September und Anfang Oktober 2015 wurden im Palettenlager die Schienen in den Gassen eins und zwei geschliffen sowie die Laufräder ausgetauscht. Die halbjährliche Wartung der Geräte fand Anfang Dezember 2015 innerhalb von 14 Tagen statt. Dabei wurden auch die Laufräder der Gassen vier bis sechs gewechselt. Im Dezember erfolgte gleichzeitig die Wartung der Regalbediengeräte des AKL.

Während dieser Zeit wurden in Absprache mit dem Wartungspersonal fünf Paletten-RBG (Gassen zwei bis sechs) jeweils vor und nach der Wartung vermessen. Für die Gasse zwei wurde darüber hinaus während der ersten Wartungsphase das Fahrwerk gemessen. Im AKL erfolgte die Messung von fünf Geräten.

Die Messungen gestalteten sich im Detail wie folgt. Es wurden wie oben dargestellt mindestens fünf Fahrten von Fahr- und Hubwerk durchgeführt. Anschließend erfolgte die Ablage der Messwerte in der beschriebenen Datenbank. Um zu entscheiden, ob sich zwischen den Messungen signifikante Änderungen ergeben und diese mit den Energiebedarfsmodell ermittelt werden können, wurden die Ergebnisse statistisch ausgewertet. Hierfür wurden aus den fünf Wiederholungen für jeden Messpunkt die Mittelwerte und Standardabweichungen bestimmt. Damit ist es mit einem gegebenen Vertrauensbereich von 95 % möglich zu entscheiden, ob die Änderungen groß genug sind, um erfasst zu werden. Ausschlaggebend ist, ob sich die Konfidenzintervalle zweier Messungen überlappen oder nicht. Abbildung 12 verdeutlicht diesen Zusammenhang für zwei unterschiedliche Verteilungen, die einer signifikanten Änderung des Systems entsprechen.

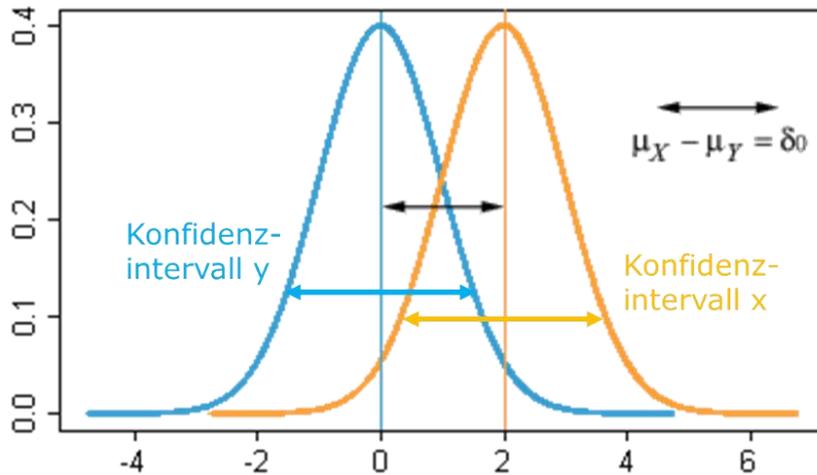


Abbildung 12: Stichproben aus unterschiedlichen Verteilungen

Nachfolgend werden exemplarisch die Ergebnisse aus Gasse zwei des Palettenlagers dargestellt. Darüber hinaus befinden sich die Messungen der anderen Gassen sowie eine stichpunktartige Bewertung im Anhang.

### 8.2.1 Palettenlager-Fahrwerk

Abbildung 13 zeigt die Leistungsaufnahme des Fahrwerkes vom Ein- und Auslagerpunkt weg fahrend (vorwärts).

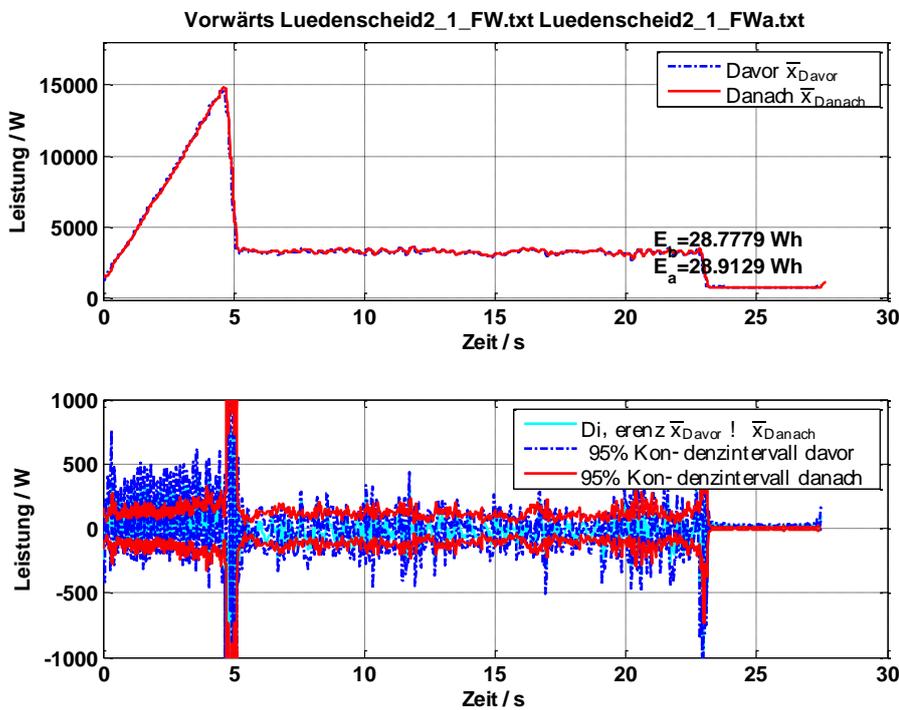


Abbildung 13: Leistungsaufnahme des RBG-Fahrwerkes der Gasse 2 vom Schaltschrank weg fahrend

Im oberen Teil ist die Leistungsaufnahme für die Messung vor und nach der Wartung gezeigt. Zusätzlich ist der Energiebedarf ( $E_b$  und  $E_a$  Energiebedarf vor (before) und nach (after) der Wartung) für das gezeigte Spiel in der Grafik notiert. Darunter sind die Differenz der Mittelwerte dargestellt sowie die 95 % Konfidenzintervalle. Während der Konstantfahrt betragen diese etwa 150 W bis 200 W und überschneiden sich. Im Bereich der Beschleunigungs- und Abbremsphase sind diese z. T. deutlich größer, weil diese Phasen geringfügig zeitlich voneinander abweichen. Beim Übergang vom Beschleunigen in die Konstantfahrt kommt dieses besonders zum Tragen. Die Fahrt in die entgegengesetzte Richtung zeigt Abbildung 14.

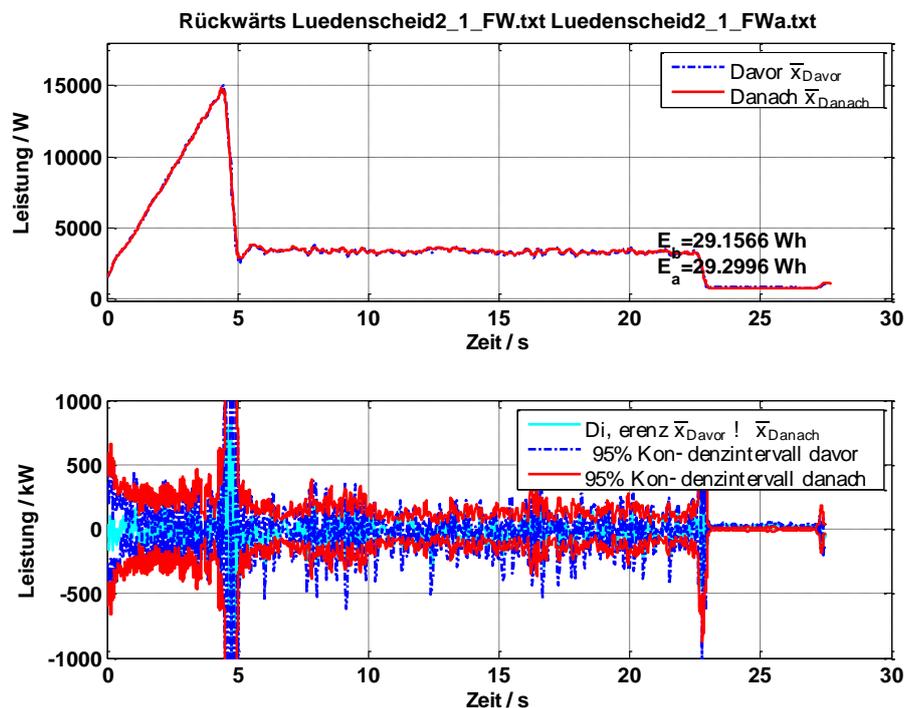


Abbildung 14: Leistungsaufnahme des RBG-Fahrwerkes der Gasse 2 zum Schaltschrank hin fahrend

Es kann grundsätzlich ein ähnlicher Verlauf zur Vorwärtsfahrt beobachtet werden. Aufgrund der Überlappung der Konfidenzintervalle ist es nicht möglich, anhand der Höhe der Leistungsaufnahme einen Unterschied vor und nach der Wartung zu identifizieren. Somit muss festgestellt werden, dass ein Radwechsel nicht anhand der aufgenommenen Leistung identifiziert werden kann. In der Folge lässt sich auch das Modell nicht zur Detektion einsetzen, da sich verschlissene Laufräder nicht in der aufgenommenen Leistung niederschlagen. Auch ein Vergleich mit den Messergebnissen während der Vorabversuches zeigt sich ein ähnliches Verhalten (vgl. auch Abbildung 15).

