

LTi DRIVES GmbH

**Energieeffiziente hybride Antriebsstränge
in mobilen Arbeitsmaschinen
(ENHYMA)**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 29575 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Autoren:

Peter Dengler
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen

Bernd Huhmann
LTi DRIVES GmbH

Frank Böhler
Heinzmann GmbH & Co. KG

Lahnau, Oktober 2013

Bezugsmöglichkeit des Abschlussberichts bei:

LTi DRIVES GmbH
Herr Jürgen Rühl
Gewerbestraße 5-9
35633 Lahnau

Tel.: +49 6441 966-135
E-Mail: juergen.ruehl@lt-i.com

LTi DRIVES GmbH

**Energieeffiziente hybride Antriebsstränge
in mobilen Arbeitsmaschinen
(ENHYMA)**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 29575 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Autoren:

Peter Dengler
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen

Bernd Huhmann
LTi DRIVES GmbH

Frank Böhler
Heinzmann GmbH & Co. KG

Lahnau, Oktober 2013

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	29575	Referat	21/0	Fördersumme	124.853,00 €
----	--------------	---------	-------------	-------------	---------------------

Antragstitel **Energieeffiziente hybride Antriebsstränge in mobilen Arbeitsmaschinen (ENHYMA)**

Stichworte Hybrider Antriebsstrang, dieselelektrisch, mobile Arbeitsmaschinen

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
18 Monate	01.02.2012	Verl. auf 31.07.2013	1

Bewilligungsempfänger	LTi DRIVES GmbH Gewerbestraße 5-9 35633 Lahnau	Tel	06441 966 135
		Fax	06441 966 155

Projektleitung	Bernd Huhmann
----------------	---------------

Kooperationspartner Institut für Fahrzeugsystemtechnik
Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen, Prof. Dr. Marcus Geimer
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
76131 Karlsruhe

Fa. Heinzmann GmbH & Co. KG
79677 Schönau

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Aus Gründen der Energieeffizienz werden in mobilen Arbeitsmaschinen zunehmend elektrische Leistungskomponenten zum Einsatz kommen. Im Projekt werden dabei die Applikationen betrachtet, bei denen ein dieselelektrischer Generator als Hauptenergiequelle eingesetzt wird. Ziel des Projektes ist es, eine möglichst universelle Entwurfsmethodik für hybride Antriebsstränge zu entwickeln, die es in der Folge erlaubt ausgehend von typischen Lastprofilen für die betrachtete Anwendung die optimale Gesamtstruktur zu definieren und die zugehörige Steuerungsstrategie zu entwickeln.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Elektrische hybride Strukturen erlauben es, durch Einsatz moderner Umrichtertertechnik die Frequenz der erzeugten Spannung von der Drehzahl des dieselelektrischen Generators zu entkoppeln und so den Dieselmotor mit einem höheren Wirkungsgrad zu betreiben. In einem Hybridsystem ermöglichen zusätzliche Energiespeicher z.B. dynamische Leistungsschwankungen im Betrieb auszugleichen oder Energie während eines Bremsvorganges zurückzuspeisen und zwischenspeichern. Durch den Einsatz eines bidirektionalen Spannungswandlers können dazu verschiedene Speichertechnologien wie Akkus oder UltraCaps zum Einsatz kommen, deren Spannungsniveau nicht dem des Umrichterzwischenkreises entsprechen muss.

In einem ersten Arbeitsschritt werden im Projekt geeignete Lastprofile mobiler Arbeitsmaschinen recherchiert. Hierbei wird auf Erfahrungen der Firma Heinzmann und des Lehrstuhls für Mobile Arbeitsmaschinen aufgebaut. Anschließend sollen unterschiedliche Antriebsstrangkonfigurationen zunächst in der Simulation untersucht und im Hinblick auf ihre Energieeffizienz bewertet werden. Für praktische Untersuchungen zur Verifikation der Arbeitsergebnisse wird begleitend ein geeigneter Prüfstand entwickelt und aufgebaut, mit dem es möglich ist, verschiedene Systemtopologien nachzubilden und mit unterschiedlichen Betriebsstrategien zu betreiben. Mit den gewonnenen Arbeitsergebnissen und der Fähigkeit im Prüfstand auch komplexe Gesamtstrukturen nachzubilden und zu vermessen steht den Projektpartnern nach Abschluss der Projektarbeiten ein leistungsfähiges Toolset für die Hybridisierung von mobilen Arbeitsmaschinen zur Verfügung.

Ergebnisse und Diskussion

Im Projekt ENHYMA wurde ein Prüfstand für einen seriellen dieselektrischen hybriden Antriebsstrang aufgebaut und in Betrieb genommen.

Neben den angepassten Stromrichtern auf der Generator- und Abtriebsseite wurde im Projekt als weiteres leistungselektronisches Modul ein flexibler DC/DC-Wandler entwickelt, der die Integration von zusätzlichen Energiespeichern in den Prüfstand ermöglicht. Für die Durchführung von ersten Versuchsreihen wurde im Projekt als Energiespeicher ein Kondensatorspeicher aufgebaut und in die Systemarchitektur integriert.

In einer übergeordneten Steuerung kann das Zusammenwirken der leistungselektronischen Einheiten programmiert und je nach gewünschtem Systemverhalten optimiert werden. Unterschiedliche Regelungs- bzw. Steuerungsverfahren können so für Zielapplikationen entwickelt und optimiert werden.

Mittels beispielhaften Lastzyklen wurden zunächst die generellen Fähigkeiten und Limitierungen der Systemarchitektur verifiziert. Es konnte gezeigt werden, dass die Gesamtarchitektur und die eingesetzten Software-Tools geeignet sind, unterschiedliche Testszenarien nachzubilden und so als Grundlage für weitergehende Entwicklungsprojekte genutzt werden können.

Für die gewählten Lastszenarien wurde abschließend untersucht, welche Optimierungspotenziale durch die Einbeziehung des DC/DC-Wandlers und des Energiespeichers zu erschließen sind. Insbesondere die Energieeinsparpotenziale beim Start-Stopp-Betrieb und beim Rekuperationsbetrieb wurden dabei untersucht. Hierbei konnten signifikante Einsparungen verifiziert werden. Allerdings zeigte sich auch, dass die eingesetzten Regelungsverfahren und Strategien noch einige Optimierungspotenziale aufweisen. Bei der Nutzung der Testanlage für weitergehende Entwicklungsprojekte sollten daher zunächst noch entsprechende Aktivitäten initiiert werden, um hier weitere Verbesserungen zu erreichen.

In nachfolgenden Forschungsprojekten soll deshalb vorrangig das Themengebiet der Betriebsstrategien vertieft werden. Eine weitere Fragestellung, die sich an das Projekt anschließt, ist die Untersuchung der Skalierbarkeit von Zyklen und Belastungsdaten realer Maschinen auf die Leistungsklasse des jetzt vorhandenen Prüfstands. Für dieses Thema wird aktuell ein Projektantrag ausgearbeitet.

Für die Industriepartner steht nun eine Testumgebung zur Verfügung, die für zukünftige F+E-Projekte und die Verifizierung der dort gesammelten Entwicklungsergebnisse genutzt werden kann. Neben der Zielapplikation Elektromobilität ist auch eine Übertragung der Ergebnisse auf benachbarte Märkte möglich. So konnte der Erkenntnisgewinn auf dem Gebiet der DC/DC-Wandler für Energiespeicher bereits in Anwendungen der dezentralen Energieerzeugung (BHKW-Technik) einfließen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die gewonnen Erkenntnisse werden bei der nächsten Aktualisierung der Vorlesungsunterlagen in die Lehrveranstaltungen des Lehrstuhls einfließen. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse in einer Fachzeitschrift ist aktuell in Vorbereitung.

Fazit

Abschließend kann festgehalten werden, dass mit den Arbeiten das Ziel erreicht wurde, eine flexible Test- und Experimentierplattform zur Verfügung zu stellen, mit der einerseits der Entwurf und der Test von geeigneten Systemarchitekturen für unterschiedliche Applikationen unterstützt wird und andererseits auch die Möglichkeit geschaffen wurde, durch die Entwicklung von spezifischen Steuerungs- und Regelungsverfahren ein optimales Betriebsverhalten zu ermöglichen und durch die Nachbildung der zugehörigen Lastprofile auch zu verifizieren.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
Zusammenfassung.....	8
1. Einleitung.....	9
2. Aufbau des Prüfstandes.....	11
2.1 Verwendete Hauptkomponenten	15
2.2 Verwendete Steuerkomponenten	17
2.3 Verwendete Software	17
2.4 Verwendete Messkomponenten	18
3. Entwicklung der Systemregelung	18
3.1 Zwischenkreisregelung.....	20
3.2 CAN-Kommunikation.....	20
3.2.1 Frequenzumrichter	21
3.2.2 DC/DC-Wandler	22
3.3 Dieselmotorregelung	22
3.4 Laderegelung	23
3.5 Start-Stopp-Regelung.....	25
3.6 Laststeuerung	26
3.7 Messwertaufnahme.....	27
4. Vermessung des Gesamtsystems.....	28
4.1 Versuch: Kasseler-Zyklus.....	29
4.2 Versuch: LKW-Zyklus.....	31
4.3 Versuch: Vergleich ohne Start-Stopp gegen mit Start-Stopp	32
4.4 Versuch: Rekuperationsprofil	34
4.5 Versuch: Kondensatorspannungsgrenze.....	35
5. Fazit.....	37
Literaturverzeichnis	40
Anhang 1	41
Anhang 2.....	42
Anhang 3.....	43
Anhang 4 – Teil 1	44
Anhang 4 – Teil 2.....	45
Anhang 5.....	46
Anhang 6.....	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Systemarchitektur neuer Prüfstand	11
Abbildung 2.2: Dieselmotor und Elektromotor-Diesel.....	12
Abbildung 2.3: Abtriebswelle mit Elektromotor-Abtrieb und Elektromotor-Belastung.....	12
Abbildung 2.4: Last-Schaltschrank	13
Abbildung 2.5: Frequenzumrichter und Kondensatorspeicher.....	14
Abbildung 3.1: Systemarchitektur des Prüfstandes inklusive Signale	19
Abbildung 3.2: Struktur der CAN-Busse	21
Abbildung 3.3: Kennfeld Dieselmotor + Elektromotor-Diesel.....	23
Abbildung 3.4: Aufteilung der Kapazitäten des Speichers.....	24
Abbildung 3.5: Regelkreis der Laderegelung	25
Abbildung 3.6: Kondensatorspannung bei Lastspitzen	25
Abbildung 3.7: Ausschnitt Start-Stopp-Vorgang.....	26
Abbildung 3.8: Soll- und Ist-Lastprofil an der Abtriebswelle	27
Abbildung 4.1: Lastzyklus „LKW“	28
Abbildung 4.2: Lastzyklus „Kasseler“	29
Abbildung 4.3: Messschrieb des skalierten Lastprofils „Kasseler“	30
Abbildung 4.4: Kassler-Profil; mechanische Leistung und Kondensatorspannung	30
Abbildung 4.5: Messschrieb des skalierten Lastprofils „LKW“	31
Abbildung 4.6: Profil „LKW“, mechanische Leistung, Kondensatorspannung	31
Abbildung 4.7: Versuch Start-Stopp mechanische Leistung	32
Abbildung 4.8: Versuch Start-Stopp-Kondensatorspannung	33
Abbildung 4.9: Versuch Start-Stopp-Kraftstoffverbrauch.....	33
Abbildung 4.10: Mechanische Leistung und Kondensatorspannung im Rekuperationsprofil.	34
Abbildung 4.11: Spannungsverlauf bei Kondensatorentladung.....	35
Abbildung 5.1: Verwendete Lastprofile aus Referenzmessung und ENHYMA	37
Abbildung 5.2: Systemarchitektur des ursprünglichen Prüfstands [Den11]	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Elektrische Hybridantriebe [Kob13]	10
Tabelle 4.1: Vergleich mit Start-Stopp gegen ohne Start-Stopp-Kraftstoffverbrauch.....	34
Tabelle 5.1 Vergleich Kasseler-Profil.....	38
Tabelle 5.2: Vergleich LKW-Profil.....	39

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	Größe	Einheit
CAN	Controller area network	
BUS	Binary unit system	
gnd	Ground	
PDO	Prozess data object	
SPO	Service data object	
NMT	Network management	
Tx	Transmit message	
Rx	Receive message	
UK	Kondensatorspannung	V
UZK1	Zwischenkreisspannung am DC/DC-Steller	V
n1	Drehzahl des Dieselmotors	U/min
n2	Drehzahl des Elektromotor-Abtriebs	U/min
M1	Drehmoment an der Dieselmotorausgangswelle	Nm
M2	Drehmoment am Elektromotor-Abtrieb	Nm

Zusammenfassung

Ein Prüfstand für einen seriellen dieselektrischen hybriden Antriebsstrang wird aufgebaut und in Betrieb genommen. Ein Generator, der von einem Dieselmotor angetrieben wird speist über einen Frequenzumrichter einen Gleichspannungszwischenkreis mit Kondensatorspeicher. Mit dem Programm Matlab Simulink wird eine Laderegulung für den Kondensatorspeicher und eine Start-Stopp-Regelung für den Dieselmotor aufgebaut. Am Prüfstand wird die Verbrauchseinsparung durch variable Anpassung der Drehzahl gegenüber einem Generator mit konstanter Drehzahl ermittelt. Dabei werden Kraftstoffeinsparungen von über 30 % erzielt.

Schlagwörter: Frequenzumrichter, Start-Stopp-Betrieb, dieselektrischer hybrider Antriebsstrang, Kondensatorspeicher.

Abstract

A test facility for a serial diesel-electric hybrid power unit will be built and put into operation. A generator, which is driven by a diesel engine, loads by a frequency converter an intermediate direct current link. With Matlab Simulink a charge controller for the capacitor storage and a regulation for start-stop operation will be programmed. The fuel consumption saving with a variable speed generator versus a constant speed generator is determined at the test facility. The achieved fuel consumption saving will be over 30 %.

Keywords: frequency converter, start-stop operation, diesel-electric power unit, capacitor storage.

1. Einleitung

In Anbetracht steigender Treibstoffkosten und begrenzter fossiler Rohstoffe wird die Forderung nach energieeffizienten Antriebssystemen für Kraftfahrzeuge immer lauter. Diese Forderung gilt nicht nur für PKW sondern auch für mobile Arbeitsmaschinen.

Da Effizienzsteigerungen herkömmlicher Antriebssysteme bestehend aus einem Verbrennungsmotor und einem mechanischen Getriebe nur noch sehr begrenzt möglich sind, wird vermehrt nach anderen Antriebssystemen gesucht.

Dabei hat sich der Hybridantrieb bestehend aus einem konventionellen Verbrennungsmotor und einem elektrischen Antrieb als vielversprechende Alternative hervorgetan. Dies wird daraus ersichtlich, dass er im Gegensatz zu rein elektrischen Antrieben oder anderen Hybridsystemen wie dem hydropneumatischen Hybrid schon jetzt von einigen Herstellern in Serienfertigung in Kraftfahrzeugen eingesetzt wird, z.B. der Atego BlueTEC von Mercedes-Benz [Zür13].

Beim Bremsen eines Fahrzeuges wird Bewegungsenergie in Wärme umgewandelt und geht verloren. Bei einem LKW ist dies beispielsweise 10,9 % der in den Motor eingebrachten chemischen Energie [Zür13]. Die Idee des Hybridantriebes ist es, diese Bewegungsenergie umzuwandeln und zu speichern. Diese gespeicherte Energie wird dann zu einem späteren Zeitpunkt zum Antrieb des Fahrzeugs benutzt.

Laut UNO Definition ist jeder Antrieb mit zwei Energiespeichern und zwei Energiewandlern ein Hybridantrieb [UNO07]. Aufgrund dieser Definition gibt es viele verschiedene Möglichkeiten einen Hybridantrieb zu gestalten. In Tabelle 1.1 werden die verschiedenen Bauformen der elektrischen Hybride vorgestellt.

Serielle Hybride haben den Vorteil, dass die an den Abtrieben benötigte mechanische Leistung durch die elektrische Wandlung vollständig von der Drehzahl des Dieselmotors entkoppelt ist, das System also wie ein stufenloses Getriebe arbeitet. Dies ermöglicht es dem System, neben den oben genannten Möglichkeiten der Rekuperation, den Diesel in seiner Drehzahl frei zu variieren und in einem Bereich zu betreiben, in dem er (bzw. das System aus Diesel, Generator und Umrichter) im höchsten Wirkungsgrad arbeitet. Diese sogenannte Kennfeldregelung ist insbesondere bei stark schwankenden Leistungsanforderungen interessant, wie sie bei vielen mobilen Arbeitsmaschinen vorkommen.

Ein System, welches auf diese Schwankungen reagieren kann, indem es Lastspitzen durch einen elektrischen Speicher abpuffert und den Diesel entsprechend des optimalen Verbrauchs regelt, birgt erhebliche Kraftstoffeinsparungspotenziale. Diese Potenziale aufzudecken und einen dieselelektrischen hybriden Antriebsstrang aufzubauen um die Funktionen Energierekuperation, Kennfeldregelung und Start-Stopp-Funktion zu untersuchen, ist Zielsetzung dieses Projektes.

Tabelle 1.1: Elektrische Hybridantriebe [Kob13]

	<p>Serieller Hybrid</p> <p>Hier treibt der Verbrennungsmotor einen Generator an, welcher eine Batterie speist. Aus der Batterie wird ein Elektromotor versorgt, der die Achse antreibt. Es besteht kein direkter mechanischer Durchtrieb vom Verbrennungsmotor zur Achse.</p>
	<p>Paralleler Hybrid</p> <p>Hier treiben ein Verbrennungsmotor und ein Elektromotor-Generator die Achse an. Eine Regelung entscheidet, ob der Elektromotor die Batterie lädt oder entlädt.</p>
	<p>Leistungsverzweigter Hybrid</p> <p>Hier erlaubt es der Einbau eines Planetengetriebes die Drehzahl an Verbrennungsmotor, Generator und Elektromotor beliebig zu verändern. Es ist eine komplexe Steuerung notwendig.</p>

2. Aufbau des Prüfstandes

Im Rahmen des Projektes „ENHYMA“ wurde ein Modellprüfstand kleiner Leistung aufgebaut, um einen seriellen hybriden Antriebsstrang für mobile Arbeitsmaschinen zu untersuchen. Hierzu wurde auf einen am Lehrstuhl für mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) existierenden Prüfstand, bestehend aus einem Dieselmotor mit 3,5 kW Leistung und einem elektrischen Generator, zurückgegriffen und um eine elektrische Speichereinheit erweitert. Damit kann der Diesel im verbrauchsoptimalen Bereich betrieben werden, da bei einem plötzlichen Abrufen elektrischer Leistung die Energie aus dem Speicher zur Verfügung gestellt wird und der Diesel ausreichend Zeit hat, um auf eine der Leistungsanforderung entsprechenden Soll-Drehzahl zu beschleunigen.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen war die Entwicklung einer Steuerung für den Dieselmotor und die Umrichter. Diese Steuerung soll in der Lage sein einen beliebigen Lastzyklus abzufahren und dabei den Dieselmotor immer im Bereich optimalen Kraftstoffverbrauchs zu betreiben. Außerdem sollen mit diesem neuen Prüfstand weitere verbrauchsmildernde Funktionen wie Rekuperation und Start-Stopp-Betrieb getestet werden.

Abbildung 2.1 illustriert den Aufbau des neuen Prüfstands bestehend aus Hybrid und Belastungseinheit.

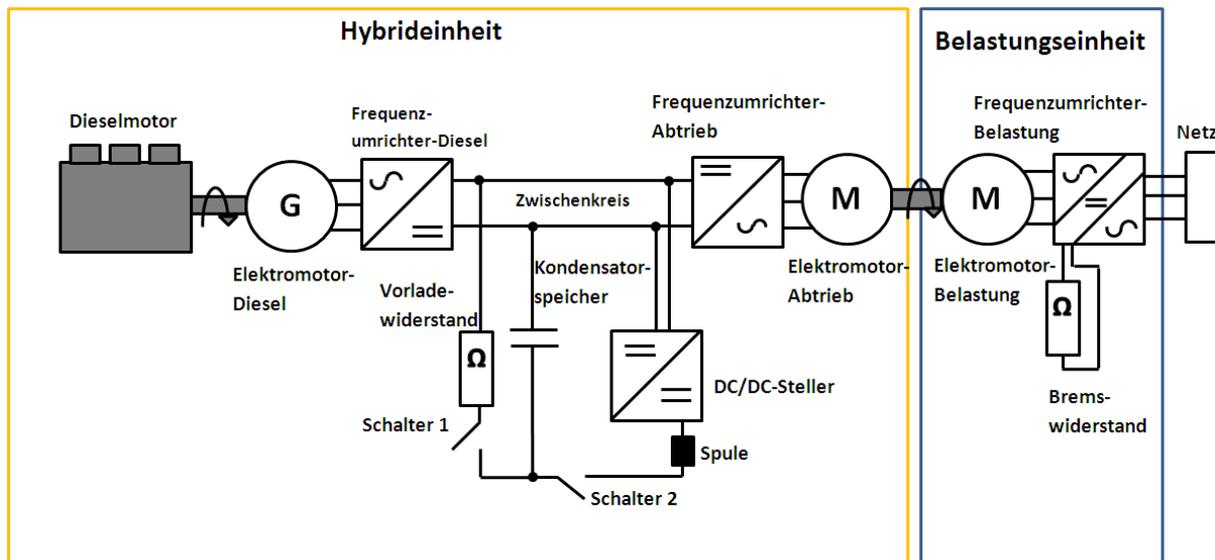


Abbildung 2.1: Systemarchitektur neuer Prüfstand

Der Dieselmotor ist über eine drehsteife Kupplung mit dem Elektromotor-Diesel verbunden. Der Elektromotor-Diesel ist mit dem Frequenzumrichter-Diesel verbunden, dieser ist an den Zwischenkreis angeschlossen. An den Zwischenkreis sind außerdem der Frequenzumrichter-Abtrieb sowie der DC/DC-Steller angeschlossen. An den DC/DC-Steller ist der Kondensatorspeicher bestehend aus 16 Kondensatoren angeschlossen, wobei dazwischen Spulen zur Glättung des Stroms eingebaut wurden. Die Verbindung zwischen Kondensatoren und DC/DC-Steller kann über den Schalter S2 getrennt werden. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, mit Schalter S1 den Kondensator bzw. Zwischenkreis über einen Widerstand vorzuladen. Der Elektromotor-Abtrieb ist mit dem Frequenzumrichter-Abtrieb verbunden, welcher mit einer Belastungseinheit starr verbunden ist. Diese ist wiederum mit dem Frequenzumrichter-Belastung verbunden, welcher mit dem öffentlichen Stromnetz sowie einem Bremswiderstand verbunden ist.

Abbildung 2.2 - Abbildung 2.5 zeigen Fotografien des Prüfstandes

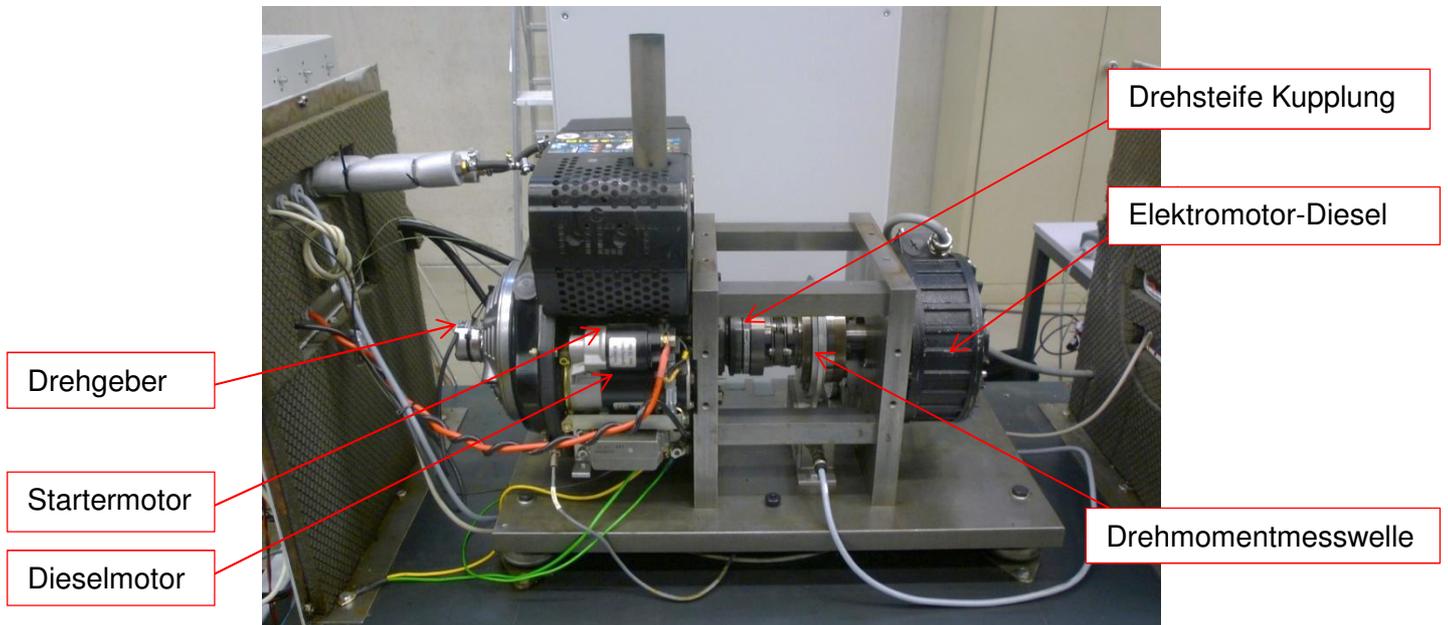


Abbildung 2.2: Dieselmotor und Elektromotor-Diesel

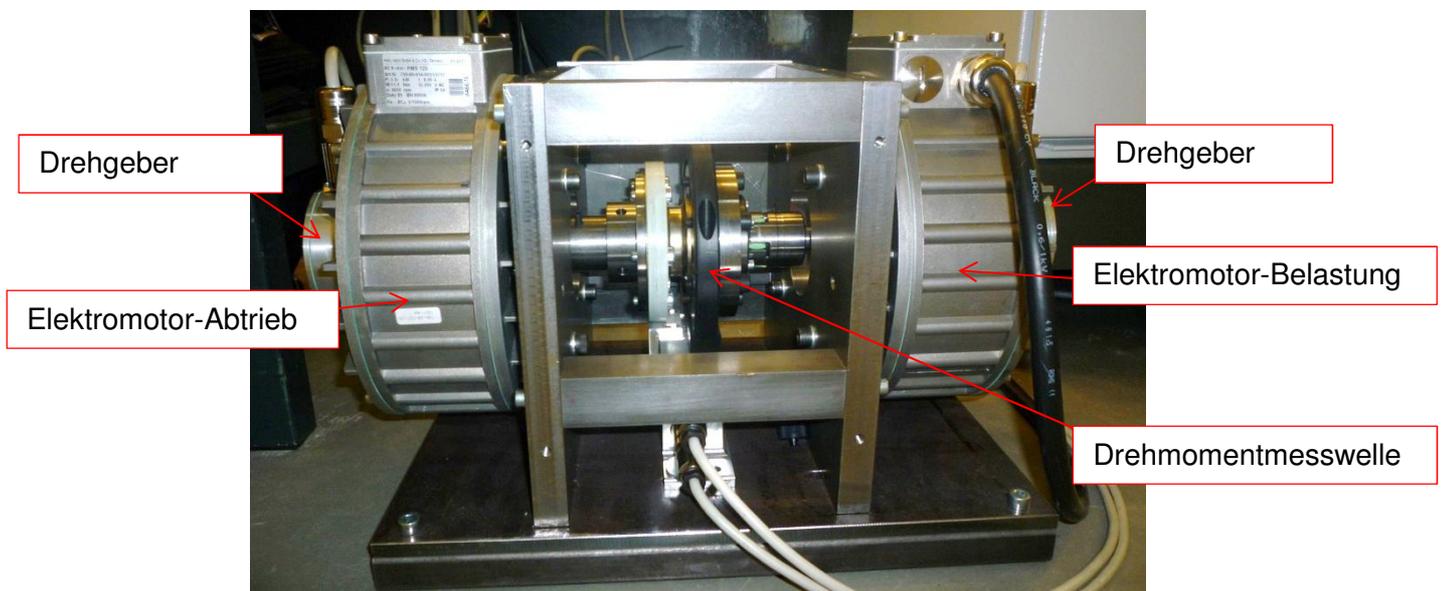


Abbildung 2.3: Abtriebswelle mit Elektromotor-Abtrieb und Elektromotor-Belastung

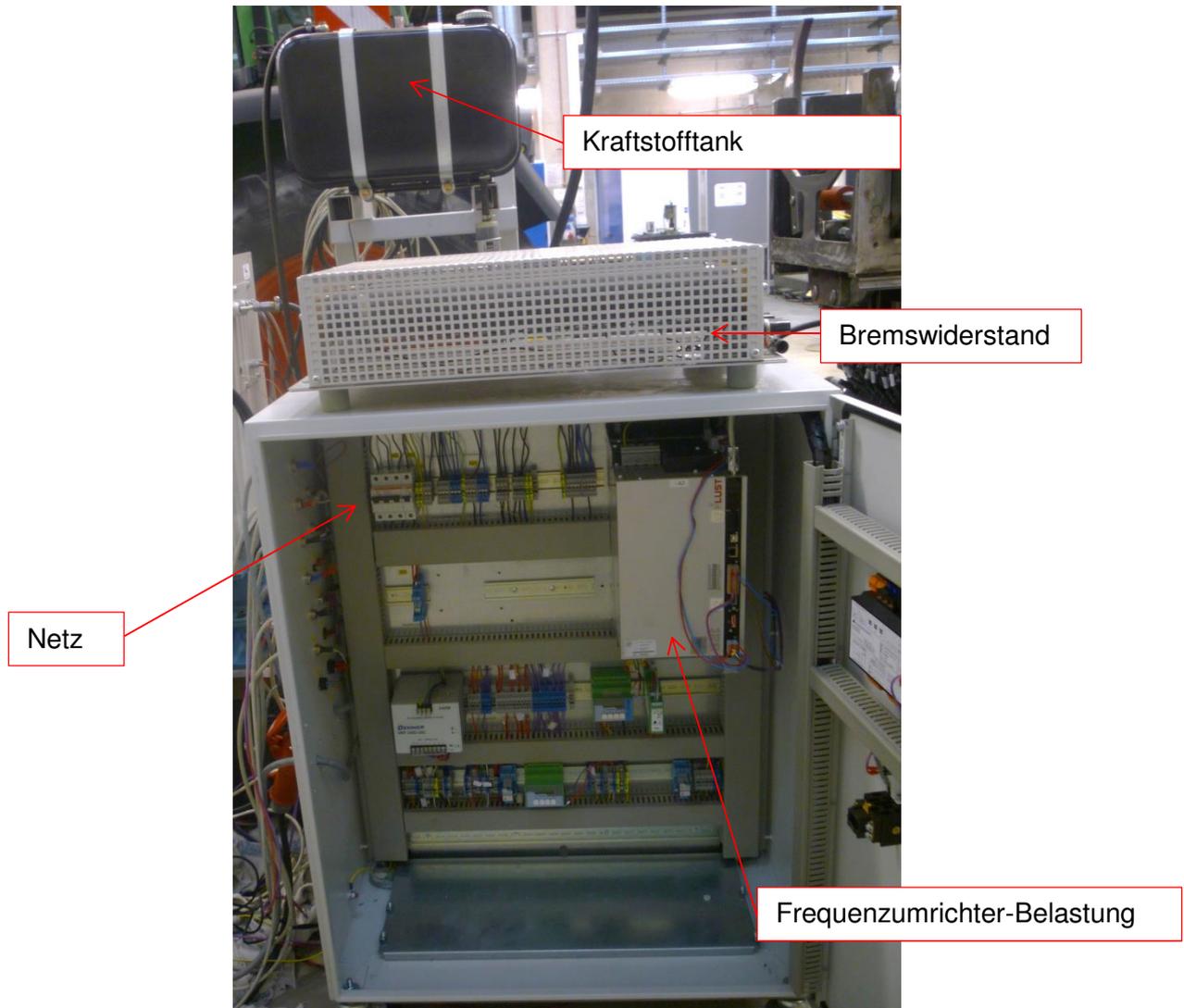


Abbildung 2.4: Last-Schaltschrank

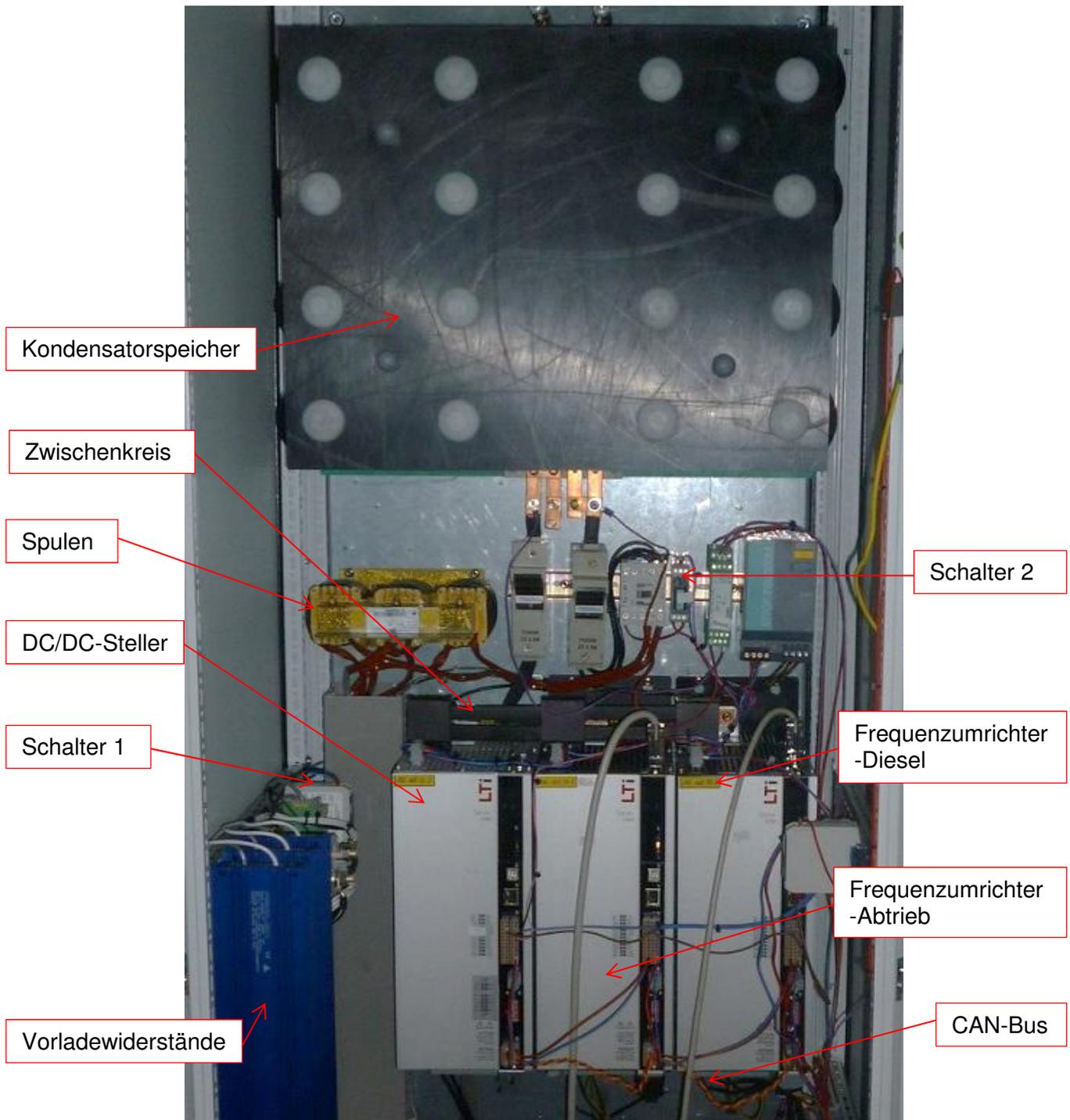


Abbildung 2.5: Frequenzumrichter und Kondensatorspeicher

2.1 Verwendete Hauptkomponenten

Für den Aufbau des Prüfstandes wurden nachfolgende Komponenten verwendet:

Dieselmotor

Hersteller:	HATZ GmbH & Co.KG
Bauart:	1-Zylinder 4-Takt mit Direkteinspritzung
Typ:	1B20
Leistung:	3,1 kW bei 3600 U/min (ISO Standardleistung)
Max. Drehmoment:	10,5 Nm bei 2500 U/min
Drehzahlband:	1500-3600 U/min
Regelung:	HEINZMANN DG3005.10 Digitalsteuergerät mit integriertem Aktuator.
Kühlung:	Luftgekühlt

Elektromotor-Diesel

Hersteller:	HEINZMANN GmbH & Co.KG
Bauart:	Permanenterregte Synchronmaschine
Leistung:	3,5 kW
Drehzahlband:	0-3600 U/min
Max. Drehmoment:	10,6 Nm
Kühlung:	Luftgekühlt

Der Luftspalt dieses Elektromotors wurde so verändert, dass er bei 3600 U/min eine Spannung liefert, die höher ist als die Einschaltspannung des DC/DC-Stellers.