Darüber hinaus wurden weitere Untersuchungen bemüht, eine Änderung des Systemzustandes in der Leistungsaufnahme zu identifizieren. Hierzu wurden die Messungen vor dem

Schleifen der Schiene (Fahrtrlänge etwas kürzer) mit der Messung nach Abschluss der Wartung sowie davor verglichen. Es zeigte sich in der Fourier Analyse der Konstantfahrt, dass nach dem Schienenschliff und Laufradwechsel die Amplitude bei etwa 2 Hz deutlich reduziert ist. Abbildung 15 zeigt den Leistungsverlauf und das Frequenzspektrum der Konstantfahrt für alle drei Messungen. Die Amplitude bei ca. 2 Hz ist vor und nach der Wartung deutlich geringer, womit die Änderung im Schliff der Schiene begründet ist (vgl. auch Anhang Laufradwechsel ohne Schienenschliff).

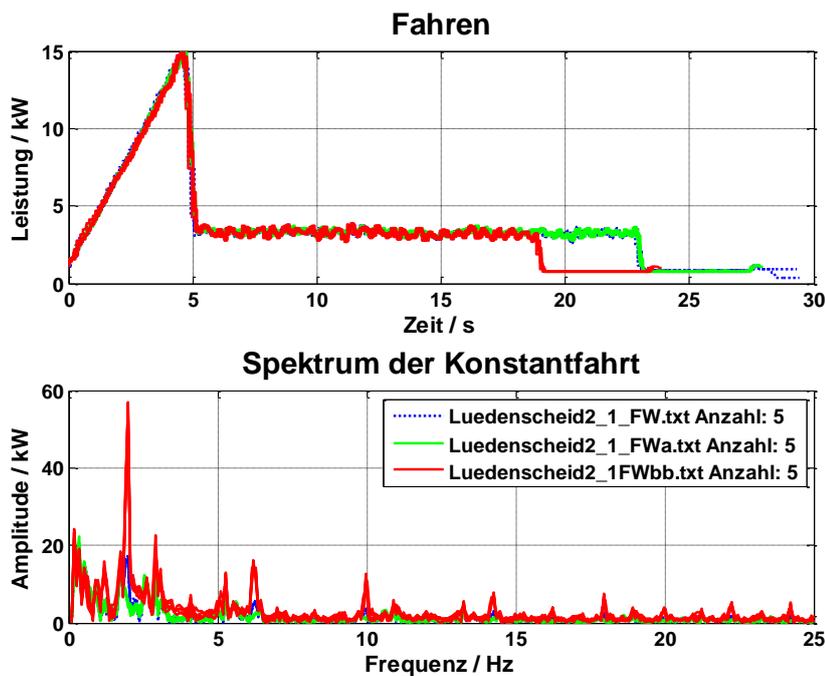


Abbildung 15: Frequenzanalyse der Konstantfahrt vor Schienenschliff/Laufradwechsel (2\_1FW\_bb) sowie vor (2\_1\_FW) und nach (2\_1\_FWa) Wartung

Dies begründet die Annahme, dass durch die Schienenstöße Schwingungen des Mastes angeregt werden. Die Mastschwingungen führen dazu, dass während der Konstantfahrt periodisch mehr bzw. weniger Leistung aufgenommen wird. Anders betrachtet beginnt der Mast nach dem Überfahren eines Schienenstoßes in Richtung der Gassen zu schwingen (vgl. Abbildung 16). Der Schienenstoß verhält sich in diesem Zusammenspiel wie eine Impulserregung.

Zusammenfassend ist die Beseitigung von Schienenstößen durch Schienenschleifen mittels Fourieranalyse unabhängig vom vorgestellten Berechnungsmodell erkennbar. Der Laufradwechsel allein zeigt entgegen den ursprünglichen Erwartungen keine signifikanten Veränderungen in der Leistungsaufnahme.

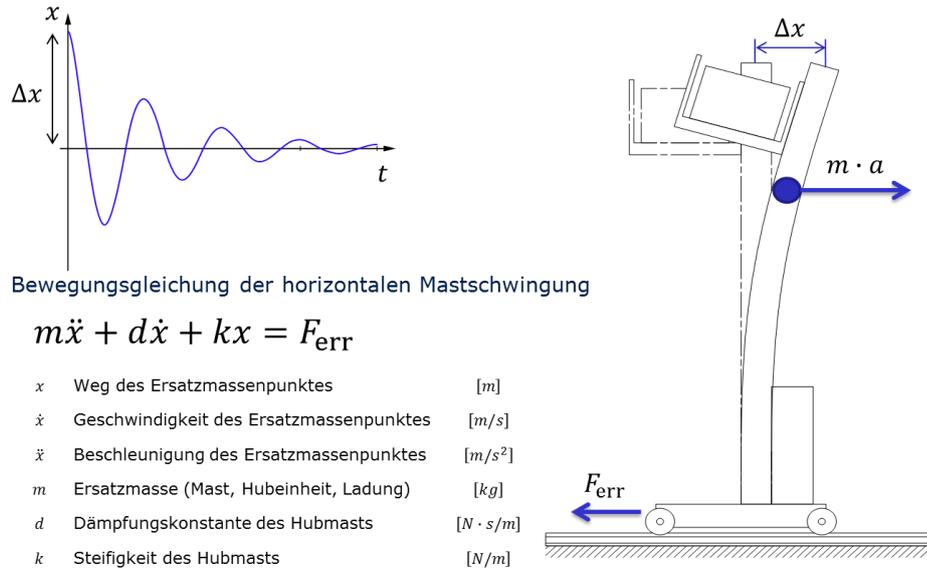


Abbildung 16: Mastschwingung in Folge Erregung (Zhakov u. a. 2015)

### 8.2.2 Palettenlager-Hubwerk

Bei den Hubwerken wurden keine bedeutenden Änderungen im Zuge der Wartung vorgenommen. Aus diesem Grund war zu erwarten, dass sich in den Messungen keine signifikanten Änderungen ergeben. Die Messergebnisse für den Hebevorgang in Gasse zwei in Abbildung 17 bestätigen diese Annahme.

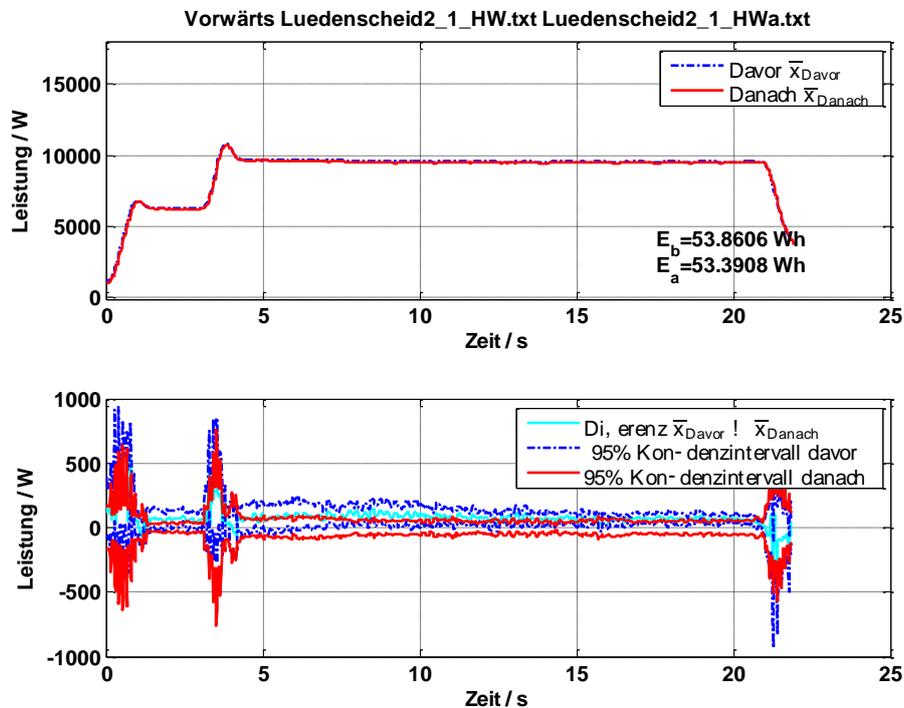


Abbildung 17: Hebevorgang des RBG aus Gasse 2 im Palettenlager

Es ist zu erkennen, dass sich die Konfidenzintervalle im unteren Bereich der Grafik überschneiden. Darüber hinaus ist in der Leistungsaufnahme auffällig, dass die Anlage zunächst mit einer geringen Geschwindigkeit zu heben beginnt, bevor auf die maximal mögliche beschleunigt wird.