Ursprüngliche Spannungskonstante:	100 V / 1000 U/min
Neue Spannungskonstante:	130 V / 1000 U/min

Elektromotor-Abtrieb, -Belastung

Hersteller:	HEINZMANN GmbH & Co.KG
Bauart:	Permanenterregte Synchronmaschine
Typ:	PMS 120 - WB 330
Nennleistung:	3,5 kW
Strom:	8,9 A
Drehzahlband:	0-3000 U/min
Max. Drehmoment:	11,24 Nm
Spannungskonstante:	81,239 V / 1000 U/min
Polzahl:	8
Kühlung:	Luftgekühlt

Frequenzumrichter-Diesel

Hersteller:	LTi DRiVES GmbH
Bauart:	Servoregler
Typ:	SO84.016.1
Nennstrom:	16 A
Kühlung:	Luftgekühlt
Einschaltspannung:	335,169 V
Unterspannung:	286,92 V
Überspannung:	725,093 V
Software:	V3.50-01
Kommunikation:	CANopen

Frequenzumrichter-Abtrieb

Hersteller:	LTi DRiVES GmbH
Bauart:	Servoregler
Typ:	SO84.020.1
Nennstrom:	20 A
Kühlung:	Luftgekühlt
Einschaltspannung:	335,169 V
Unterspannung:	286,92 V
Überspannung:	725,093 V
Software:	V3.50-01
Kommunikation:	CANopen

Frequenzumrichter-Belastung

Hersteller:	LTi DRiVES GmbH
Bauart:	Servoregler
Typ:	SO84.072.P
Nennstrom:	72 A
Kühlung:	Luftgekühlt
Software:	V3.25-02
Kommunikation:	CANopen

Kondensatoren

Hersteller:	Hitachi AIC Inc.
Bauart:	Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren
Typ:	HCGW2
Maximaldauerspannung:	450 VDC
Maximalspannung:	500 VDC für 30 s alle 6 Minuten
Kapazität:	20 mF

DC/DC-Steller

Hersteller:	LTi DRiVES GmbH
Bauart:	Modifizierter Frequenzumrichter Mehrachsensystem
Typ:	SO84.020.1
Kühlung:	Luftgekühlt
Einschaltspannung:	380 V
Unterspannung:	295 V
Überspannung:	877.486 V
Software:	V255.00.99: modifizierte Version der Standardsoftware V250.03-00
Maximalstrom:	10.5 A
Kommunikation:	CANopen

Der DC/DC-Steller ist ein modifizierter Frequenzumrichter, er wurde insoweit modifiziert, dass an den eigentlichen Motorausgängen U und V eine Gleichstromregelung implementiert wurde.

Eine genaue Auflistung der von LTi DRiVES vorgenommenen Veränderungen befindet sich im Anhang.

2.2 Verwendete Steuerkomponenten

Es wurde eine Steuerbox (Autobox) der Firma dSPACE, welche über ein DS1005 PPC Board sowie ein DS2002 Multi In/Out Board verfügt, verwendet. Das Multi In/Out Board verfügt über digitale und analoge Ein- und Ausgänge sowie über 2 CAN-Controller. Zusätzlich ist ein DS814 Link Board verbaut, welches über eine DS815 Transmitter Card die Verbindung mit einem PC bildet.

Über den PC kann mit Hilfe von Matlab Simulink und der dSPACE Software ControlDesk ein Simulink-Programm auf die Steuerung geladen werden, welches dann vom PC aus über ControlDesk in Echtzeit manipuliert werden kann.

2.3 Verwendete Software

Matlab/Simulink

Mit Matlab Simulink wurde das Steuerprogramm erstellt. Das Erstellen des Programms erfolgt dabei über eine Benutzeroberfläche, in die Blöcke aus der Simulinkbibliothek eingefügt und verknüpft werden können. Diese Bibliothek enthält beispielsweise for- und if-Blöcke sowie mathematische Operatoren.

Zur Verwendung der dSPACE Autobox werden die zusätzlichen Softwarepakete: RTI, RTICANMM, RTIFPGA, MLIB/MTRACE, DSSIMULINK benötigt. Um diese Softwarepakete benutzen zu können muss ein dSPACE-Lizenzdongle im USB Laufwerk vorhanden sein. Mit dem Befehl Strg+B wird das Simulinkprogramm kompiliert und auf die Autobox geladen.

ControlDesk Developer Version

Mit der Software ControlDesk der Firma dSPACE lässt sich eine grafische Benutzeroberfläche erstellen, mit der das auf die Steuerung geladene Programm in Echtzeit manipuliert werden kann. Außerdem kann in der Software die Verbindung zur Autobox verändert und überwacht werden.

DriveManager 5

Die Parametrisierung der Frequenzrichter und des DC/DC-Stellers sowie die Einstellung der CAN-Kommunikation erfolgt über die Benutzeroberfläche der Software „DriveManager 5“ der Firma LTi DRIVES GmbH. Die Software „DriveManager 5“ steht auf der Homepage der Firma LTi DRIVES GmbH als 180 Tage Demoversion zum Download zur Verfügung [LTi13]. Mit Hilfe des DriveManager 5 ist es außerdem möglich eine Erstinbetriebnahme der Frequenzrichter durchzuführen. Mit dieser Erstinbetriebnahme werden unter anderem Parameter wie die Netzversorgung, die Schaltfrequenz, die Motorkennwerte, die Gebereinstellungen sowie Regelungsparameter eingestellt, wobei das Berechnen der Regelungsparameter automatisch erfolgt. Auch ein Handbetrieb der Elektromotoren ist über den „DriveManager 5“ möglich.

Candb++

Für das Erstellen des für die CAN-Kommunikation benötigten dbc-Files wird die Software „CANdb++“ der Firma Vector Informatik GmbH aus Stuttgart verwendet. Die Software „CANdb++“ steht auf der Homepage der Firma Vector Informatik GmbH in dem Paket „CANalyzer/CANoe 8.1“ als Download zur Verfügung [Vec13]. Sie ermöglicht außerdem eine Konsistenzprüfung, um Fehler im dbc-file zu erkennen.

DCDesk 2000

Zur Kommunikation mit dem Dieselmotorsteuergerät wird die Software DCDesk 2000 der Firma Heinzmann benötigt. Mit dieser Software lassen sich Steuerparameter wie Beschleunigungsrampen und zulässige Minimaldrehzahl verändern. Außerdem können

damit im Steuergerät auftretende Fehler erkannt und gelöscht werden. Für die Benutzung der Software muss ein Heinzmann-Lizenzdongle im USB Laufwerk vorhanden sein.

2.4 Verwendete Messkomponenten

Drehmomentmessung an der Dieselwelle:

Drehmomentmessflansch T40B der Firma HBM

Drehmomentmessung an der Abtriebswelle:

Drehmomentmessflansch T40B der Firma HBM mit integriertem Drehzahlsensor

Drehzahlmessung an der Dieselwelle:

TTL-Impulsgeber mit 2048 Impulsen/Umdrehung der Firma Heidenhain

Drehzahlmessung an der Abtriebswelle:

Resolver-Geber

Kondensatorspannung:

Spannungsmessgerät MCR-VDC-UI-B-DC der Firma PHOENIX CONTACT

Versorgungsstrom:

Strommessumformer MCR-S-1-5-UI-DCI der Firma PHOENIX CONTACT

Kraftstoffverbrauch und Kraftstoffdichte:

Kraftstoffmessanlage: KMA-Mobile der Firma AVL

Messdatenaufnahme:

Ein Messdatenaufnehmer NI-cDAQ-9172 der Firma National Instruments

Anmerkung: Die Drehzahlen an der Diesel- und Abtriebswelle sowie die Zwischenkreisspannung werden aus dem CAN-Bus von der Steuerung ausgelesen. In der Steuerung werden sie in analoge Spannungssignale umgewandelt, welche von der Messaufnahme ausgelesen werden.

3. Entwicklung der Systemregelung

Die nachfolgende Abbildung stellt die Prüfstandarchitektur sowie die Signalstruktur dar. Auf die Darstellung der Kraftstoffmessanlage sowie der Messung der Versorgungsspannung wurde verzichtet.

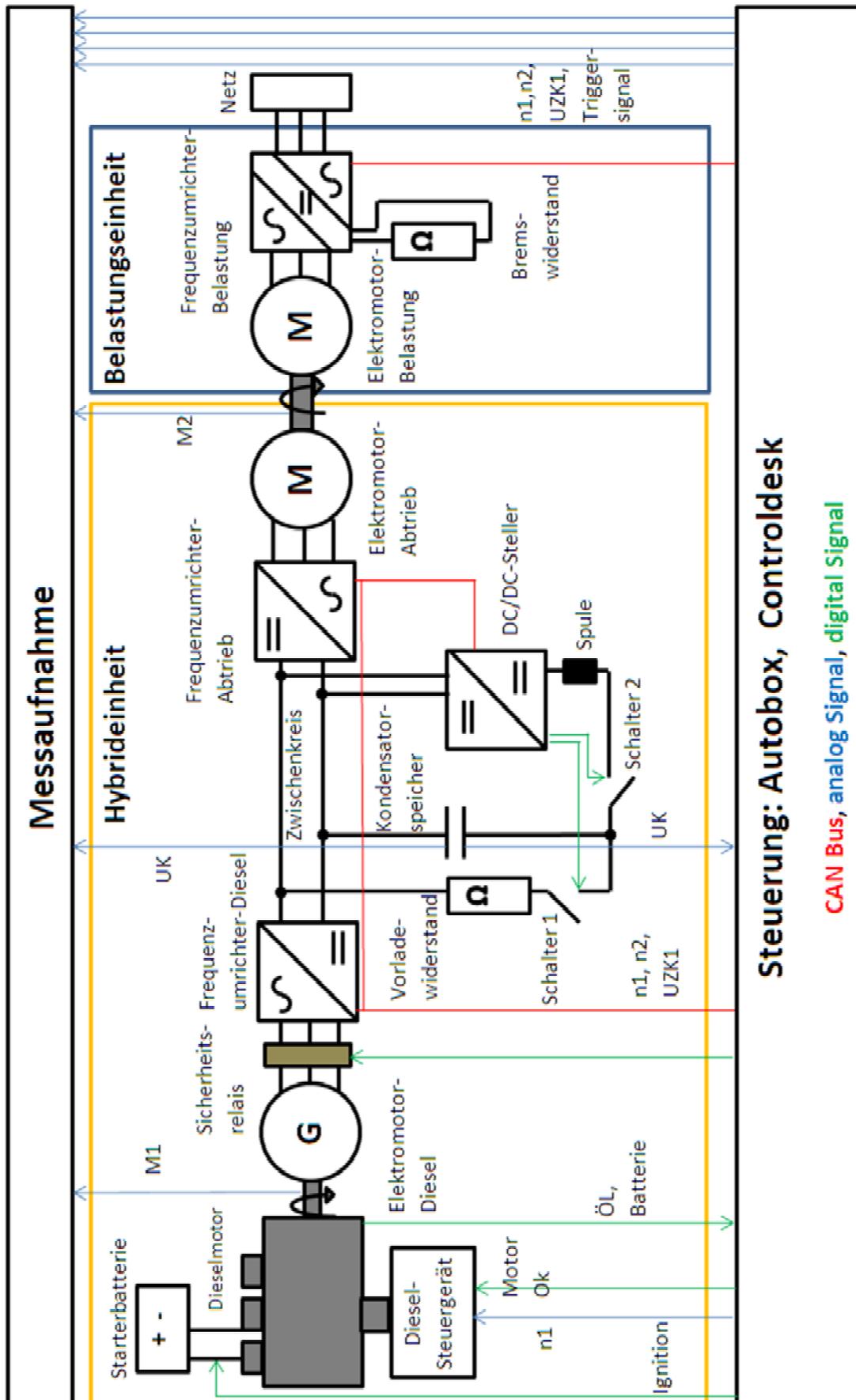


Abbildung 3.1: Systemarchitektur des Prüfstandes inklusive Signale

3.1 Zwischenkreisregelung

Bei den verwendeten Frequenzumrichtern handelt es sich um Mehrachsensysteme ohne Möglichkeit zur Regelung der Zwischenkreisspannung. Eine stabile Zwischenkreisspannung ist jedoch Grundvoraussetzung für den Betrieb der Frequenzumrichter. Die Regelung des Zwischenkreises übernimmt ein von LTI für diesen Zweck modifiziertes Mehrachsengerät: der DC/DC-Steller.

Der DC/DC-Steller wurde an der Kondensatorspeicherseite um eine Gleichstromregelung erweitert. Durch die Steuerung kann eine Sollzwischenkreisspannung vorgegeben werden. Bei Einspeisung in den Zwischenkreis durch den Dieselmotor oder durch Rekuperation steigt die Zwischenkreisspannung und der DC/DC-Steller entzieht dem Zwischenkreis Energie, in dem er den Kondensatorspeicher auflädt. Bei Ausspeisung aus dem Zwischenkreis sinkt die Kondensatorspannung und der DC/DC-Steller speist Energie durch Entladen des Kondensatorspeichers ein.

Die Wahl der Zwischenkreisspannung wird durch mehrere Parameter eingeschränkt. Sie muss über der Einschaltspannung des DC/DC-Stellers (380 V) sowie der Frequenzumrichter -Diesel und -Abtrieb (335 V) liegen. Außerdem muss sie über der maximalen Spannung liegen, die an den Elektromotoren anliegt. Diese liegt beim Elektromotor-Diesel bei $3,6 * 130 \text{ V} = 468 \text{ V}$ und beim Elektromotor-Abtrieb bei $3 * 81 \text{ V} = 243 \text{ V}$. Zusätzlich muss sie unter der Abschaltspannung des DC/DC-Stellers (877 V) sowie des Frequenzumrichter-Diesels und -Abtriebs (725 V) liegen. Somit ergibt sich, dass die Zwischenkreisspannung im Bereich zwischen 468 V und 725 V liegen muss.

Die Zwischenkreisspannung wurde wegen der oben genannten Kriterien zu 500 V gewählt und schwankt im geregelten Zustand um weniger als 0,5 V um diesen Wert.

Dieser Wert kann aber im gegebenen Fenster verändert werden, jedoch nicht während des Betriebes, da der Sollwert der Zwischenkreisspannung in der Grundeinstellung der Frequenzumrichter-Diesel und -Abtrieb eingespeichert werden muss. Inwieweit sich eine veränderte Zwischenkreisspannung auf die Wirkungsgrade der Frequenzumrichter auswirkt, wurde nicht untersucht.

Zum Starten der Regelung des DC/DC-Stellers und der Frequenzumrichter-Diesel und -Abtrieb muss die Zwischenkreisspannung über der jeweiligen Einschaltspannung liegen. Für den Fall, dass die Spannung im Kondensator hoch genug ist kann dafür der Schalter 1 benutzt werden und über den Vorladewiderstand der Zwischenkreis vorgeladen werden. Dieser Fall tritt in der Praxis nur sehr selten ein.

Eine andere Möglichkeit, die Zwischenkreisspannung über die Einschaltspannung zu erhöhen, ist den Dieselmotor anzulassen und die Drehzahl zu erhöhen, bis über die Spannungskonstante des Elektromotor-Diesels, die gewünschte Spannung erreicht ist. (Die Spannungskonstante des Elektromotor-Diesels wurde extra für diesen Zweck verändert.) Sobald die Einschaltspannung des DC/DC-Stellers erreicht ist, kann er mit einem Steuerbefehl in Regelung versetzt werden und regelt die Zwischenkreisspannung dann automatisch auf das gewünschte Niveau ein.

Ein Schaltplan der Kondensatoren befindet sich im Anhang.

3.2 CAN-Kommunikation

Die Frequenzumrichter werden mit CANopen angesteuert. Für eine bessere Übersichtlichkeit und klare Trennung zwischen dem Hybridsystem und der Belastungseinheit hat der Frequenzumrichter-Belastung einen eigenen CAN-Bus. Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau der CAN-Busse.

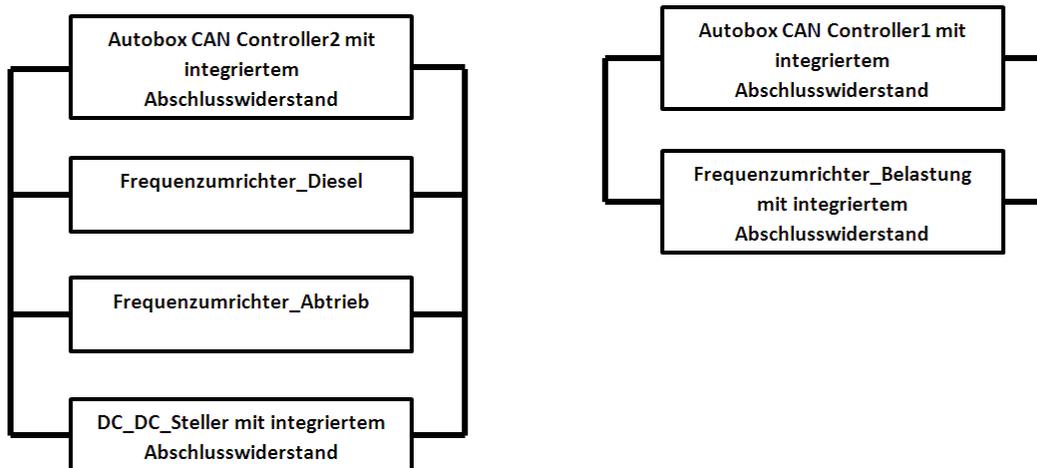


Abbildung 3.2: Struktur der CAN-Busse

Die Identifier wurde zur besseren Übersichtlichkeit anhand der letzten Nummer der auf den Geräten angebrachten IP-Adresse vergeben und über Dip-Schalter am Gerät eingestellt. Somit hat der DC/DC-Steller den Identifier 5, der Frequenzumrichter-Abtrieb den Identifier 6 und der Frequenzumrichter-Diesel den Identifier 7. Der Frequenzumrichter-Belastung ist auf einem anderen CAN-Bus und hat den Identifier 1. Die beiden CAN-Controller der Autobox haben jeweils den Identifier 0.

Die Baudrate wurde auf 1MBit/s eingestellt. Der Versand aller Nachrichten erfolgt zyklisch mit einer Zykluszeit von 5 ms. Alle Frequenzumrichter sowie der DC/DC-Steller arbeiten mit dem Kommunikationsprofil DS301 sowie dem Profil für Abtriebe DS402.

Das Mapping der PDOs erfolgt über den DriveManager 5. Ein Beispiel zum Einstellen der PDOs, sowie eine Auflistung aller verwendeten Parameter ist im Anhang vorhanden.

Mit der Nachricht NMT_State_Machine werden die CAN-Controller der Frequenzumrichter auf den Empfang von PDO-Nachrichten eingestellt und die CAN-Kommunikation gestartet.

3.2.1 Frequenzumrichter

Für die Frequenzumrichter können verschiedene Betriebsarten ausgewählt werden. Für die Untersuchungen waren insbesondere die Drehzahlregelung sowie die Drehmomentregelung von Bedeutung. Es ist dabei nicht problemlos möglich während des Betriebs die Betriebsart zu ändern. Für den Elektromotor-Diesel wurde die Drehmomentregelung ausgewählt, da es hiermit möglich ist, am Dieselmotor ein Drehmoment einzustellen. Auch ist es möglich, den Dieselmotor mit einem negativen Drehmoment zu starten. Für den Elektromotor-Abtrieb wurde die Drehzahlregelung ausgewählt. Dies entspricht einem Fahrbetrieb in dem die Geschwindigkeit und damit die Drehzahl am Rad vorgegeben werden. Für den Elektromotor-Belastung wurde wiederum die Drehmomentregelung ausgewählt, da auch dies dem Fahrbetrieb entspricht und so je nach Fahrzustand (Beschleunigen, Ausrollen, Fahren an Steigungen) ein entsprechendes Moment eingestellt werden kann. Es können auch negative Momente eingestellt werden um ein Bremsen des Fahrzeuges zu simulieren und Energie zu rekuperieren.

Durch diesen Aufbau ergibt sich an beiden Wellen ein stabiler Betriebszustand da jeweils eine Komponente die Drehzahl und die andere Komponente das Drehmoment vorgibt.

Die Frequenzumrichter besitzen eine State Machine, die die Steuerbefehle (Steuerwort) der Autobox entgegennimmt, den Betriebszustand des Frequenzumrichters ändert und als

Rückmeldung ein Statuswort an die Autobox sendet. Die Frequenzumrichter haben eine digitale Anzeige für den aktuellen Betriebszustand:

- 1 Nur 24 V Versorgungsspannung liegt an
- 2 Zwischenkreisspannung liegt über der Einschaltspannung
- 3 Einschaltbereit
- 4 Eingeschaltet
- 5 Antrieb bereit

Um in den Zustand 5 zu kommen, müssen nacheinander die Zustände 2, 3, 4 durchlaufen werden. Dafür wird nacheinander das Steuerwort 6, 7, 15 ausgegeben. Wie oben erwähnt brauchen die Frequenzumrichter zusätzlich eine Vorgabe der Betriebsart, in der sie regeln sollen. Diese Betriebsart muss nach jedem Neustart des Frequenzumrichters neu eingestellt werden.

Die Autobox sendet neben dem Steuerwort die Betriebsart und das Solldrehmoment beziehungsweise die Solldrehzahl an die Frequenzumrichter. Alle Frequenzumrichter senden das Statuswort, die Ist-drehzahl sowie ein aus den in den Elektromotor eingepprägten Strömen berechnetes Ist-drehmoment an die Autobox.

3.2.2 DC/DC-Wandler

Für den DC/DC-Steller wurden nicht das Standardsteuerwort und -Statuswort verwendet, sondern ein speziell konfiguriertes Steuerwort und Statuswort. Der DC/DC-Steller hat nur die Betriebszustände

- 1 Nur 24 V Versorgungsspannung liegt an
- 2 die Zwischenkreisspannung liegt über der Einschaltspannung
- 5 Zwischenkreisspannungsregelung

Um in Betriebszustand 5 zu kommen, muss im Zustand 2 das Steuerwort 1 ausgegeben werden. Über das Steuerwort können die digitalen Ausgänge des Umrichters die Schalter 1 und 2 schalten.

Dem DC/DC-Steller wird die Soll-Zwischenkreisspannung vorgegeben. Zusätzlich muss die maximale Kondensatorspannung vorgegeben werden. Es besteht die Möglichkeit, den maximalen positiven, negativen und bipolaren Ausgangsstrom auf der Kondensatorseite zu begrenzen. Davon wurde jedoch kein Gebrauch gemacht, da als Folge einer zu niedrigen Begrenzung des Stroms der DC/DC-Steller nicht mehr in der Lage ist die Zwischenkreisspannung ausreichend zu regeln. Der DC/DC-Steller sendet neben dem Statuswort die Ist-Zwischenkreisspannung sowie den Ausgangsstrom an der Kondensatorseite zurück an die Autobox. Die Nachricht, welche die Ist Zwischenkreisspannung enthält wird mit einer Zykluszeit von 2 ms verschickt, um einen Anstieg der Zwischenkreisspannung möglichst schnell zu detektieren.

Im Anhang befindet sich eine Auflistung aller in dieser Arbeit verwendeten Signale sowie Botschaften und Netzknoten, die Kommunikationsmatrix, sowie ein Beispiel zum Einstellen der Nachrichten.

3.3 Dieselmotorregelung

Ziel dieser Arbeit war es unter anderem eine Regelung zu entwickeln, die es ermöglicht zu jedem Zeitpunkt einen stabilen Leistungsfluss zwischen Dieselmotor und Abtriebsseite

herzustellen und Lastsprünge an der Abtriebsseite abzufangen, sowie eine Start-Stopp-Regelung aufzubauen.

Wie oben schon erwähnt, wird der Dieselmotor mit einem Heinzmann-Digitalsteuergerät mit integriertem Aktuator gesteuert.

Dieses Steuergerät hat ein „Motor Ok“ Signal, welches die Steuerung aktiviert. Die Drehzahl des Dieselmotors wird über ein analoges Signal im Bereich 0,5-4,5 V gesteuert, wobei 0,5 V 1500 U/min und 4,5 V 3600 U/min entsprechen. Des Weiteren gibt es ein Ignition-Signal, welches nicht in das Steuergerät führt, sondern ein Relais ansteuert, das die Starterbatterie mit dem Startermotor verbindet.

Als Rückmeldung aus dem Steuergerät gibt es ein analoges Istdrehzahl-Signal sowie ein digitales Signal, welches den Status von Ölstand und Batterie anzeigt.

Abbildung 3.3 zeigt das Motorkennfeld anhand dessen die Regelkennlinie optimalen Verbrauchs für den Dieselmotor und dem angeschlossenen Generator erstellt worden ist. Die dazu notwendigen Kennfelder lagen dem Mobima aus dem Vorgängerprojekt vor.

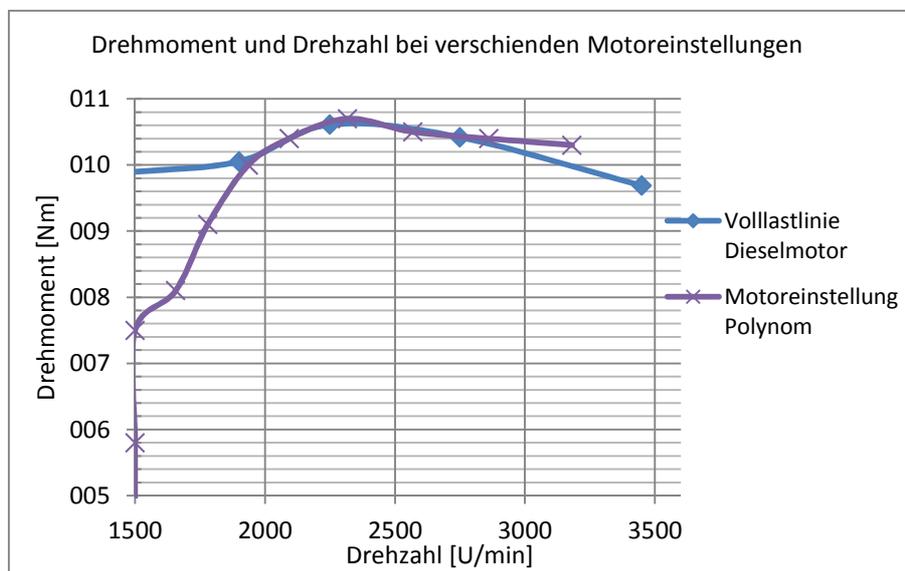


Abbildung 3.3: Kennfeld Dieselmotor + Elektromotor-Diesel

3.4 Laderegelung

Um ein beliebiges Lastprofil abfahren zu können, müssen Lastsprünge zu jeder Zeit vom Kondensatorspeicher abgepuffert werden können. Dafür muss der Kondensatorspeicher zu einem gewissen Grad aufgeladen sein. Um dies zu gewährleisten, wurde eine Laderegelung entwickelt. Diese soll den Dieselmotor in dem für die anliegende Last optimalen Betriebspunkt betreiben.

Es wurden verschiedene Versuche unternommen eine stabile Laderegelung aufzubauen, so wurde beispielsweise versucht, aus der am Abtrieb abgerufenen Leistung und einem Verlustfaktor die benötigte Leistung zu berechnen und am Dieselmotor einzustellen. Mit dieser Regelung kam jedoch kein stabiler Leistungsfluss zustande. Ein weiterer Versuch war es, die Kondensatorspannung auf konstantem Niveau zu halten, in dem aus dem Abstand der Kondensatorspannung zur Sollkondensatorspannung eine Sollleistung gebildet wurde. Auch diese Regelung war instabil.

Erst der Versuch mit einer Laderegelung, welche als Eingangsparameter nur die Kondensatorspannung nimmt und anhand eines Lookuptables (Tabelle, die jedem Eingangswert einen Ausgangswert zuordnet) dem Dieselmotor eine Leistung zuordnet, war erfolgreich. Die Sollleistung wird dabei gegenproportional zur Kondensatorspannung eingestellt. Bei sinkender Kondensatorspannung steigt die zugeordnete Sollleistung und bei steigender Kondensatorspannung sinkt die zugeordnete Sollleistung. Die Sollleistung wird gesteuert, in dem der Dieselmotor aus zwei Lookuptabellen eine Drehzahl und ein Drehmoment vorgegeben bekommt. Dabei wird der Betriebspunkt so gewählt, dass ein minimaler Kraftstoffverbrauch erzielt wird.

Ein Vorteil dieser Regelung ist, dass sie unabhängig von der Art der Last ist. So können an den Zwischenkreis beliebig viele Frequenzumrichter oder andersartige Lasten angeschlossen werden ohne die Regelung verändern zu müssen. Eine weitere Eigenschaft der Regelung ist, dass sich für eine hohe Last eine niedrige Kondensatorspannung einstellt und somit die Puffermöglichkeit klein ist und sich für eine niedrige Last eine hohe Kondensatorspannung einstellt und somit die Puffermöglichkeit groß ist. Dieses Verhalten ist ausreichend, da bei großer anliegender Last, aufgrund einer begrenzten Maximallast nicht mehr mit einem großen Lastsprung gerechnet werden muss.

Für die weiteren Funktionen wie beispielsweise Start-Stopp-Betrieb oder Rekuperationsbetrieb muss Kapazität bzw. Energie im Speicher vorgehalten werden. Eine Aufteilung dieser Energien ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

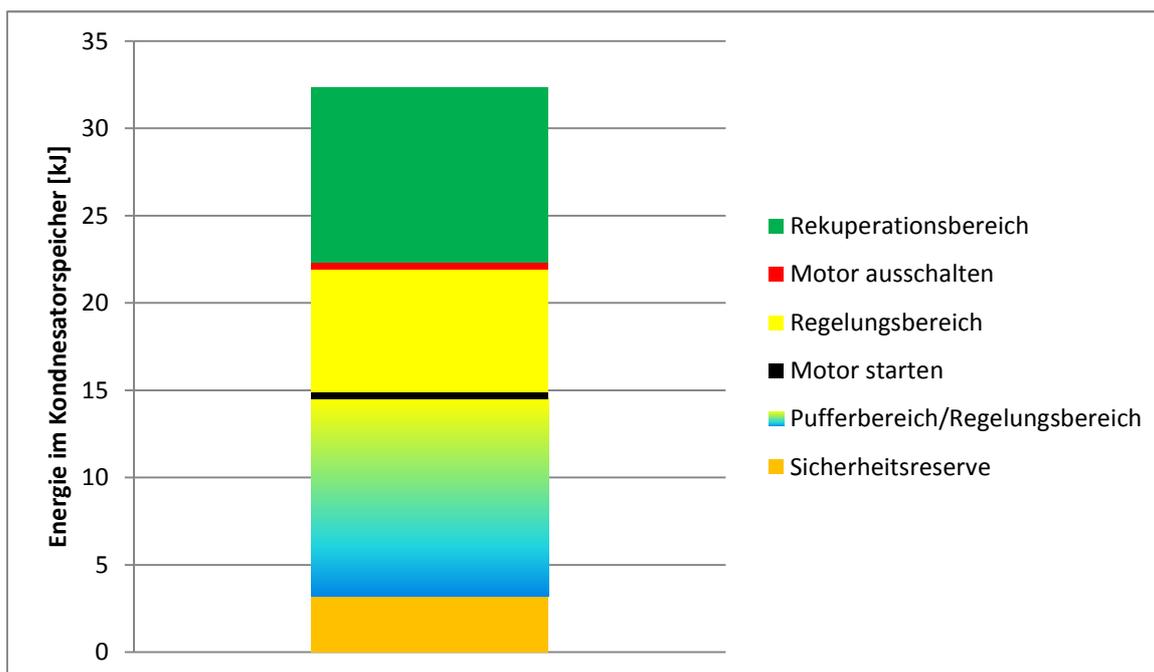


Abbildung 3.4: Aufteilung der Kapazitäten des Speichers

Abbildung 3.5 zeigt den Regelkreis der Laderegelung auf. Die Kondensatorspannung wird als analoges Signal von der Autobox ausgelesen und der Wert wird durch ein Tiefpassfilter geglättet. Da der Kondensator ein Speicher ist und deshalb die Schwankungen im Lastprofil puffern kann, enthält die Kondensatorspannung keine starken Schwankungen oder Schwingungen. Dies führt zu einem stabilen Verlauf der Dieselmotordrehzahl. Durch diese Regelung stellt sich für jede Last nach kurzer Zeit eine dazugehörige Kondensatorspannung ein, zu welcher wiederum eine Drehzahl und ein Drehmoment gehören. Dadurch stellt sich für jede Last ein stabiler Zustand ein.

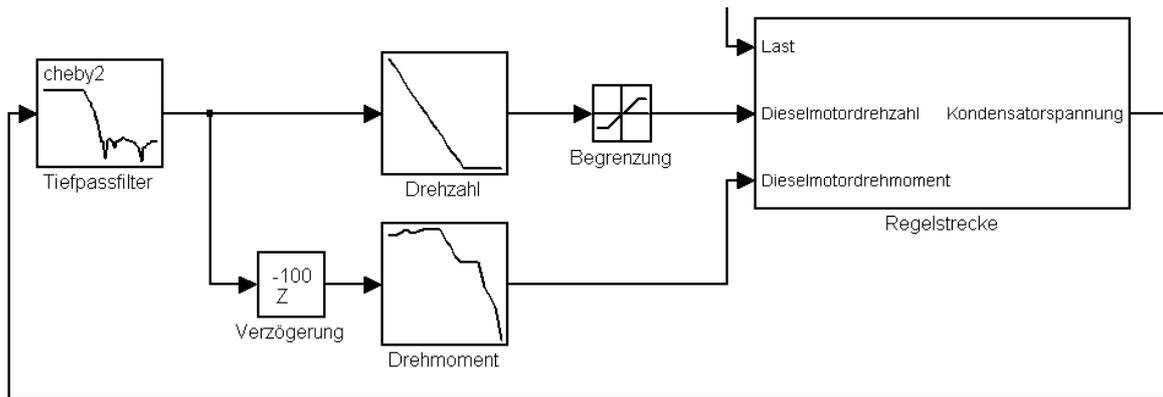


Abbildung 3.5: Regelkreis der Laderegulung

Das Anlegen des Drehmoments wird um 0,1 Sekunden verzögert um das Erhöhen und Erniedrigen der Drehzahl des Dieselmotors zu erleichtern. Die Drehzahl des Dieselmotors wird im Bereich 1500-3600 U/min begrenzt.

In Abbildung 3.6 kann deutlich erkannt werden wie die Drehzahl gegenproportional zur Kondensatorspannung geregelt wird.