Abbildung 18 zeigt die Messungen des Senkvorgangs. Dabei ist die Leistungsaufnahme deutlich geringer und die gewonnene Energie wird im Bremswiderstand umgewandelt, so dass im Wesentlichen nur der Grundbedarf der Anlage an Leistung benötigt wird. Auch bei dieser Messung zeigen sich keine signifikanten Unterschiede der Messungen vor und nach der Wartung.

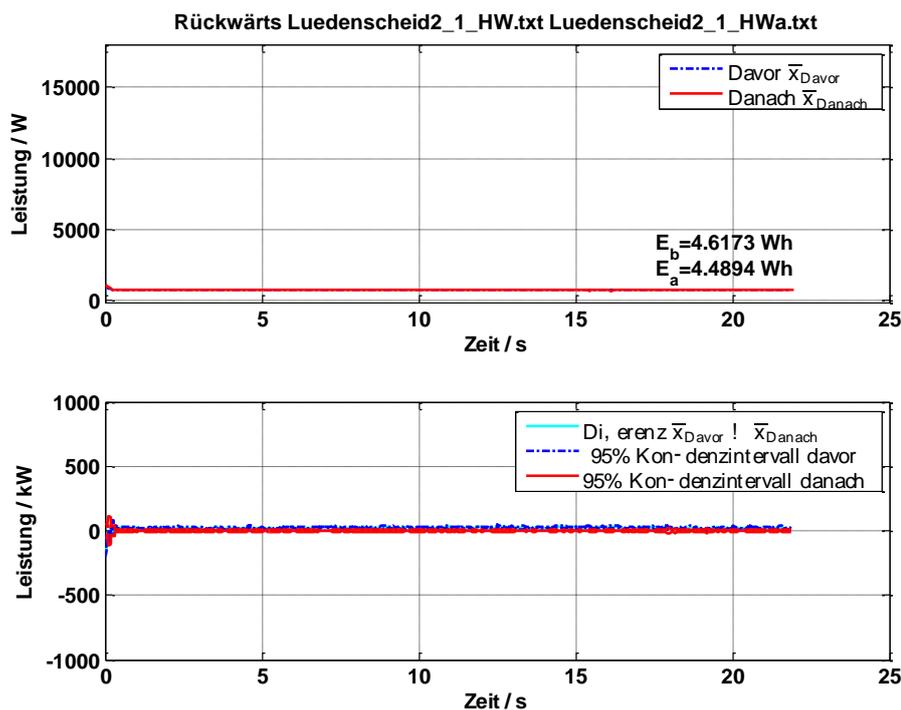


Abbildung 18: Senkvorgang des RBG aus Gasse 2 im Palettenlager

Neben den Einzelmessungen wurden die Messungen untereinander verglichen. Der Hubwerksvergleich in den Gassen drei, vier, fünf und sechs (gleiche Regaldimension) zeigt, dass während der konstanten Fahrt bis zu 0,5 kW Leistungsdifferenz zwischen den Hubwerken auftreten (vgl. Abbildung 19). Darüber hinaus fällt auf, dass die Leistungskurven des RBG in Gasse vier deutlich weiter streuen als die der anderen Geräte. Die Ursache dafür ist unbekannt.

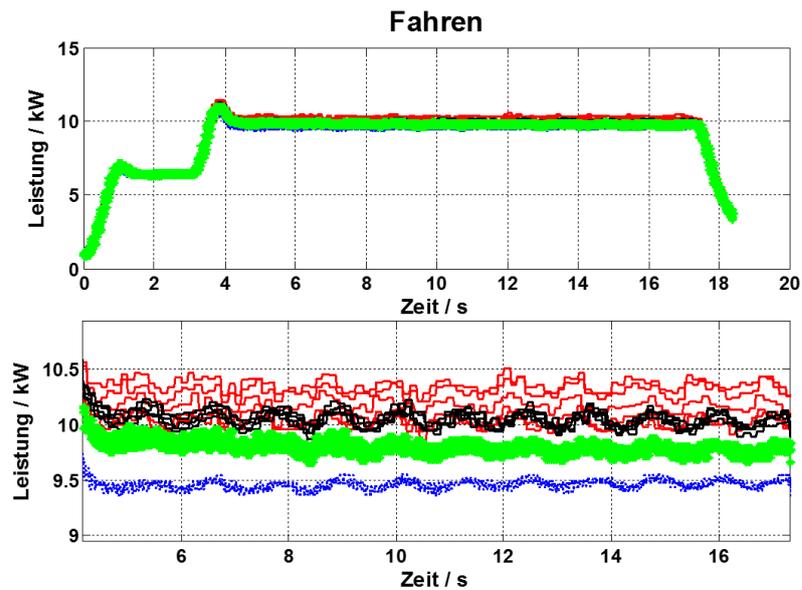


Abbildung 19: Vergleich der Leistungsaufnahme in den Hubwerken der Gasse 3, 4, 5, und 6

Zusammenfassend zeigt sich bei den Hubwerken ein differenziertes Bild. Der gemessene Unterschied für die ungleiche Leistungsaufnahme in den Hubwerken konnte während der Projektlaufzeit nicht ermittelt werden.

### 8.2.3 Palettenlager-Lastaufnahmemittel

Die Erfassung der Lastaufnahmemittel erfolgte in Einzelmessungen. Aufgrund der Zugänglichkeit im Schaltschrank der Anlage konnte die Leistungserfassung am Umrichter des LAM auf den produktiv arbeitenden Anlagen nicht durchgeführt werden. Es wurde auf Messungen am Gasseneingang zurückgegriffen. Diese zeigen keine Auffälligkeiten. Da an den Lastaufnahmemitteln keine Veränderungen durchgeführt wurden, entspricht dies den Erwartungen.

### 8.2.4 AKL-Regalbediengeräte

Bei den Regalbediensystemen im Automatischen-Kleinteile-Lager (AKL) wurden die Anlagen der Gassen 1, 2, 8, 9 und 10 analog dem Vorgehen bei den Palettengeräten vermessen. Ein Vorher-Nachher-Vergleich war nicht möglich, da zeitgleich an mehreren Anlagen die Wartung durchgeführt wurde und die Steuerung des Hubwerkes für die Messung angepasst werden musste. Im Ergebnis können die Anlagen nur untereinander verglichen werden. Abbildung 20 zeigt die Leistungsaufnahme in den Fahrwerken der Gassen 1, 2, 8 und 9.

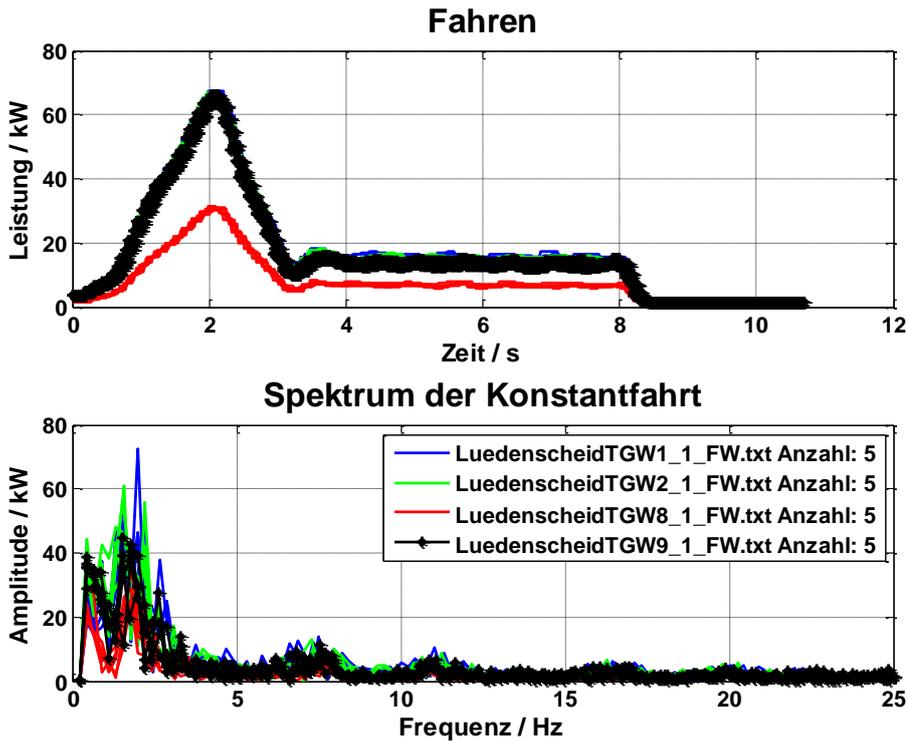


Abbildung 20: Fahrwerksleistungsaufnahme in den AKL-Gassen 1, 2, 8, 9

Für die Fahrwerksfahrten in den Gassen zeigen sich ähnliche Spektren, in denen sich Mast-schwingungen in einem Bereich von 1,5 Hz bis 2 Hz widerspiegeln. Das Fahrwerk des RBG aus Gasse 8 fällt heraus, da es eine um etwa die Hälfte geringere Leistungsaufnahme aufweist bei vergleichbarem Bewegungsablauf. Die Ursache wird in einer gelösten Strommesszange vermutet. Abbildung 21 stellt die Konstantfahrten im Detail dar.