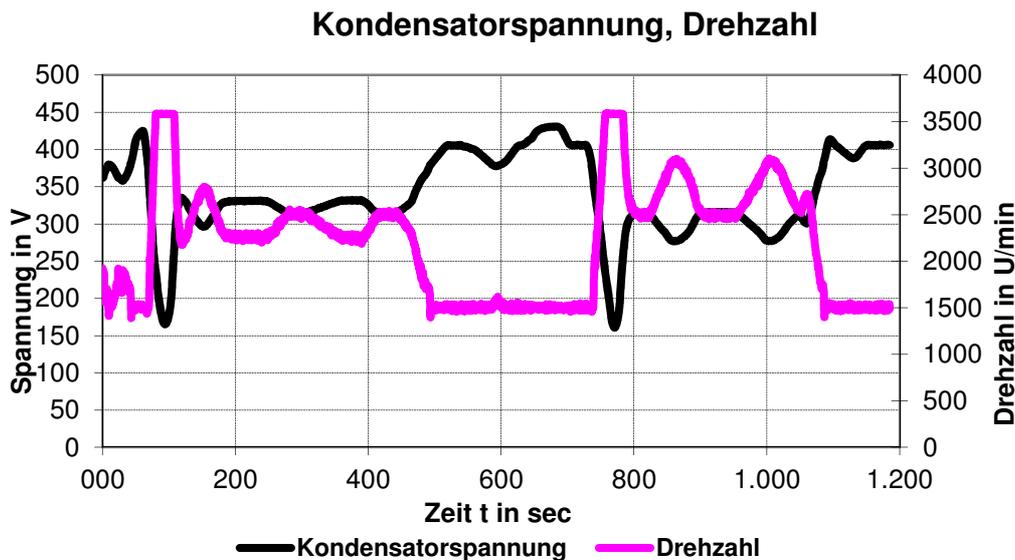


Abbildung 3.6: Kondensatorspannung bei Lastspitzen

3.5 Start-Stopp-Regelung

Um den Dieselmotor in Phasen, in denen keine Last abgerufen wird abschalten zu können und so den Kraftstoffverbrauch zu senken, wurde eine Start-Stopp-Regelung aufgebaut. Zum Starten des Dieselmotors wird dabei nicht die Starterbatterie und der Startermotor verwendet sondern der Kondensatorspeicher und der Elektromotor-Diesel. Auch diese Regelung hat als Eingangsparameter nur die Kondensatorspannung.

Zum Einschalten des Dieselmotors wird das Drehmoment am Elektromotor-Diesel für den Drehzahlbereich 0-500 U/min auf -10 Nm gesetzt. Sobald die Drehzahl auf über 500 U/min gestiegen ist, wird das Drehmoment auf Null gesetzt und sobald die Drehzahl auf über 1300 U/min gestiegen ist, wird wieder das Drehmoment, welches die Laderegulung einstellt,

angelegt. Der Startvorgang des Dieselmotors benötigt zwischen 2,5 und 3,5 Sekunden, dabei wird eine Energie von 730 J verbraucht.

Wird ein maximaler Lastsprung von 0 auf 3055 W, welches die Maximallast in den Lastprofilen darstellt, angenommen so ergibt sich eine im Kondensator benötigte Energie von $730 \text{ J} + 3055 \text{ W} \cdot 3,5 \text{ s} = 11422,5 \text{ J}$, um den Lastsprung abzufuffern und den Dieselmotor zu starten.

Die Kondensatorenergie bei 450 V beträgt 32400 J. Als Sicherheitsreserve werden 10 % der Kondensatorenergie eingeplant. Aus diesen Werten kann die Spannungsuntergrenze, ab der der Dieselmotor wieder eingeschaltet werden soll, berechnet werden. $((11422,5 \text{ J} + 32400 \text{ J} \cdot 0,1) \cdot 2 / 16 / 20 \text{ mF})^{0,5} = 302,7 \text{ V}$.

Das Ausschalten des Dieselmotors muss bei $< 450 \text{ V}$ Kondensatorspannung passieren, um ein Überladen der Kondensatoren zu vermeiden.

Abbildung 3.7 zeigt einen Start-Stopp-Vorgang. Es ist zu erkennen wie die Last bei $t = 45 \text{ s}$ Null beträgt, der Dieselmotor den Kondensator bis auf eine Spannung von 440 V auflädt und die Regelung den Dieselmotor ausschaltet. Bei $t = 60 \text{ s}$ fängt der Lastsprung an und die Kondensatorspannung sinkt. Bei $t = 70 \text{ s}$ ist die Kondensatorspannung so weit gesunken, dass der Dieselmotor wieder angelassen wird.

Die kurzzeitige negative Leistung bei $t = 70 \text{ s}$ kommt daher, dass hier der Elektromotor-Diesel ein negatives Drehmoment erzeugt, um den Dieselmotor zu starten.

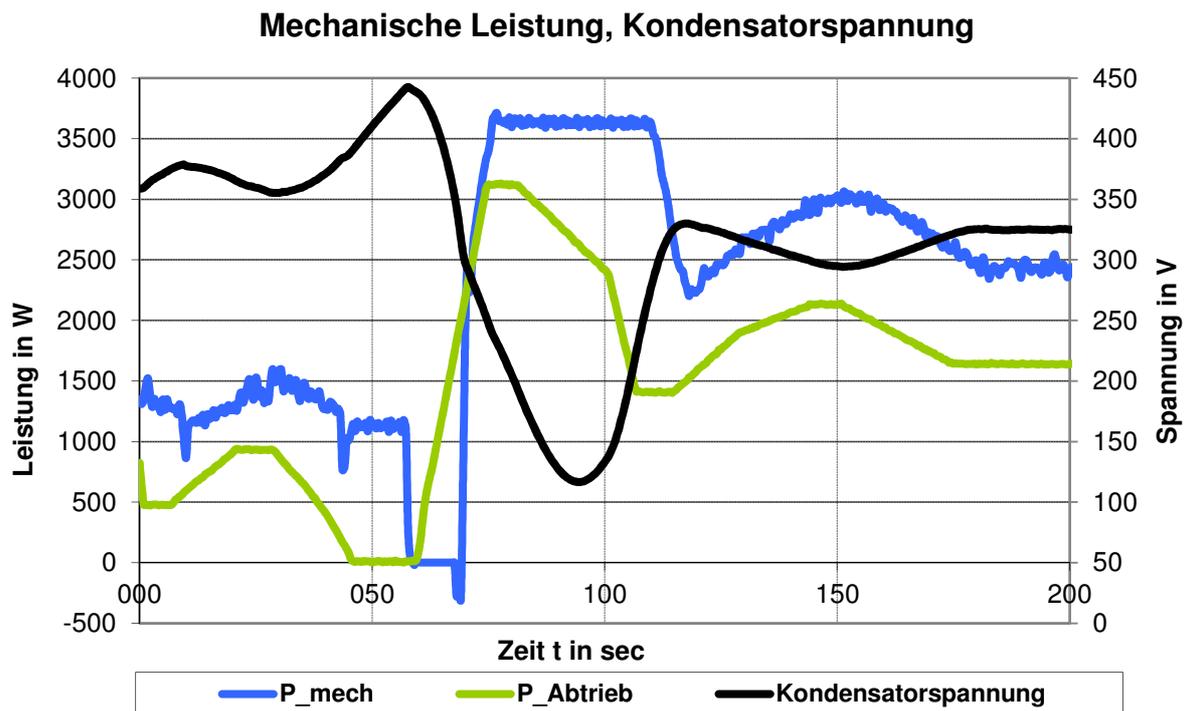


Abbildung 3.7: Ausschnitt Start-Stopp-Vorgang

3.6 Laststeuerung

Die Last besteht aus einem Elektromotor, der mit variabler Drehzahl läuft und an den ein zweiter Elektromotor ein Drehmoment einstellt. Im Versuchsbetrieb kann hier ein Drehzahlprofil und ein Drehmomentprofil abgefahren werden. Für die Versuche wurde

lediglich ein Leistungsprofil abgefahren. Dazu wurde die Drehzahl des Elektromotor-Abtriebs konstant gehalten, um das Drehmoment am Elektromotor-Belastung so zu steuern, dass die entsprechende Leistung abgerufen wird. Die konstante Drehzahl wurde gewählt, um nicht bei variabler Drehzahl durch Beschleunigungs- und Bremsmomente das Ergebnis zu verfälschen.

$$P = n \cdot M \cdot 2 \cdot \pi$$

Um eine möglichst hohe Lastleistung darzustellen, wurde die Drehzahl konstant auf 2800 U/min eingestellt. Diese Art des Leistungsabrufs hat den Nachteil, das bei niedrigen Lasten oder bei keiner Lastanforderung der Antrieb weiter mit 2800 U/min dreht. Dadurch ergibt sich eine elektrische Restleistung, die an der Motorseite des Umrichters abgegeben wird.

In Abbildung 3.8 sind am Beispiel eines Lastprofils die tatsächliche Last an der Abtriebswelle abgebildet. In Bereichen über 250 W Leistung wird das Lastprofil sehr gut getroffen, während es bei Soll-Leistungen unterhalb von 250 W zu Abweichungen kommt.

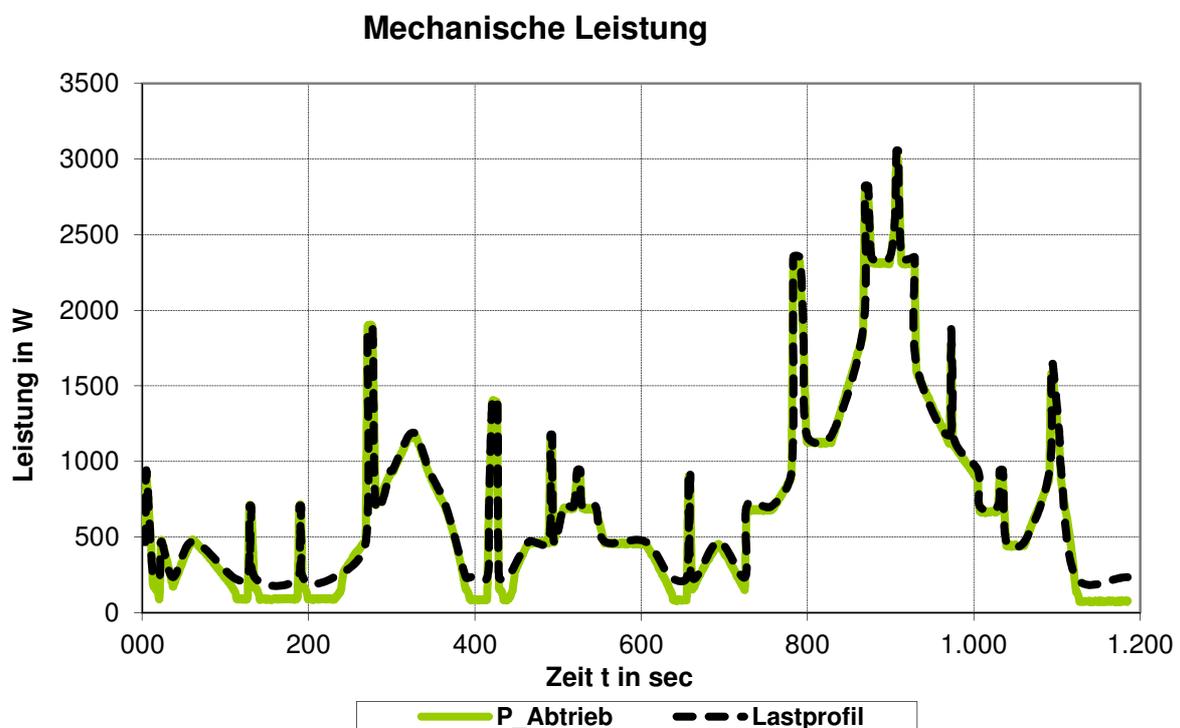


Abbildung 3.8: Soll- und Ist-Lastprofil an der Abtriebswelle

3.7 Messwertaufnahme

Zur Auswertung der Versuche wurden folgende Messwerte aufgenommen:

- Drehzahl Dieselmotor
- Drehmoment Dieselmotor
- Drehzahl Elektromotor-Abtrieb
- Drehmoment Elektromotor-Abtrieb
- Kraftstoffverbrauch Dieselmotor
- Kraftstoffdichte

- Kondensatorspannung
- Zwischenkreisspannung
- Versorgungsstrom der 24 V Spannung (DC/DC-Steller, Frequenzumrichter-Abtrieb, Frequenzumrichter-Diesel)

Für die Messwertaufnahme wird ein Messgerät mit zwei Steckkarten der Firma National Instruments verwendet. Dieses Messgerät ist unter anderem in der Lage differentielle Spannungseingänge im Bereich 0-10 V zu messen. Dieses Messgerät ist über USB mit einem separaten PC verbunden. Die Messwertaufzeichnung funktioniert über ein Programm (Labview ®), welches die Messgrößen mit einer Abtastrate von 22 kHz für 1185 s aufzeichnet.

Die sehr hohe Frequenz der Messwertaufnahme von 22 kHz wurde ausgewählt um das Drehmoment des Dieselmotors korrekt messen zu können. Das Drehmoment des Dieselmotors schwankt über eine Umdrehung sehr stark. Mit 22 kHz kann bei einer Drehzahl von 3600 U/min pro Grad Wellendrehung ein Messwert aufgenommen werden.

4. Vermessung des Gesamtsystems

Für die Untersuchungen wurden Lastprofile gewählt, für die aus vorangegangenen Versuchen an diesem Prüfstand bereits Kraftstoffverbräuche beim Betrieb mit konstanter Drehzahl vorlagen, um eine Vergleichsbasis für die Ergebnisse zu haben. Für den Test des Systems mit einem drehzahlvariablen Dieselgenerator wurden die Lastzyklen „Kasseler“ und „LKW“ gewählt.

Das Kasseler Lastprofil entspricht dem Leistungsbedarf eines Haushaltes [Mie00]. Das LKW Lastprofil entspricht der typischen Last einer Auxiliary Power Unit (Stromerzeuger) in einem Amerikanischen Truck [Ste06]. Beide Lastprofile wurden für einen Leistungsbereich bis 3 kW skaliert. Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 zeigen die untersuchten Lastprofile.

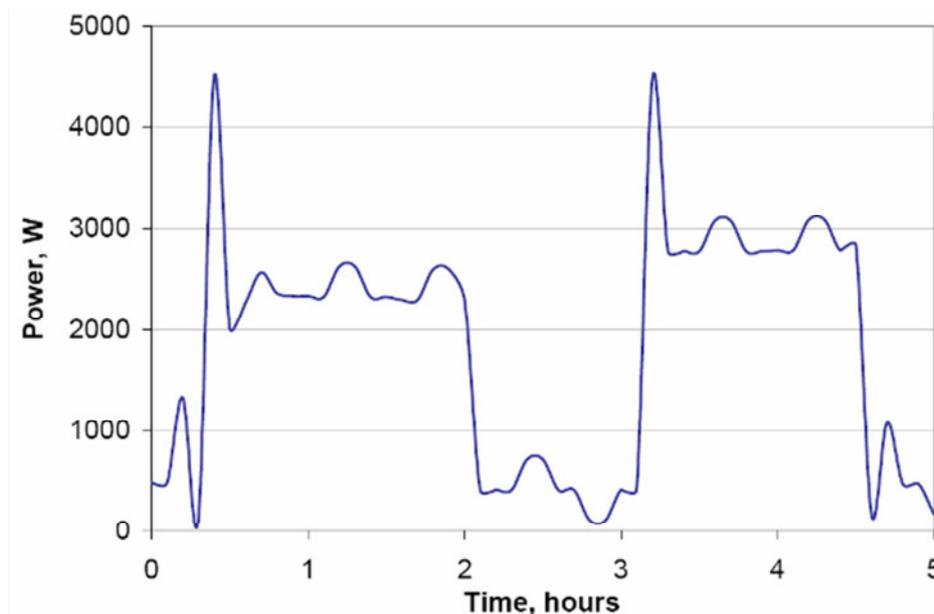


Abbildung 4.1: Lastzyklus „LKW“

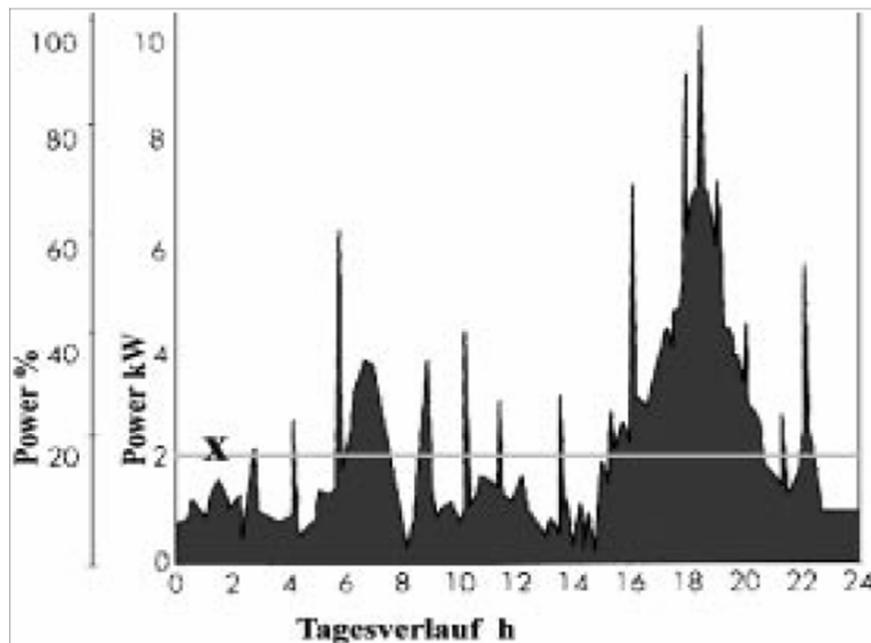


Abbildung 4.2: Lastzyklus „Kasseler“

Die folgenden Strategien wurden anhand dieser Lastzyklen untersucht:

- Variable Drehzahl ohne Start-Stopp,
- Variable Drehzahl mit Start-Stopp auf dem neuen Prüfstand

Um die Eigenschaften und Möglichkeiten des neuen Prüfstandes aufzuzeigen, wurde ein weiterer Versuch durchgeführt, indem das Einsparpotenzial des Start-Stopp-Modus im Leerlauf ermittelt wird, ein weiterer Versuch der die Möglichkeit der Rekuperation aufzeigt, sowie ein Versuch, der die Möglichkeiten des DC/DC-Stellers aufzeigen soll.