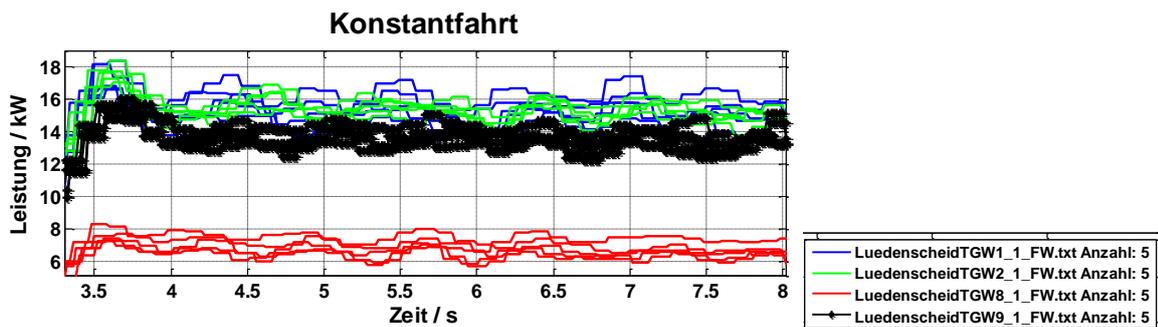


Abbildung 21: Vergleich der Konstantfahrten Fahrwerk Gassen 1, 2, 8, 9

Die Leistungsaufnahmen der Anlagen schwanken in einem Bereich von ca. 13 kW bis 16 kW. Die Ursachen für dieses Verhalten konnten im Projektzeitraum nicht ermittelt werden.

Die Leistungsaufnahme der AKL-Hubwerke visualisiert Abbildung 22. Bei den Hubwerken ist die Leistungsaufnahme der Anlagen in Gasse 2 und 8 um etwa 800 W geringer über den Bewegungsablauf. Darüber hinaus verhalten sich die Anlagen unauffällig.

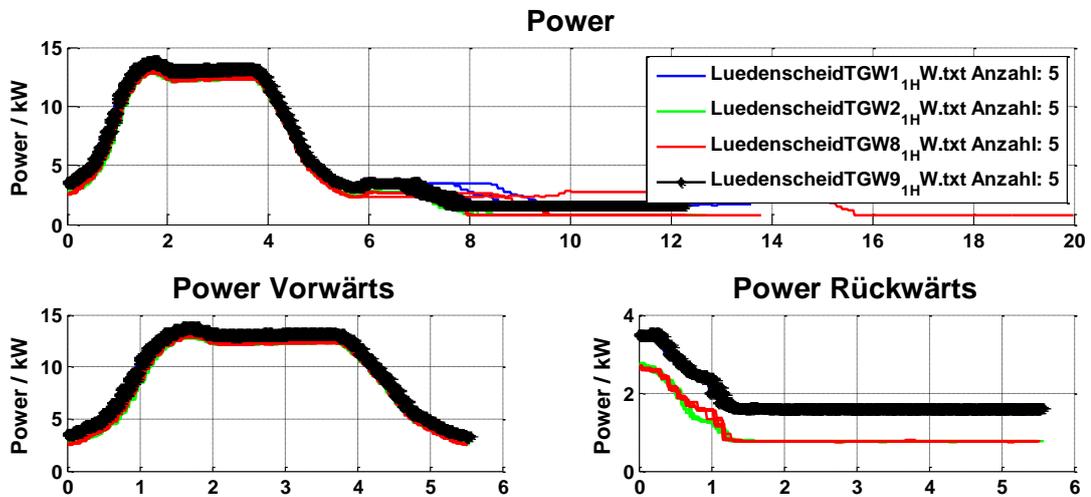


Abbildung 22: Hubwerksleistungsaufnahme in den AKL-Gassen 1, 2, 8, 9

Eine Besonderheit stellt die Eigenentwicklung (ABB-Antriebe und -Regler sowie -Steuerung) der Gasse 10 dar. Die Anlage wird mit geringerer Geschwindigkeit betrieben, weshalb die Leistungsaufnahme in den Bewegungsphasen geringer ist aber bei gleichem Ziel länger dauert. Bei der Hubwerksmessung von Anlage 10 fällt auf, dass während der fünften Wiederholung die Leistungsaufnahme ansteigt. Die Ursache dafür ist unbekannt.

Zusammenfassend kann die Leistungsbedarfserfassung auch bei den AKL-RBG eingesetzt werden. Eine Ursachenzuordnung fällt im Projekt aufgrund der parallelen Arbeit an mehreren Geräten schwer. Insgesamt müsste die Beobachtung der Leistungsaufnahme während einer längeren Betriebsphase oder halbjährlich wiederkehrend durchgeführt werden, um Veränderungen nachvollziehen zu können. Dazu wäre eine Integration der Leistungsbedarfsüberwachung (auf Basis von Umrichterdaten) in die Anlagen wünschenswert.

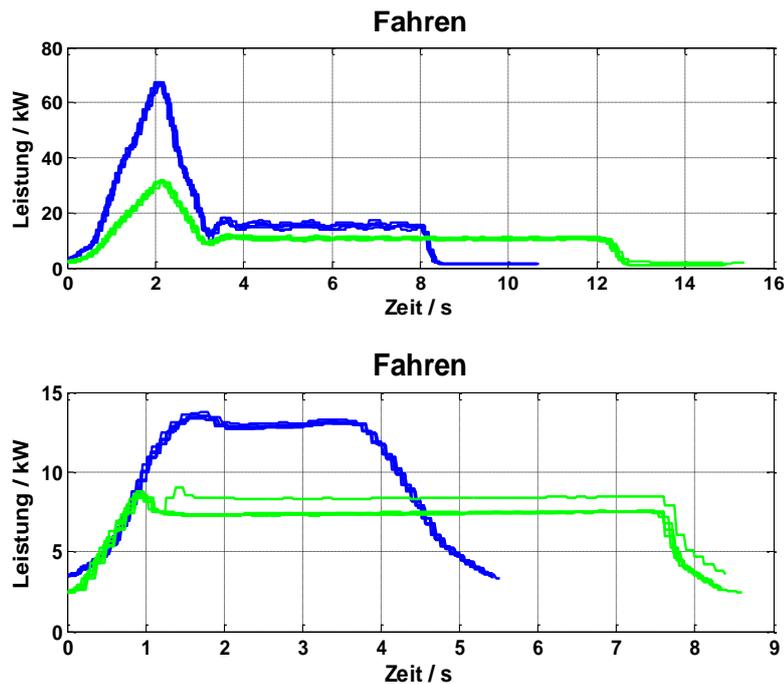


Abbildung 23: Leistungsaufnahme von Fahr und Hubwerk Gasse 10 (Eigenentwicklung)

### 8.2.5 Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Laufradwechsel und der Schienenschliff auf die Höhe der Leistungsaufnahme eines RBG-Systems keinen signifikanten Einfluss zeigen. Somit sind auch die Änderung der Reibungsverhältnisse zwischen Rad und Schiene gering. Folglich besitzt die Berechnung des Fahrwiderstandes über einen breiten Bereich Gültigkeit.

Da sich die aufzubringende mechanische Leistung aus Kreisfrequenz (Drehzahl) und Moment errechnet, ist plausibel, dass eine Verringerung des Raddurchmessers bei gleicher Bewegungsablaufforderung zu einer Erhöhung der Drehzahl bei kleinerem Moment (geringerer Hebelarm) führt. Mit neuen Rädern ergibt sich eine höhere Momentanforderung bei kleinerer Drehzahl. In der Folge bleiben das Produkt aus beiden Größen und damit die Leistungsaufnahme konstant.

Darüber hinaus lassen sich mit dem entwickelten Verfahren Unterschiede in der Leistungsaufnahme von RBG des gleichen Typs identifizieren. Die detaillierten Ursachen dafür müssen im Anschluss an das Projekt geklärt werden.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass es unabhängig vom Berechnungsmodell aufgrund der Kurvenform möglich ist, Mastschwingungen (bzw. deren Frequenz) zu ermitteln. Perspektivisch sollte auch die Veränderung dieser z. B. infolge Steifigkeitsverlust möglich sein.

## 9 DOKUMENTATION VORGEHENSWEISE, VERFAHREN

Die Vorgehensweise gestaltet sich nach den zuvor dargelegten Abschnitten. Im Einzelnen sind folgende Punkte durch einen Wartungstechniker auszuführen. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Messsystem wie oben beschrieben zur Verfügung steht.

- Aufbau der Messtechnik am Gasseneingang
- Anschluss des Leistungsmessgerätes in der Aronschaltung (vgl. Anschluss der Messgeräte)
- Anschluss und Ausrichtung des Laserabstandssensors (vgl. Anschluss der Messgeräte)
- Aufzeichnung von mindestens fünf Fahrzyklen für Fahrwerk, Hubwerk und Lastaufnahmemittel
- Zerlegen der Messdateien in einzelne Fahrten (z. B. Triggerpunkt Beginn der Fahrt)
- Übereinanderlegen der Messung
- Statistische Analyse
- Gegeben falls wiederholen der Messung und vergleichen mit den Ausgangsmessungen

## 10 BEWERTUNG DES ENTWICKELTEN VERFAHRENS

Zusammenfassend ist im Projekt „Diagnose von Regalbediengeräten mittels Energiebedarfsanalyse“ eine Methode entstanden, die es ermöglicht sich entwickelnde Unterschiede in der Leistungsaufnahme zu identifizieren. Darüber hinaus ist es durch eine Fourieranalyse der Leistungsaufnahme möglich zu bewerten, ob im RBG-System Mastschwingungen angeregt werden. Dies ermöglicht u. a. Rückschlüsse auf den Verschleißzustand von Schienenstößen. Perspektivisch lässt die Methode auch die Identifikation von Versagensfällen oder sich entwickelnden Schäden zu. Das gefundene Vorgehen zur Identifikation von Mastschwingungen greift dabei auf Methoden der Signalanalyse zurück und benötigt keine modellbasierte Berechnung des Leistungsbedarfes. Darüber hinaus wäre es außerhalb dieses Projektes von Interesse, die Änderung des Leistungsbedarfes vom Neugerät zum verschlissenen System, zum Beispiel in einem Halbjahresrhythmus (oder durch Erfassung des Leistungsbedarfes auf den Anlagen), zu dokumentieren. Dies stellt die Grundlage dar, um zu entscheiden, ob auch der modellbasierte Ansatz zur Bestimmung von Änderungen genutzt werden kann.

Im Ergebnis des Forschungsprojektes steht das entwickelte innovative Verfahren auf Basis der Fourieranalyse für eine Integration in die RBG-Systeme bereit.

## LITERATUR

Scheffler, M. (1994):

Grundlagen der Fördertechnik - Elemente, Triebwerke. Braunschweig, Wiesbaden : Vieweg. – ISBN: 978-3-528-06558-3

Volz, G. (2010):

Effiziente elektrische Antriebe und Drehzahlsteuerung in der Technischen Gebäudeausrüstung - VDI 6014 und Initiative EnergieEffizienz der dena. Stuttgart

Zhakov, A. ; Schmidt, T. ; Dannemann, M. & Modler, N. (2015):

Einsatz faser- bzw. textilverstärkter Verbundwerkstoffe zur Schwingungsdämpfung bei Hubmasten von Regalbediengeräten. In: WGTL-Fachkolloquium, Bd. 11 (30. Oktober 2015)

## ANHANG

Im Anhang sind die Messwerte zum Palettenlager bei Busch-Jaeger für die Gassen drei bis sechs jeweils für Fahr und Hubwerk dargelegt.

### GASSE 3

#### Fahrwerk

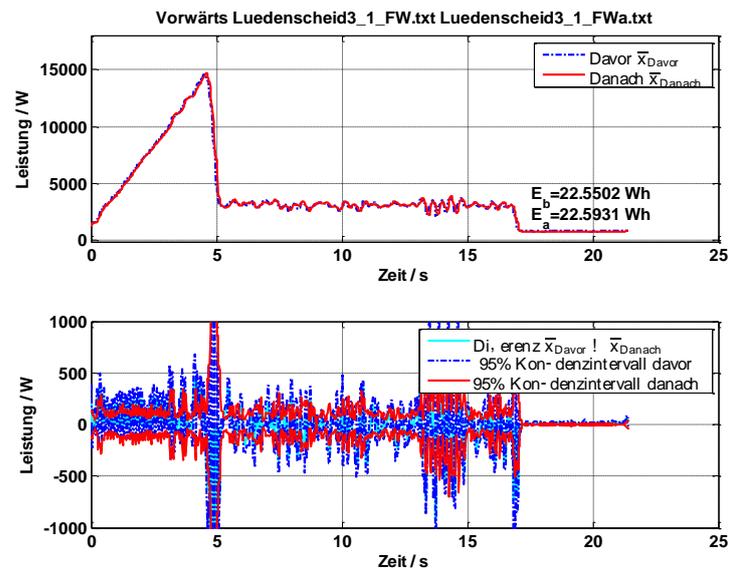


Abbildung 24: Gasse 3 Fahrt vorwärts

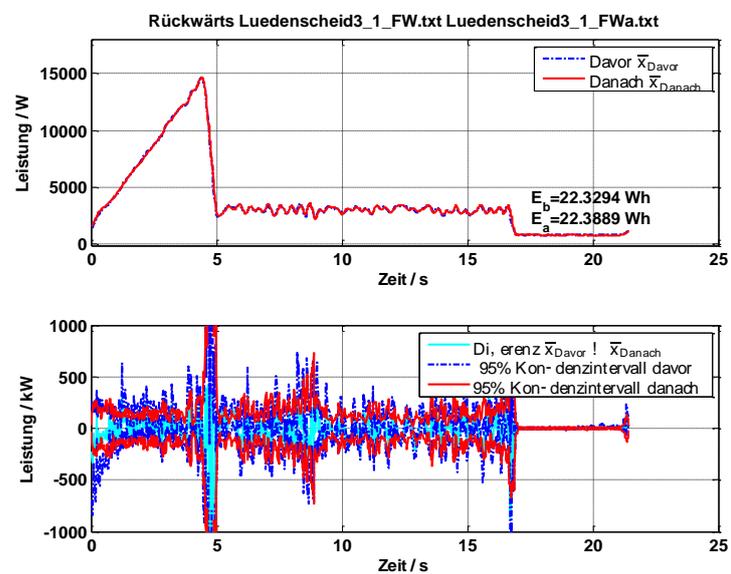


Abbildung 25: Gasse 3 Fahrt rückwärts

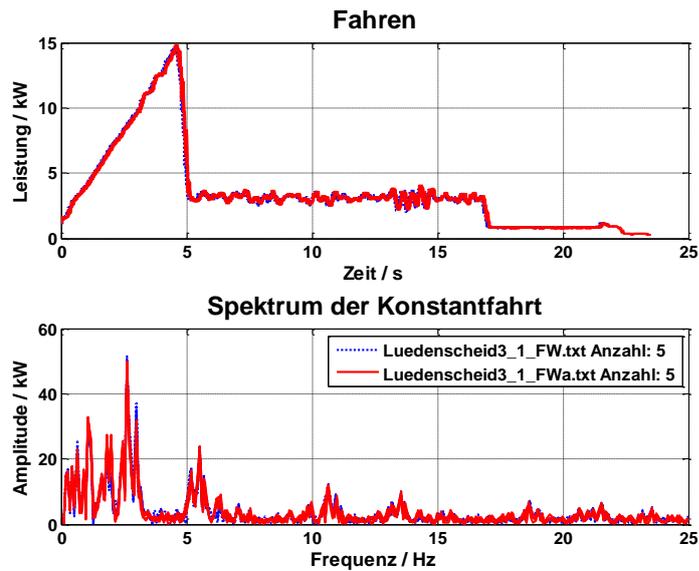


Abbildung 26: Gasse 3 Spektrum der Konstantfahrt

Im Fahrwerk von Paletten-RBG Gasse 3 lassen sich keine systematischen Abweichungen identifizieren, da sich die Konfidenzintervalle der Messung vorher und nachher überlappen. Das Leistungsspektrum der Konstantfahrt legt eine Schwingungsanregung des Mastes nahe. (Anm.: Bei der Anlagenbesichtigung am 10.02.2016 konnten keine markanten Schienenstöße identifiziert werden, gegebenenfalls sind weitere Ursachenmöglichkeiten (z. B. Deckenschiene) zu prüfen). In Gasse 3 wurde die Schiene nicht geschliffen und keine Laufräder getauscht.