Die Dieselmotorleistung P_{mech} wird aus dem Drehmoment und der Drehzahl an der Ausgangswelle des Dieselmotors ermittelt.

Die Lastleistung P_{Abtrieb} bzw. P_{Last} wird aus dem Drehmoment und der Drehzahl an der Abtriebswelle ermittelt.

Alle Versuche wurden wie am ursprünglichen Prüfstand in warmen Zustand des Dieselmotors und mit abgeklemmtem Batterieladekabel durchgeführt.

4.1 Versuch: Kasseler-Zyklus

Abbildung 4.3 zeigt den Leistungsverlauf des skalierten Lastzyklus aus Abbildung 4.2. Dieses Lastprofil entspricht der am Abtrieb gemessenen mechanischen Leistung.

In Abbildung 4.4 ist der Verlauf der Lastleistung der Motorleistung sowie der Kondensatorspannung zu sehen. Es lässt sich erkennen, wie die Motorleistung zeitversetzt auf die Lastleistung ansteigt und fällt: z.B. bei $t = 280$ s. Es lässt sich auch erkennen, wie kurze und kleine Lastsprünge vom Kondensator abgepuffert werden und vom Dieselmotor nicht oder nur abgeschwächt abgefahren werden: z.B. bei $t = 490$ s und bei $t = 970$ s.

Dieser Versuch soll die Kraftstoffeinsparung im Vergleich zu einem System mit konstanter Drehzahl nachweisen. Dazu wurde das Kasseler Lastprofil auf dem neuen Prüfstand abgefahren. Die Zykluszeit beträgt wie bei der Messung auf dem ursprünglichen Prüfstand 1185 s. Da das Lastprofil keine Phasen ohne Last enthält wurde hier auf den Start-Stopp-Modus verzichtet.

Skaliertes Lastprofil "Kasseler" Zyklus

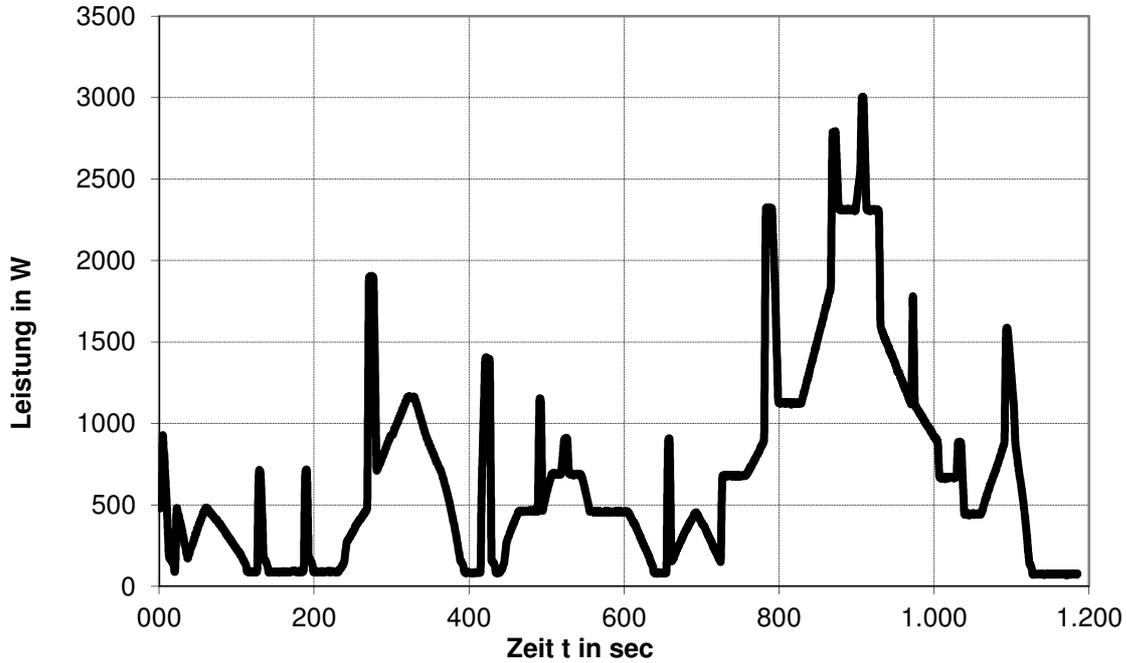


Abbildung 4.3: Messschrieb des skalierten Lastprofils „Kasseler“

Mechanische Leistung, Kondensatorspannung

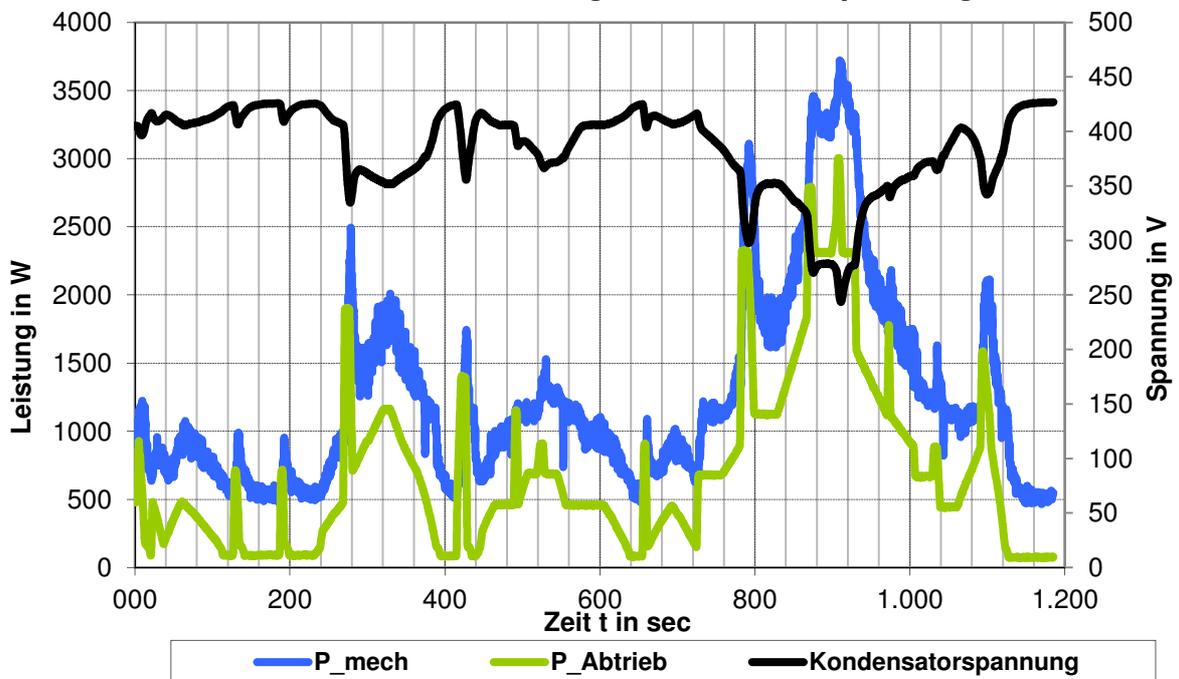


Abbildung 4.4: Kasseler-Profil; mechanische Leistung und Kondensatorspannung

Diese Messung zeigte eine Kraftstoffeinsparung in Höhe von **34,4 %** im Vergleich zu einem Betrieb mit konstanter Drehzahl.

4.2 Versuch: LKW-Zyklus

Auch in diesem Versuch sollen die Ergebnisse des ursprünglichen Prüfstandes verifiziert werden. Da dieses Lastprofil Zeitabschnitte ohne Last enthält wird hier auch ein Versuch im Start-Stopp-Modus durchgeführt. Abbildung 4.5 zeigt das skalierte Lastprofil aus Abbildung 4.1.

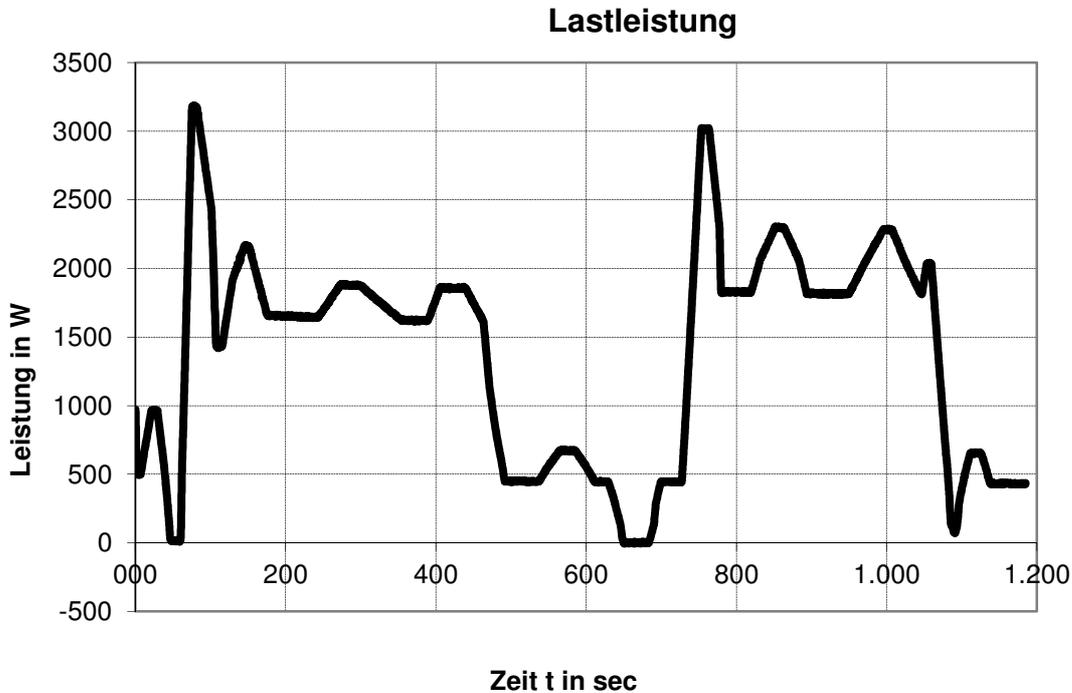


Abbildung 4.5: Messschrieb des skalierten Lastprofils „LKW“

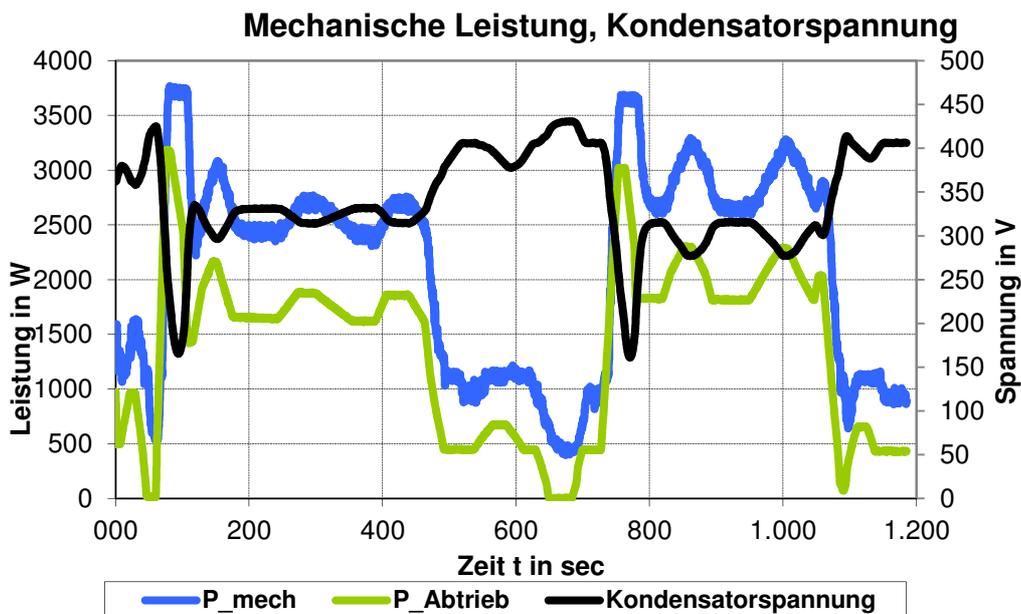


Abbildung 4.6: Profil „LKW“, mechanische Leistung, Kondensatorspannung

In Abbildung 4.6 sind die zwei Lastspitzen, das hohe durchschnittliche Lastprofil sowie die Phasen ohne Last deutlich zu erkennen. Die Dieselmotorleistung folgt der Lastleistung

verzögert und wird gegenproportional zur Kondensatorspannung geregelt. Die gemessene Kraftstoffeinsparung im Vergleich zu einem Betrieb mit konstanter Drehzahl beträgt **21,1 %**.

4.3 Versuch: Vergleich ohne Start-Stopp gegen mit Start-Stopp

Dieser Versuch soll zeigen, ob im Start-Stopp-Modus an dem neuen Prüfstand Verbrauchseinsparungen möglich sind.

Um dies zu untersuchen, wurden zwei Versuche gemacht, bei denen der Abtrieb stillsteht und somit keine Last anliegt. Der erste Versuch wurde ohne Start-Stopp-Modus durchgeführt, der Zweite mit. In diesem Fall treten als Verluste nur die Selbstentladung der Kondensatoren sowie die Verluste in den elektrischen Bauteilen auf. Der Versuch wurde über eine Zeit von 626 s aufgenommen. Es wurde darauf geachtet, dass die Kondensatorspannung am Ende gleich der Kondensatorspannung am Anfang ist, um das Ergebnis nicht zu verfälschen.

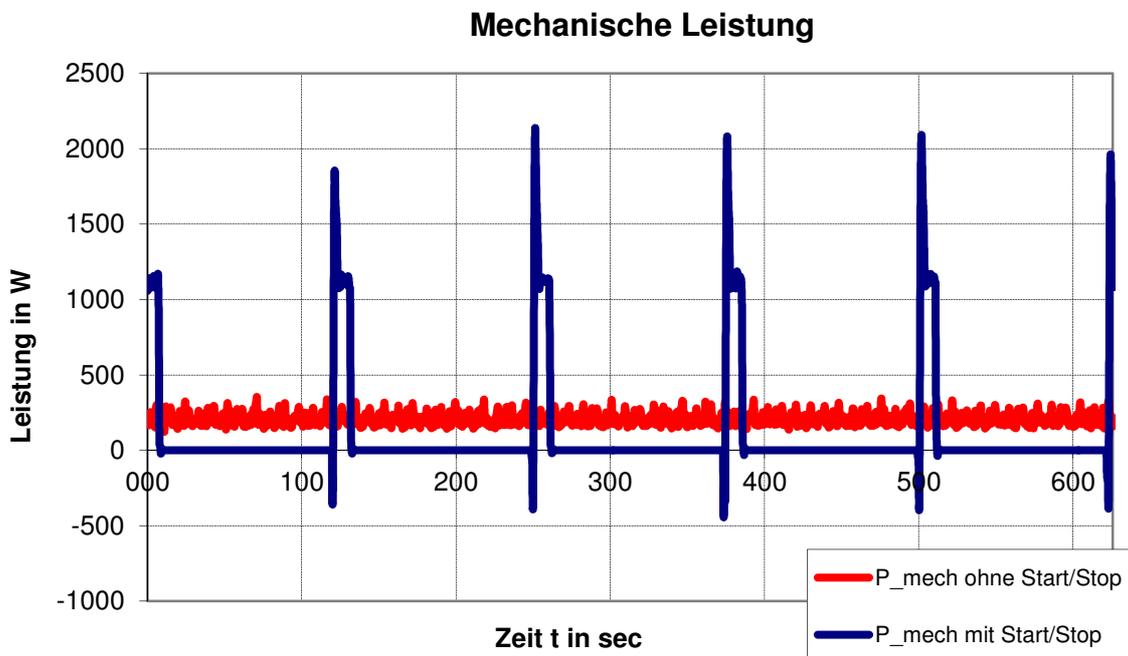


Abbildung 4.7: Versuch Start-Stopp mechanische Leistung

In Abbildung 4.7 ist deutlich zu erkennen, dass ohne Start-Stopp-Betrieb die Leistung des Dieselmotors konstant ist, während im Start-Stopp-Betrieb der Dieselmotor die meiste Zeit ausgeschaltet ist und nur kurzzeitig eine hohe Leistung abgibt.

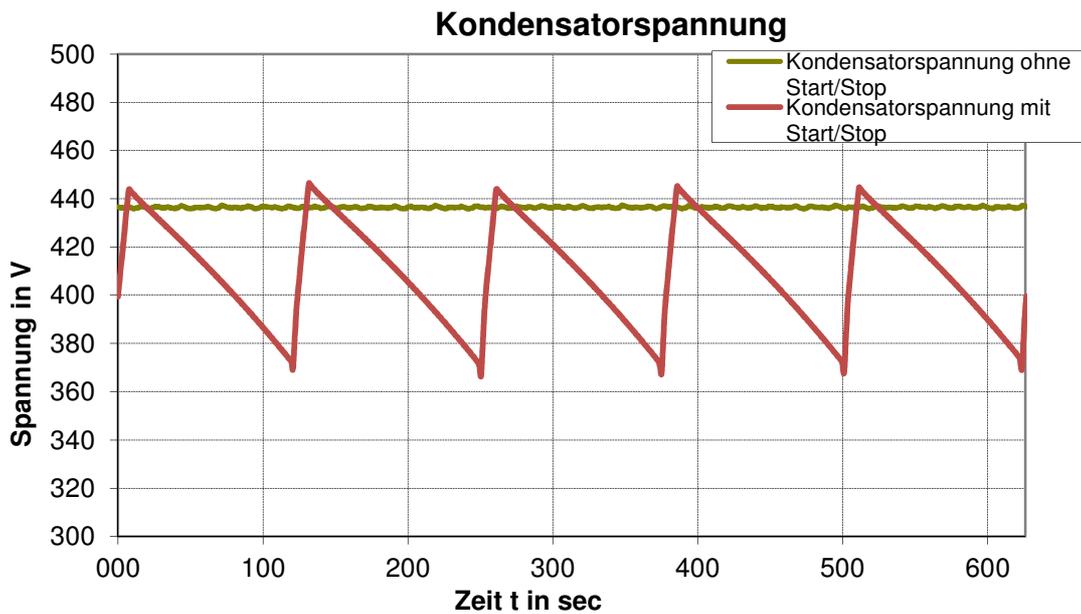


Abbildung 4.8: Versuch Start-Stopp-Kondensatorspannung

Auch in Abbildung 4.8 ist der Unterschied im Start-Stopp-Modus deutlich zu erkennen. Während die Kondensatorspannung im Betrieb ohne Start-Stopp-Modus konstant bei 335 V liegt, fällt sie im Betrieb mit Start-Stopp-Modus zyklisch von 445 V auf 370 V ab. Die Kondensatorspannung fällt mit einer konstanten Steigung bis 370 V ab danach sinkt sie schlagartig auf 370 V. Dies liegt daran, dass ab 370 V der Motor wieder gestartet wird und dafür Energie aus dem Kondensator benötigt wird.