## Hubwerk

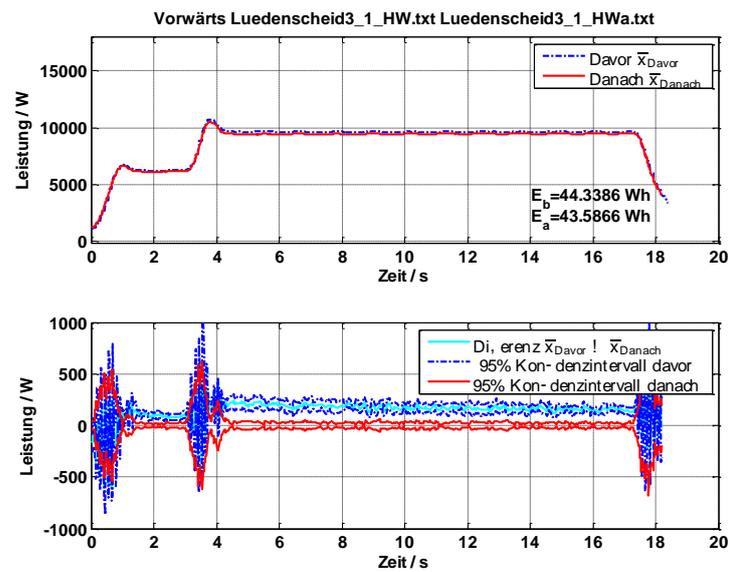


Abbildung 27: Gasse 3 Fahrt nach oben

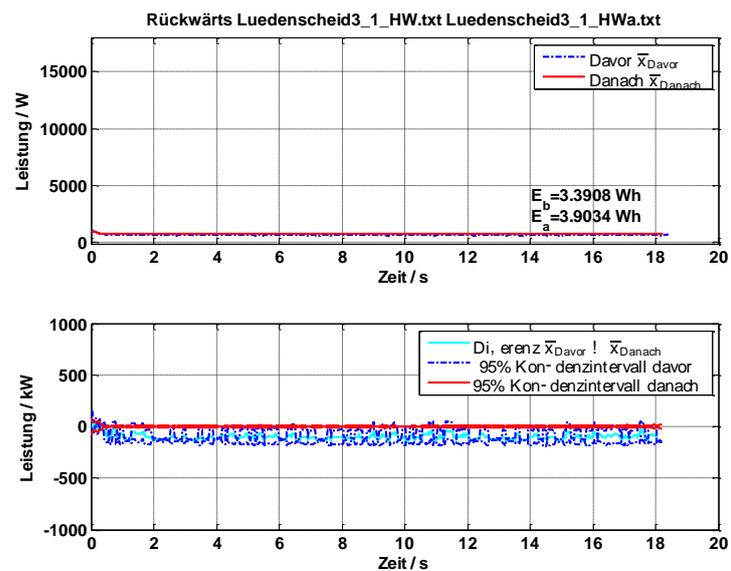


Abbildung 28: Gasse 3 Fahrt nach unten

Das Hubwerk der Gasse 3 zeigt eine geringere Leistungsaufnahme nach der Wartung (ca. 150 W) bei der Fahrt nach oben und eine höhere Leistungsaufnahme von ca. 100 W beim Absenken. Die Ursache für dieses Verhalten ist unklar.

## GASSE 4

### Fahrwerk

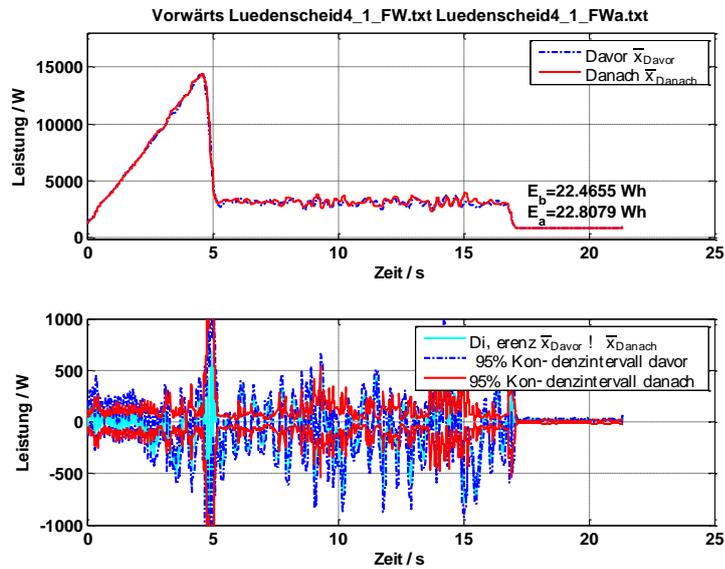


Abbildung 29: Gasse 4 Fahrt vorwärts

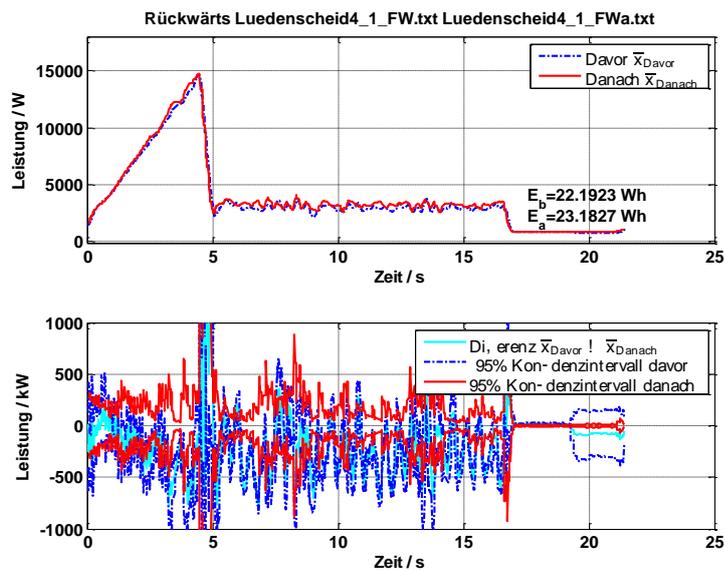


Abbildung 30: Gasse 4 Fahrt rückwärts

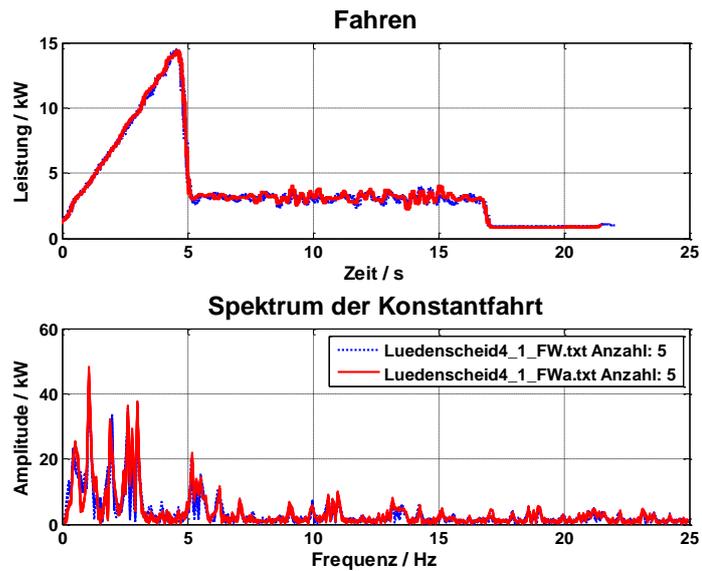


Abbildung 31: Gasse 4 Spektrum der Konstantfahrt

Im Fahrwerk von Paletten-RBG Gasse 4 lassen sich keine systematischen Abweichungen identifizieren, da sich die Konfidenzintervalle der vorher und nachher Messung überlappen. Das Leistungsspektrum zeigt eine Spitze bei ca. 1 Hz und ist insgesamt nicht so markant wie in Gasse zwei. Es ist zwischen den Spektren aus Gasse fünf und sechs sowie drei einzuordnen.