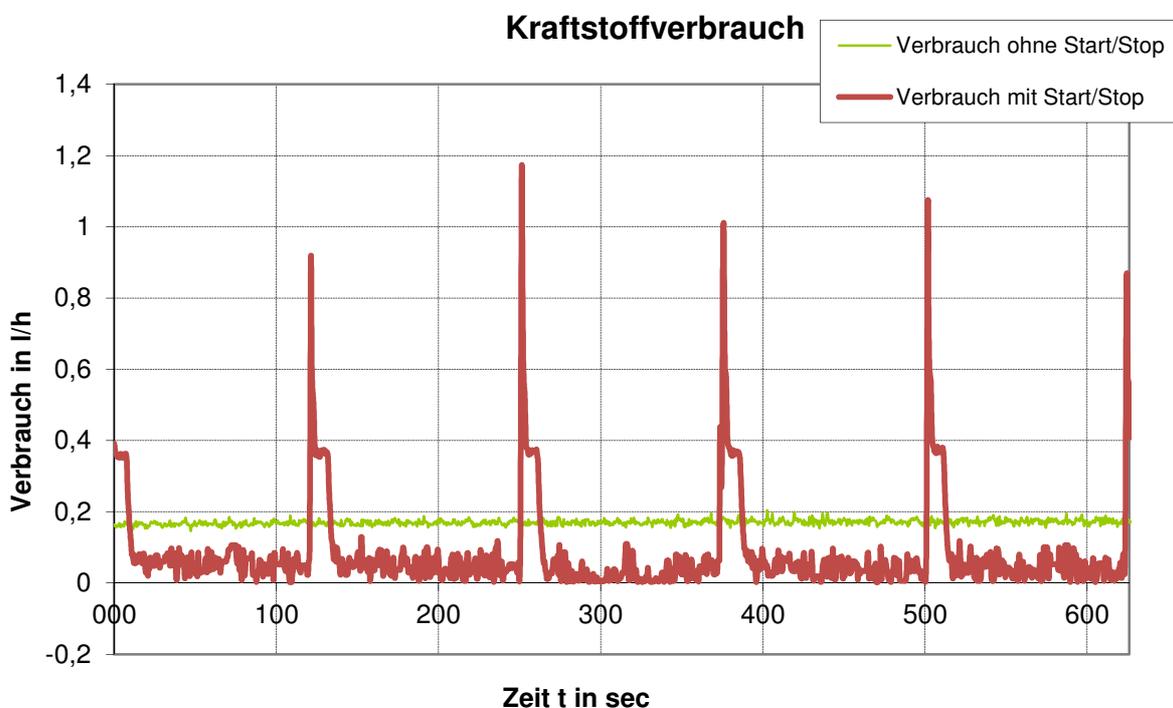


Abbildung 4.9: Versuch Start-Stopp-Kraftstoffverbrauch

In Abbildung 4.9 werden die Kraftstoffverbräuche miteinander verglichen. Auch hier lässt sich deutlich der Unterschied zwischen den beiden Betriebsmodi erkennen.

Tabelle 4.1: Vergleich mit Start-Stopp gegen ohne Start-Stopp-Kraftstoffverbrauch

Betriebsmodus	Kraftstoffverbrauch [l/h]
ohne Start-Stopp	0,02965
mit Start-Stopp	0,01446

Aus der Tabelle 4.1 ergibt sich eine Kraftstoffeinsparung von 51,2 % im Start-Stopp-Modus.

Aus Abbildung 4.9 lässt sich auch erkennen, dass in Bereichen in denen der Dieselmotor abgeschaltet ist trotzdem ein Kraftstoffverbrauch von bis zu 0,1 l/h gemessen wird. Dies liegt an Messungenauigkeiten und beeinflusst bei diesem Versuch das Ergebnis sehr stark. Wenn man den Kraftstoffverbrauch in Bereichen in denen die Drehzahl des Dieselmotors unter 10 U/min liegt manuell auf Null korrigiert, wäre der neue Kraftstoffverbrauch nur 0,00774 l/h. Aus dem Versuch lässt sich deutlich erkennen, dass sich im Start-Stopp-Betrieb Kraftstoffeinsparungen erzielen lassen. Die elektrischen Verluste können noch minimiert werden, in dem z.B. der Frequenzumrichter-Diesel für die Zeit in der der Dieselmotor stillsteht in Betriebszustand 2 gesetzt wird.

4.4 Versuch: Rekuperationsprofil

Mit diesem Versuch soll das Potenzial des Prüfstandes zur Rekuperation aufgezeigt werden. Dafür wurde ein Lastprofil erstellt, welches eine negative Last enthält. Der Versuch wurde im Start-Stopp-Modus durchgeführt. Die Einstellung der Laderegelung und der Start-Stopp-Regelung musste angepasst werden, so dass der Dieselmotor sich bei einer Spannung von 370 V abschaltet und bei einer Spannung von 330 V wieder angelassen wird. Dadurch stehen im Kondensatorspeicher 10,2 kJ freier Speicher zur Verfügung.

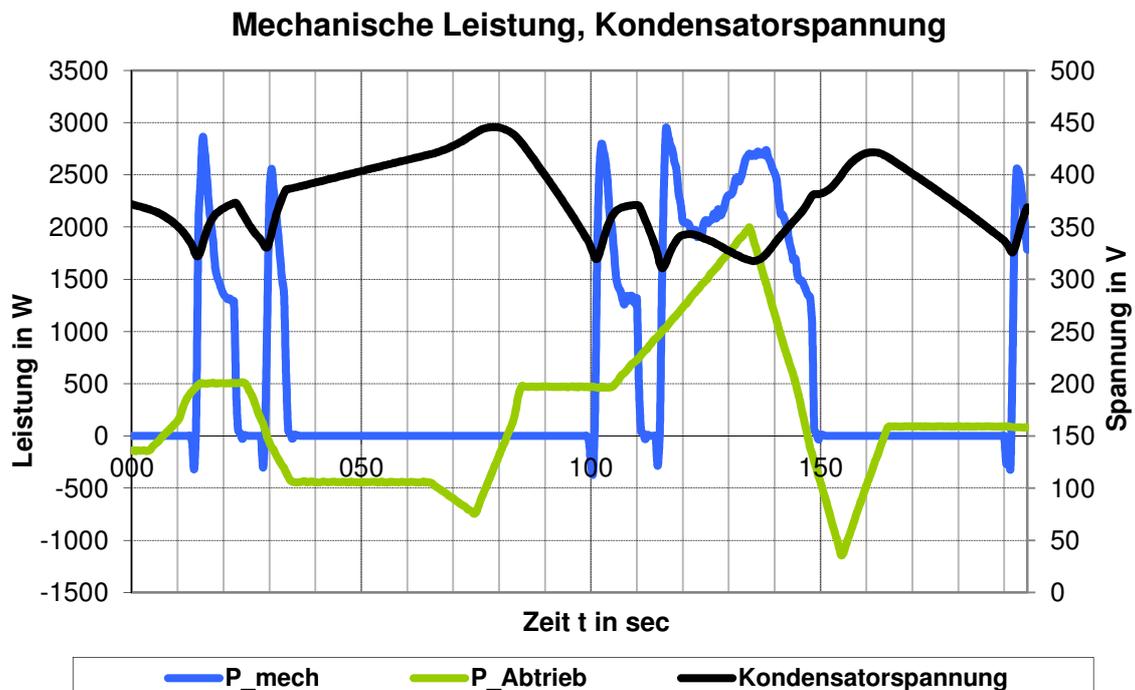


Abbildung 4.10: Mechanische Leistung und Kondensatorspannung im Rekuperationsprofil

In Abbildung 4.10 ist zu sehen, wie bei $t = 30$ s die erste negative Last anfängt, sie steigt bis zu einem Wert von -700 W danach wird die Last wieder positiv, bis bei $t = 145$ s die zweite

negative Last anliegt, sie steigt bis zu einem Wert von -1100 W . Es lässt sich deutlich erkennen, wie bei einer negativen Last die Kondensatorspannung steigt auch wenn der Dieselmotor abgeschaltet ist, zum Beispiel im Bereich $t = 150 - 160\text{ s}$. In diesem Bereich ergibt das Integral über die Last eine eingebrachte Energie von 7937 J . Die Energie im Kondensator steigt im gleichen Bereich um 4998 J , daraus ergibt sich ein Rekuperationswirkungsgrad von $63,0\%$. Im Bereich von $t = 40-80\text{ s}$ ergibt sich nur ein Rekuperationswirkungsgrad von $36,7\%$. Dies liegt an der niedrigeren Last und dem daraus folgenden Betrieb des Elektromotor-Abtriebs im Bereich schlechtem Wirkungsgrads, auch ist die Zeitspanne größer, so dass die Selbstentladung des Kondensatorspeichers größer ist.

Dieser Versuch hat gezeigt, dass dies mit dem Prüfstand Rekuperation möglich ist, dafür jedoch die Regelung angepasst werden muss. Für Rekuperation mit einem beliebigen Lastprofil muss außerdem noch eine Sicherung gegen Überladen des Kondensators eingebaut werden.

4.5 Versuch: Kondensatorspannungsgrenze

In diesem Versuch soll die minimale Spannung auf der Kondensatorseite, die der DC/DC-Steller braucht um eine Zwischenkreisspannung von 500 V zu erzeugen, ermittelt werden. Dafür wurde bei geladenem Kondensatorpeicher und Zwischenkreis eine Drehzahl von 10 U/min an der Abtriebswelle eingestellt, so dass sich der Kondensatorpeicher sehr langsam entlädt.

Zwischenkreisspannung, Kondensatorspannung

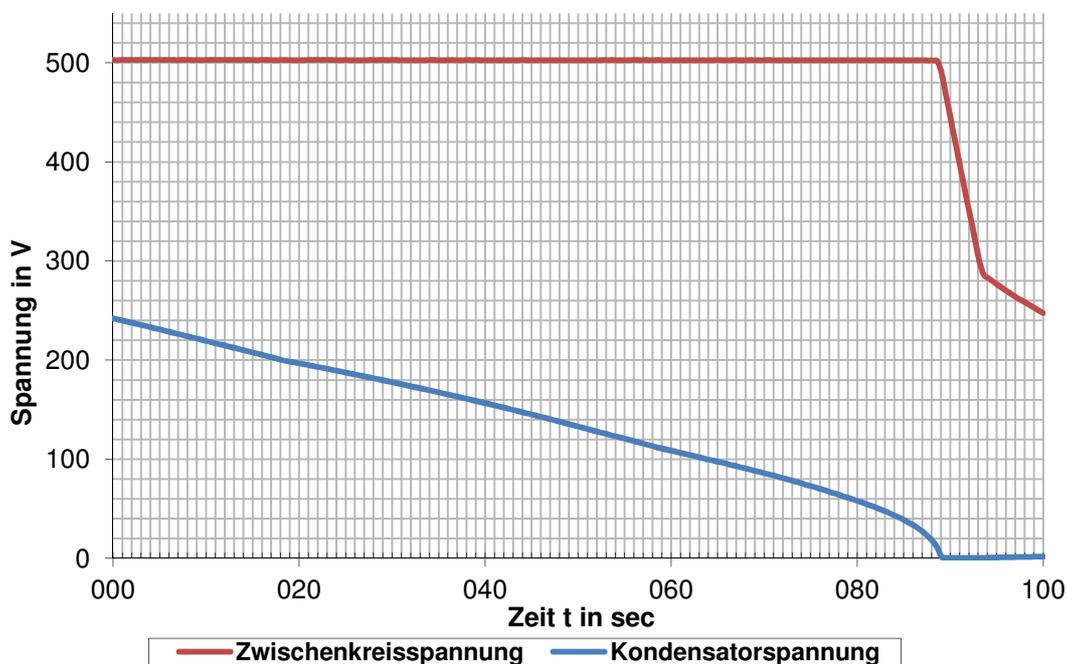


Abbildung 4.11: Spannungsverlauf bei Kondensatorentladung

Aus Abbildung 4.11 wird deutlich, dass der DC/DC-Steller bis zu einer Kondensatorspannung von 20 V noch in der Lage ist, eine Zwischenkreisspannung von 500 V aufrechtzuerhalten.

Dieser Versuch hat gezeigt, dass der DC/DC-Steller in der Lage ist den Zwischenkreis z.B. aus einer 20 V Quelle zu versorgen. Der hier verwendete Kondensator enthält bei einer

Spannung von 20 V jedoch nur noch 64 J Energie und somit ist die Energiemenge zu klein um Lastspitzen ausreichend puffern zu können, deshalb ist ein Betrieb des Kondensators in diesem Spannungsbereich nicht zu empfehlen. Jedoch wäre der DC/DC-Steller in der Lage, die Zwischenkreisspannung zum Beispiel mit einer 24 V Batterie aufrechtzuerhalten. Da der Maximalstrom des DC/DC-Stellers jedoch auf 10,5 A begrenzt ist und auch der Entnahmestrom einer 24 V Batterie begrenzt ist, ist die Leistung der Batterie auf maximal 252 W beschränkt. Somit ist bei einem alleinigen Betrieb mit Batterie ohne Kondensator eine ausreichende Pufferfähigkeit nicht mehr gegeben. Deshalb ist ein Batteriespeicher nur als Erweiterung zu einem Kondensatorspeicher sinnvoll. Der Wirkungsgrad des DC/DC-Stellers in diesem Bereich wurde nicht untersucht.

5. Fazit

Es wurde ein Prüfstand für einen dieselelektrischen hybriden Antriebsstrang aufgebaut und in Betrieb genommen. Der Prüfstand besteht aus einem Dieselmotor, zwei Elektromotoren, zwei Frequenzumrichtern, einem DC/DC-Steller sowie einem Kondensatorspeicher. Es wurde eine Steuerung und Regelung für die Komponenten aufgebaut und in Versuchen auf ihre Funktion getestet.

Die hohen Einsparungen in Höhe von 21,1 % im LKW- bzw. 34,4 % im Kasseler-Zyklus bestätigen die bereits am Mobima in Voruntersuchungen durchgeführten Versuche. Da die in diesem Projekt vorherrschenden Bedingungen von den damaligen abweichen, soll an dieser Stelle eine Diskussion der Ergebnisse erfolgen.

Die Vergleichsbasis für die Untersuchungen bildet ein Abfahren der vorgestellten Zyklen mit dem selben Dieselmotor und Generator mit konstanter Drehzahl. Da das Lastprofil nicht exakt der Vorgabe entspricht, kommt es zu einem leicht veränderten Energiebedarf an der Abtriebsseite (siehe auch Abschnitt 3.6). Zudem handelte es sich beim Lastzyklus der Referenzmessung um ein stufenweises Profil, während es in dieser Untersuchung kontinuierlich abgefahren wurde (siehe Abbildung 5.1).

Es ist zu erkennen, dass der Referenzzyklus eine verstellbare Last hatte, während die Last bei den Untersuchungen stufenlos verstellbar war. In Bereichen niedriger Lastleistung ist die Abweichung der Zyklen groß. Dadurch ergibt sich eine Differenz in der Energieabfuhr von 7,6 %. Um diesen Betrag ist der Energiebedarf in diesen Untersuchungen geringer, was eine Kraftstoffeinsparung sicherlich begünstigen würde. Demgegenüber muss jedoch auch die unterschiedliche Art der Leistungsanforderung betrachtet werden. Während bei den Referenzzyklen die Leistung rein elektrisch abgerufen wurde, handelt es sich in diesen Untersuchungen um mechanische Leistungen, so dass eine Wandlungsstufe durch Umrichter und Elektromotor zusätzlich durchlaufen werden muss, was die oben beschriebene geringere Energieaufnahme relativiert. Abbildung 5.2 zeigt den Aufbau des Systems, mit dem die Referenzzyklen aufgenommen wurden.