**Hubwerk**

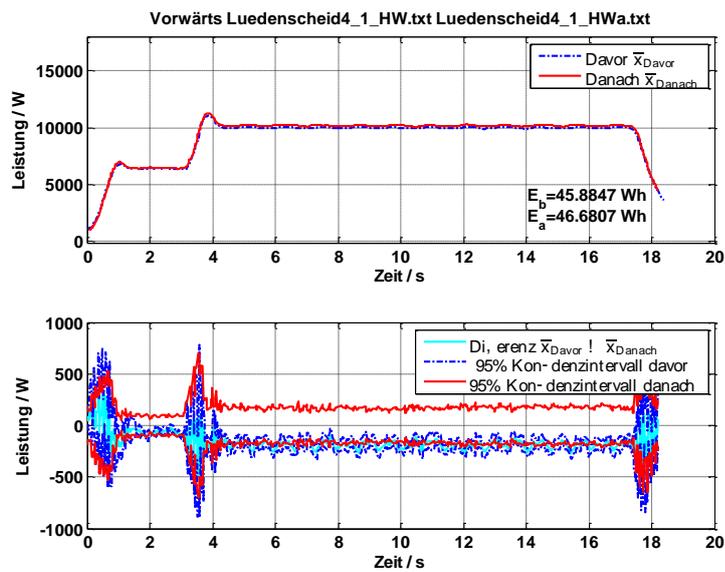


Abbildung 32: Gasse 4 Fahrt nach oben

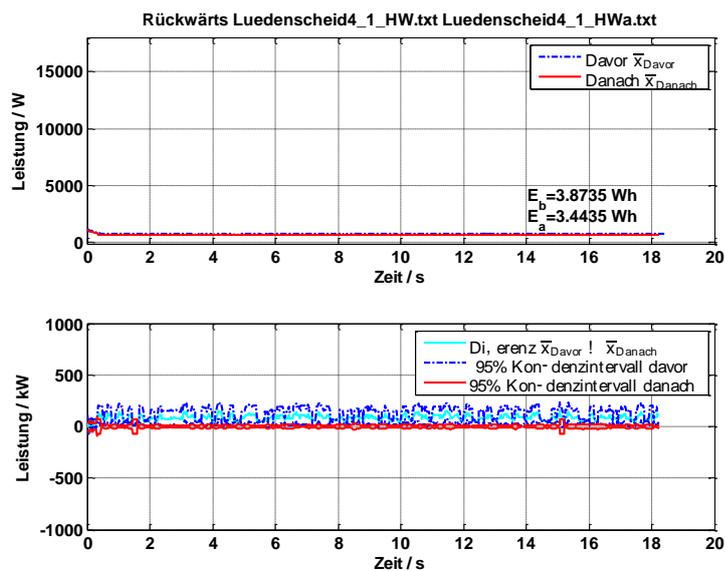


Abbildung 33: Gasse 4 Fahrt nach unten

Das Hubwerk der Gasse vier zeigt keine signifikanten Änderungen bezüglich der Leistungsaufnahme vor und nach der Wartung. Die Konfidenzintervalle überlappen sich.

## GASSE 5

## Fahrwerk

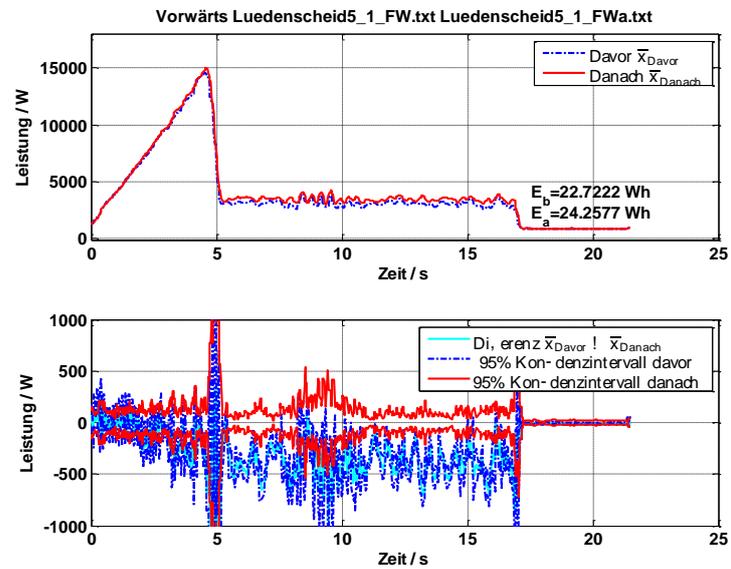


Abbildung 34: Gasse 5 Fahrt vorwärts

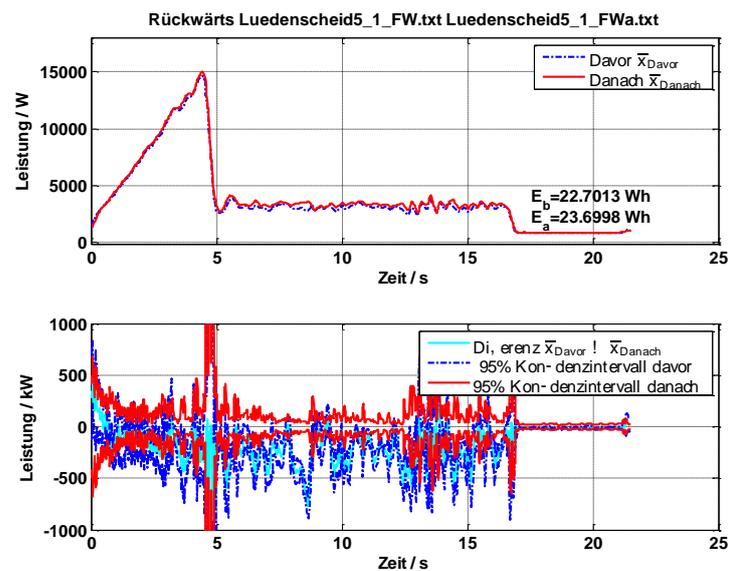


Abbildung 35: Gasse 5 Fahrt rückwärts

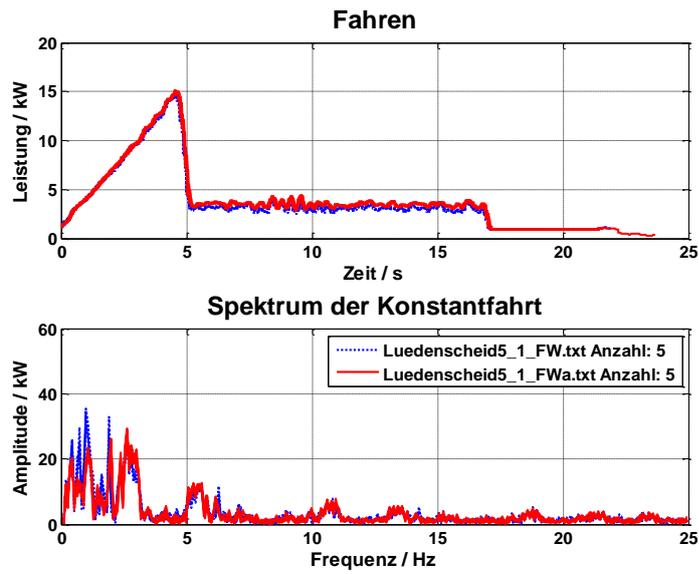


Abbildung 36: Gasse 5 Spektrum der Konstantfahrt

Im Fahrwerk von Paletten-RBG der Gasse fünf ist die Leistungsaufnahme nach dem Lauf-  
radwechsel geringfügig größer als vorher (ca. 200 W). Die Ursache wird in der Messung  
unmittelbar nach dem Laufradwechsel gesehen. Das Leistungsspektrum ist unauffällig.

## Hubwerk

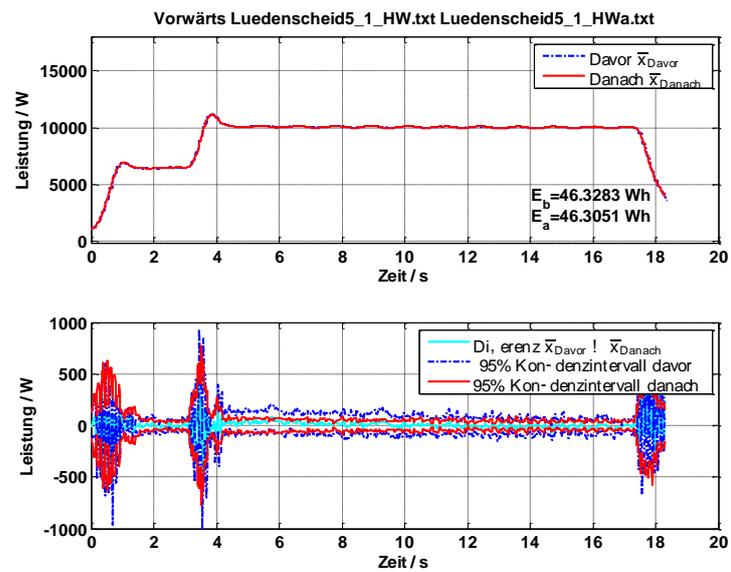


Abbildung 37: Gasse 5 Fahrt nach oben

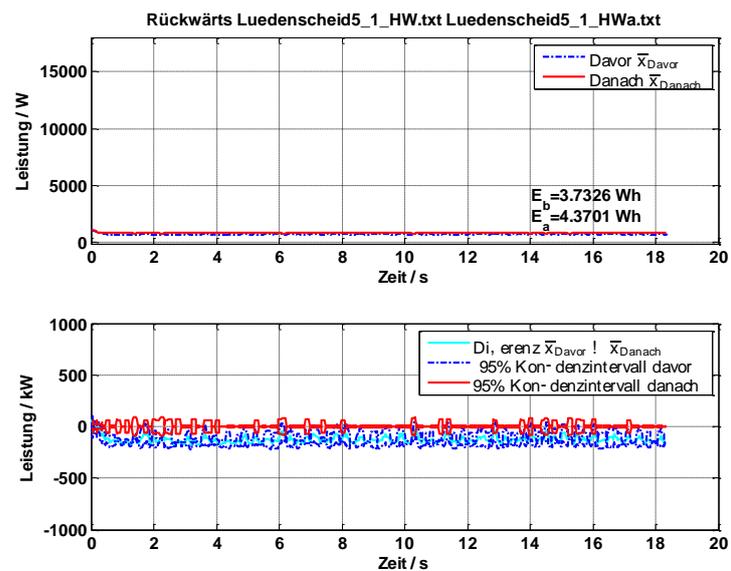


Abbildung 38: Gasse 5 Fahrt nach unten

Das Hubwerk der Gasse fünf zeigt keine signifikanten Änderungen bezüglich der Leistungsaufnahme vor und nach der Wartung. Die Konfidenzintervalle überlappen sich.

## GASSE 6

### Fahrwerk

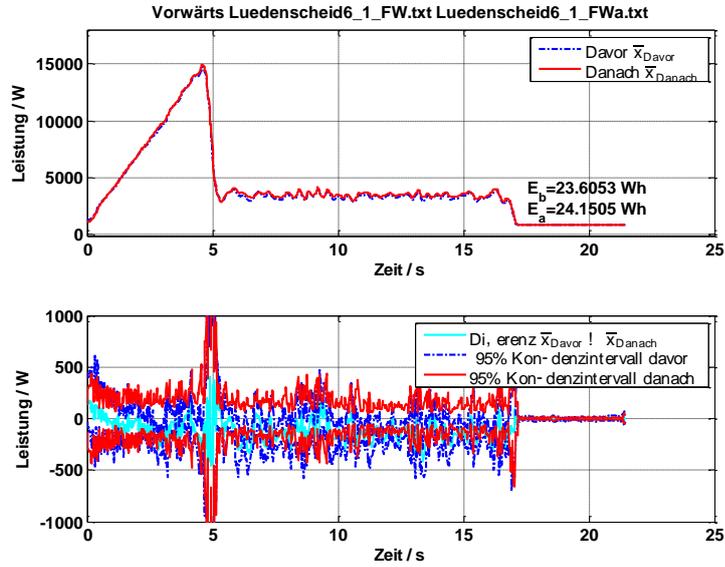


Abbildung 39: Gasse 6 Fahrt vorwärts

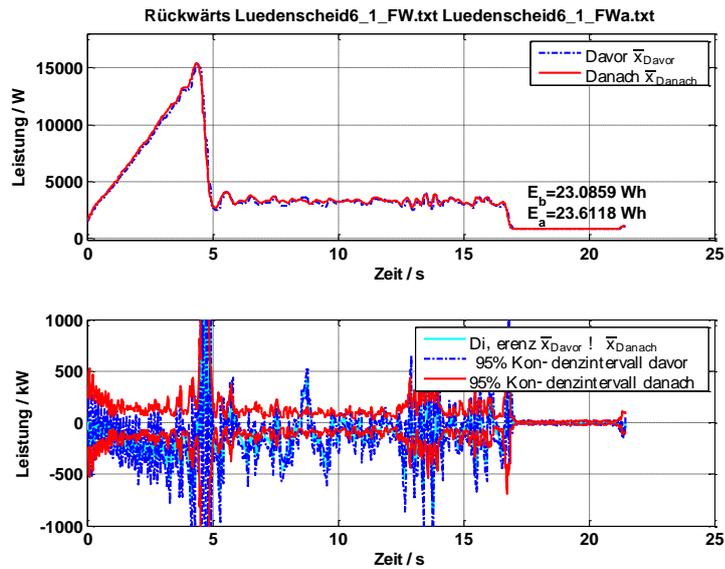


Abbildung 40: Gasse 6 Fahrt rückwärts

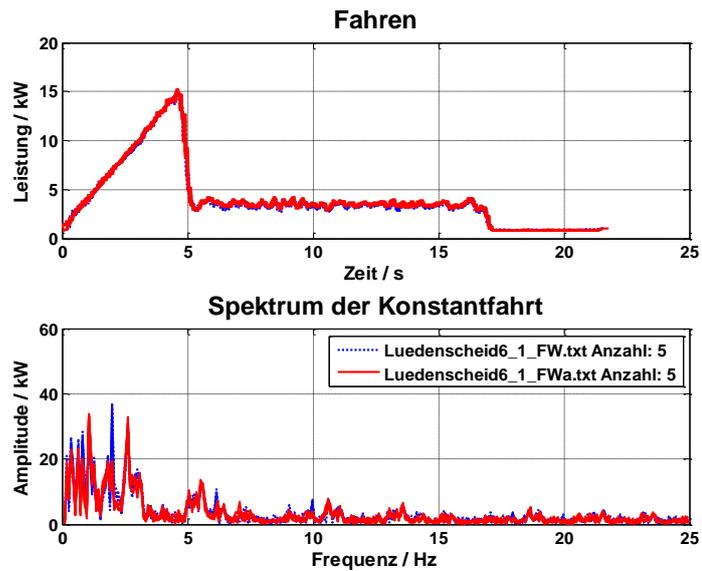


Abbildung 41: Gasse 6 Spektrum der Konstantfahrt

Im Fahrwerk von Paletten-RBG Gasse sechs ist die Leistungsaufnahme nach dem Laufradwechsel geringfügig größer als vorher (ca. 50 W), die Konfidenzintervalle überlappen sich aber weitestgehend. Es können keine signifikanten Unterschiede identifiziert werden. Die Ursache wird in der Messung direkt nach dem Laufradwechsel gesehen. Das Leistungsspektrum ist unauffällig.

**Hubwerk**

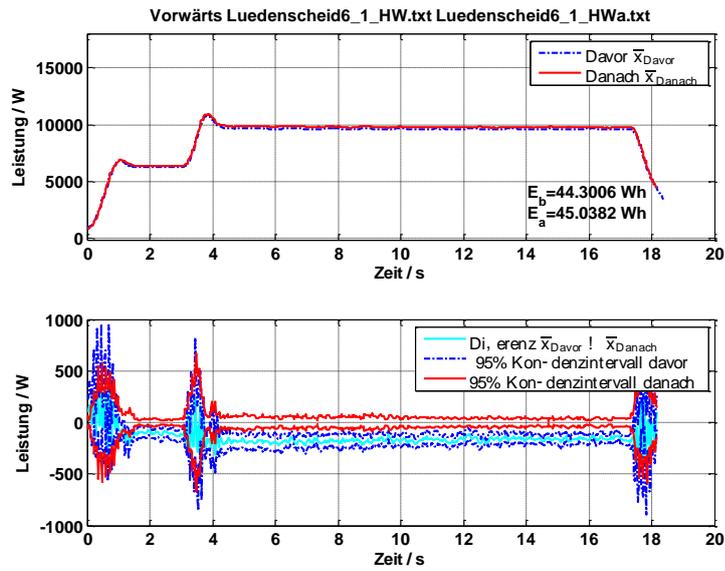


Abbildung 42: Gasse 6 Fahrt nach oben

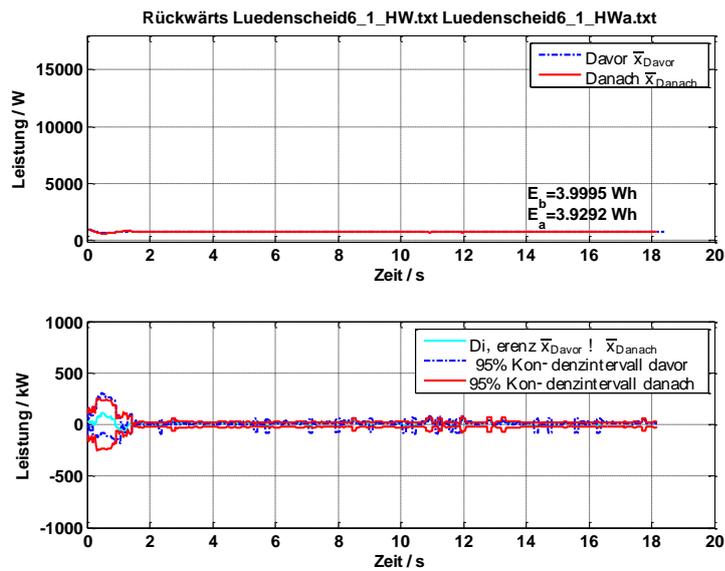


Abbildung 43: Gasse 6 Fahrt nach unten

Das Hubwerk der Gasse 6 zeigt eine höhere Leistungsaufnahme nach der Wartung (ca. 150 W) bei der Fahrt nach oben und eine Überlappung der Konfidenzintervalle bei Fahrt nach unten. Die Ursache für das Verhalten bei der Fahrt nach oben ist unklar.