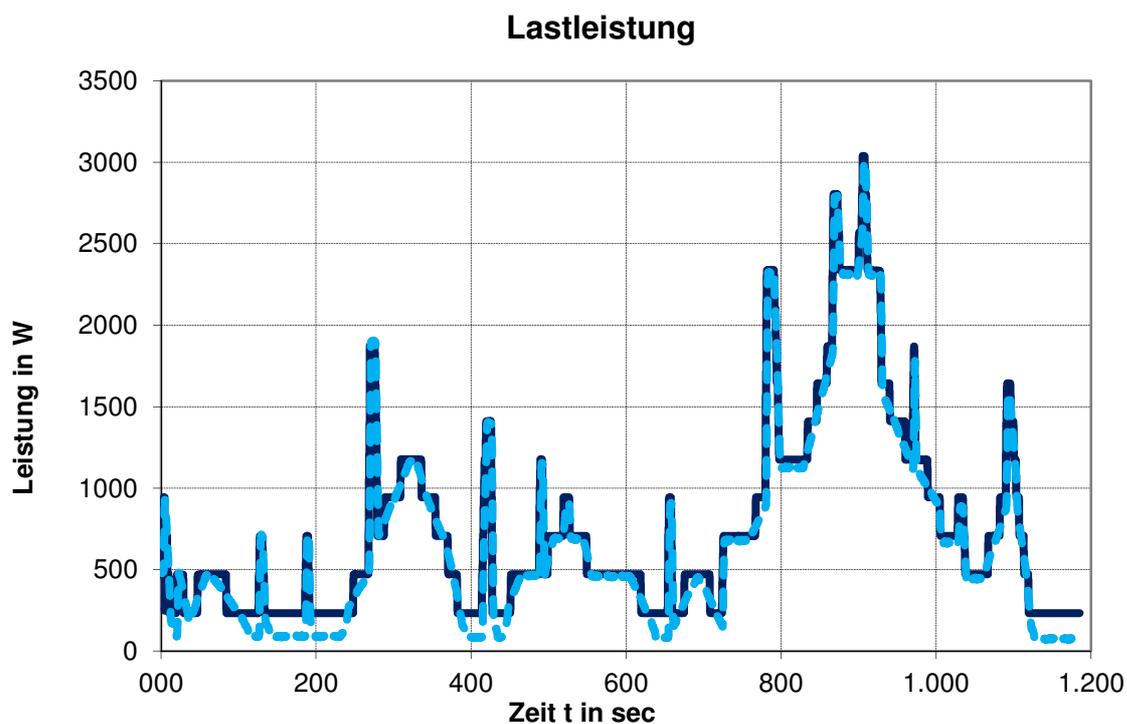


Abbildung 5.1: Verwendete Lastprofile aus Referenzmessung und ENHYMA

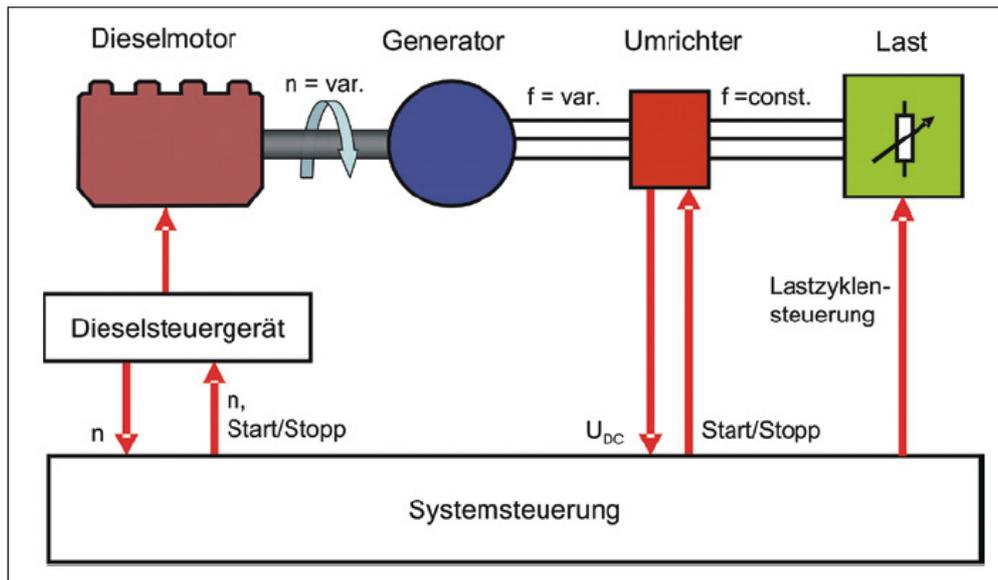


Abbildung 5.2: Systemarchitektur des ursprünglichen Prüfstands [Den11]

Die weitere Leistungswandlungsstufe sowie der Betrieb des Diesels in temporär ungünstigem Wirkungsgrad beim Beladen des Kondensators spiegelt sich in einem höheren Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu den Messungen am Prüfstand ohne Speicher wieder. Dennoch zeigt sich in beiden untersuchten Lastprofilen eine Einsparung im Vergleich zum Betrieb mit konstanter Drehzahl, mit der gleichen Tendenz wie in den vorangegangenen Versuchen, eine Signifikanz ist somit klar erkennbar. Es ist davon auszugehen, dass ein hybrides Antriebssystem, insbesondere wenn es mit einer Kennfeldregelung des Diesels und Start-Stopp-Automatik ausgestattet ist, im Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen zu Effizienzsteigerungen führen wird.

Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 zeigen zusammenfassend die Ergebnisse der Untersuchungen. Sie zeigen die Einsparungen der aktuellen Experimente wie auch die aus den vergangenen Versuchen am Prüfstand nach Abbildung 5.2.

Tabelle 5.1 Vergleich Kasseler-Profil

	Referenz: konstante DZ	Var. DZ, alte Untersuchung	Var. DZ, ENHYMA
Gesamtverbrauch [l]	0,212	0,120	0,139
Einsparung [%]	-	43,4	34,4
Gesamtenergieverbrauch Lastzyklus [MJ]	0,88	0,85	0,81
Mittlerer Wirkungsgrad Dieselmotor [%]	19,6	27,8	28,3
Mittlerer Wirkungsgrad Elektrik [%]	56,6	68,2	54,9
Energiedifferenz im Kondensator [J]			2874
Gesamtwirkungsgrad [%]	11,01	18,69	15,44

Tabelle 5.2: Vergleich LKW-Profil

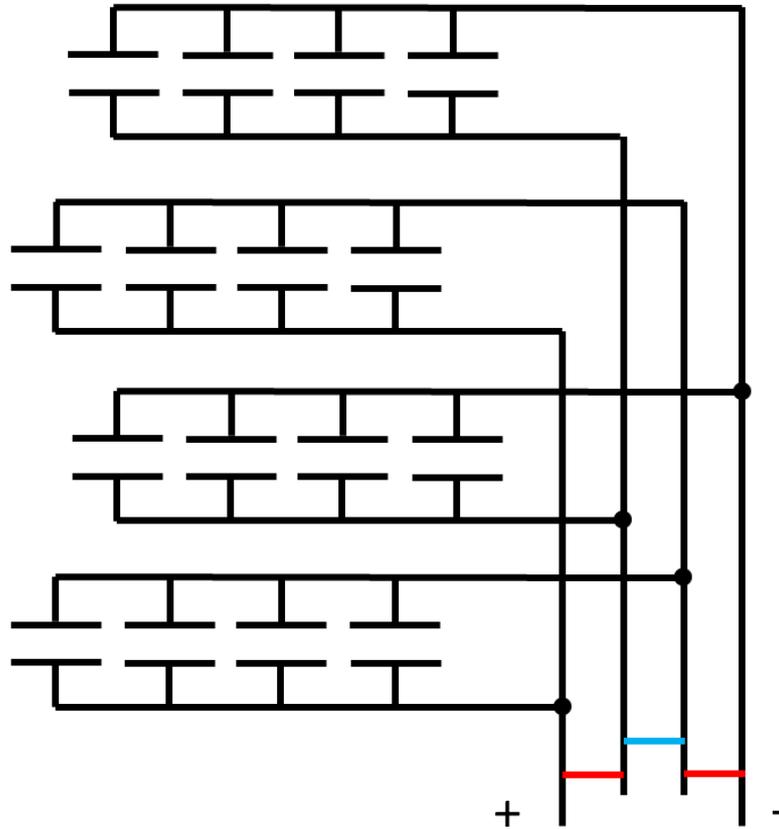
	Referenz: konstante DZ	Var. DZ Start-Stopp, alte Untersuchung	Var. DZ, Start-Stopp, ENHYMA
Gesamtverbrauch [l]	0,279	0,193	0,220
Einsparung [%]	-	30,8	21,1
Gesamtenergieverbrauch Lastzyklus [MJ]	1,66	1,61	1,63
Mittlerer Wirkungsgrad Dieselmotor [%]	23,6	30,2	30,1
Mittlerer Wirkungsgrad Elektrik [%]	67,6	74,1	65,3
Energiedifferenz im Kondensator [J]			1047
Gesamtwirkungsgrad [%]	15,82	22,14	19,52

Literaturverzeichnis

- [Zür13] ZÜRN, J.: *Alternative Antriebe und Energien*. Vorlesung: Grundlagen der Nutzfahrzeugentwicklung Vorlesungsunterlagen Nr. 6, Sommersemester 2013.
- [UNO07] Amtsblatt der Europäischen Union: Richtlinie 2007/46/EG Des Europäischen Parlaments und des Rates.
- [Kob13] KOBER, S.: *Elektromobilität Messungen im Hoch-Volt-System*. <http://www.kfz-sachverstaendiger-kober.de/downloads/>, Münster, 2013.
- [Bro08] BROSCH, P.: *Frequenzumrichter Technologie und wirtschaftlicher Einsatz*. 5. Auflage. verlag moderne industrie, Landsberg/Lech, 2008.
- [THN13] Internetauftritt der Technischen Hochschule in Nürnberg; <http://www.th-nuernberg.de/seitenbaum/fakultaeten/elektrotechnik-feinwerktechnik-informationstechnik>, August 2013.
- [Hei13] Firma Heinzmann GmbH & Co. KG; PGS_120_L_TG_Datenblatt.
- [Ret08] RETZBACH, L.: *Akkus und Ladetechniken*. Franzis Verlag GmbH, Poing, 2008.
- [Gei13] GEIMER, M.: *Bus-Steuerung*. Skript zur Vorlesung
- [Vec13] Internetauftritt der Firma: Vector Informatik GmbH, Downloads https://vector.com/vi_downloadcenter_de.html, Juli 2013.
- [LTi13] Internetauftritt der Firma: LTi DRIVES GmbH, Downloads <http://drives.lt-i.com/deutsch/downloads/downloadbereich-offen.html>, Juli 2013.
- [Den11] DENGLER, P., GEIMER, M., ZAHORANSKY, R.: *Kraftstoffsparen mit variabler Drehzahl*. ICE, 2011.
- [Mie00] MIES, K.: *Drehzahlvariabler Stromerzeuger*. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, 2000.
- [Ste06] STEINBERGER-WILCKENS, R.: Wissenschaftlicher Ergebnisbericht 2006, Schwerpunkt: Energie, FE-Vorhaben: P12 Rationelle Energieumwandlung, Forschungszentrum Jülich, 2006.

Anhang 1

Schaltplan der Kondensatoren:



Rote Option: Alle Kondensatoren sind parallel verschaltet.
Blaue Option: Jeweils zwei Kondensatoren in Reihe.

Anhang 2

Auflistung aller von LTi vorgenommenen Änderungen am DC/DC-Steller:

Die Software basiert auf der ServoOne PSU Standardsoftware V250.03-00.

Die folgenden Punkte wurden bezogen auf die Version V250.03-00 angepasst:

- Netzüberwachung und Begrenzung des DC-Spannungssollwerts aufgrund der gemessenen Netzspannung wurde entfernt.
- Implementierung einer DC-Stromregelung für die Ausgangsphasen U (q-Stromregler) und V (d-Stromregler).
- Der DC-Spannungsregler gibt in der Regelungsart VCON identische Stromsollwerte für die Stromregler in Phase U und V vor.
- Die Modulation der Phase V erfolgt um T/2 versetzt zur Modulation von Phase U (zur Verringerung der Stromwelligkeit).
- Stellbereich der Ausgangsspannung in Phase U und V zwischen 0V..UZK (weitere Begrenzung der Ausgangsspannung durch Parameter P-0419 möglich).
- Manuelle Stromsollwertvorgabe (Regelungsart ICON) über Parameter P-0326 CON_Add_iNdRef [A].

Anhang 3

Objekte der CAN-Kommunikation:

- 2006 CAN-Baudrate
- 2024-2052 CANopen-Nachrichten
- 2208/6040H Steuerwort
- 2055/005H Dummy
- 2209/6041H Statuswort
- 2223/6060H Betriebsart
- 2229/606CH Ist-Drehzahl
- 2230/6071H Soll-Drehmoment
- 2270/60FFH Soll-Drehzahl
- 2272/6077H Ist-Drehmoment
- 731 Index 1 Motortemperatur
- 14141 Configurable fieldbus control word 0
- 14144 Configurable fieldbus status word 0
- 403 Begrenzung des Stroms an der Kondensatorseite
- 410 Soll-Zwischenkreisspannung
- 417 Maximaler positiver Ausgangsstrom
- 418 Maximaler negativer Ausgangsstrom
- 431 Maximum output voltage of current controller (maximale Kondensatorspannung)
- 700 Gefilterter Istwert des Ausgangsstroms

Anhang 4 – Teil 1

Kommunikationsmatrix:

Signale/Knoten	Autobox	DC_DC_Steller	Frequenzrichter_Abrtrieb	Frequenzrichter_Diesel
~ Statuswort_DC_DC_Steller	DC_DC_Steller_an_AutoBox1 (0x185)	<Tx> DC_DC_Steller_an_AutoBox1 (0x185)		
~ Istzwischenkreisstrom_DC_DC	DC_DC_Steller_an_AutoBox1 (0x185)	<Tx> DC_DC_Steller_an_AutoBox1 (0x185)		
~ Ausgangsstrom_DC_DC_Steller	DC_DC_Steller_an_AutoBox2 (0x285)	<Tx> DC_DC_Steller_an_AutoBox2 (0x285)		
~ Steuerung_DC_DC_Steller	<Tx> AutoBox_an_DC_DC_Steller1 (0x205)	AutoBox_an_DC_DC_Steller1 (0x205)		
~ Sollzwischenkreisstrom_DC_DC	<Tx> AutoBox_an_DC_DC_Steller1 (0x205)	AutoBox_an_DC_DC_Steller1 (0x205)		
~ Bipolar_Strombegrenzung_DC_DC	<Tx> AutoBox_an_DC_DC_Steller2 (0x305)	AutoBox_an_DC_DC_Steller2 (0x305)		
~ Negative_Strombegrenzung_DC_DC	<Tx> AutoBox_an_DC_DC_Steller2 (0x305)	AutoBox_an_DC_DC_Steller2 (0x305)		
~ Positive_Strombegrenzung_DC_DC	<Tx> AutoBox_an_DC_DC_Steller3 (0x405)	AutoBox_an_DC_DC_Steller3 (0x405)		
~ MaxKondensatorstrombegrenzung_DC_DC	<Tx> AutoBox_an_DC_DC_Steller3 (0x405)	AutoBox_an_DC_DC_Steller3 (0x405)		
~ NMT_State_Maschine	<Tx> NMT_State_Maschine (0x0)	NMT_State_Maschine (0x0)	NMT_State_Maschine (0x0)	NMT_State_Maschine (0x0)
~ dummy	<Tx> NMT_State_Maschine (0x0)		NMT_State_Maschine (0x0)	NMT_State_Maschine (0x0)
~ Steuerung_Abrtrieb	<Tx> AutoBox_an_Abrtrieb (0x206)	AutoBox_an_Abrtrieb (0x206)	AutoBox_an_Abrtrieb (0x206)	
~ Sollzahl_Abrtrieb	<Tx> AutoBox_an_Abrtrieb (0x206)	AutoBox_an_Abrtrieb (0x206)	AutoBox_an_Abrtrieb (0x206)	
~ Betriebsart_Abrtrieb	<Tx> AutoBox_an_Abrtrieb2 (0x306)	AutoBox_an_Abrtrieb2 (0x306)	AutoBox_an_Abrtrieb2 (0x306)	
~ dummy	<Tx> AutoBox_an_Abrtrieb2 (0x306)		AutoBox_an_Abrtrieb2 (0x306)	
~ Istzahl_Abrtrieb	Abtrieb_an_AutoBox (0x186)	<Tx> Abtrieb_an_AutoBox (0x186)	<Tx> Abtrieb_an_AutoBox (0x186)	
~ Istmoment_Abrtrieb	Abtrieb_an_AutoBox (0x186)	<Tx> Abtrieb_an_AutoBox (0x186)	<Tx> Abtrieb_an_AutoBox (0x186)	
~ Statuswort_Abrtrieb	Abtrieb_an_AutoBox (0x186)	<Tx> Abtrieb_an_AutoBox (0x186)	<Tx> Abtrieb_an_AutoBox (0x186)	
~ Steuerung_Diesel	<Tx> AutoBox_an_Diesel (0x207)	AutoBox_an_Diesel (0x207)	AutoBox_an_Diesel (0x207)	AutoBox_an_Diesel (0x207)
~ Sollmoment_Diesel	<Tx> AutoBox_an_Diesel (0x207)	AutoBox_an_Diesel (0x207)	AutoBox_an_Diesel (0x207)	AutoBox_an_Diesel (0x207)
~ Statuswort_Diesel	Diesel_an_AutoBox (0x187)	Diesel_an_AutoBox (0x187)	<Tx> Diesel_an_AutoBox (0x187)	<Tx> Diesel_an_AutoBox (0x187)
~ Istzahl_Diesel	Diesel_an_AutoBox (0x187)	Diesel_an_AutoBox (0x187)	<Tx> Diesel_an_AutoBox (0x187)	<Tx> Diesel_an_AutoBox (0x187)
~ Istmoment_Diesel	Diesel_an_AutoBox (0x187)	Diesel_an_AutoBox (0x187)	<Tx> Diesel_an_AutoBox (0x187)	<Tx> Diesel_an_AutoBox (0x187)
~ Betriebsart_Diesel	<Tx> AutoBox_an_Diesel2 (0x307)	<Tx> AutoBox_an_Diesel2 (0x307)	AutoBox_an_Diesel2 (0x307)	AutoBox_an_Diesel2 (0x307)
~ dummy	<Tx> AutoBox_an_Diesel2 (0x307)		AutoBox_an_Diesel2 (0x307)	
~ Motortemperatur_Abrtrieb	Abtrieb_an_AutoBox2 (0x286)		<Tx> Abtrieb_an_AutoBox2 (0x286)	

Anhang 4 – Teil 2

Signale/Knoten	Autobox	Iti_belastungseinheit
~ Steuerwort_Belastung	<Tx> Autobox_an_Belastung (0x204)	Autobox_an_Belastung (0x204)
~ solldrehmoment_Belastung	<Tx> Autobox_an_Belastung (0x204)	Autobox_an_Belastung (0x204)
~ Statuswort_Belastung	Belastung_an_Autobox (0x184)	<Tx> Belastung_an_Autobox (0x184)
~ Istdrehzahl_Belastung	Belastung_an_Autobox (0x184)	<Tx> Belastung_an_Autobox (0x184)
~ Istdrehmoment_Belastung	Belastung_an_Autobox (0x184)	<Tx> Belastung_an_Autobox (0x184)
~ NMTstate_maschine	<Tx> NMTstate_maschine (0x0)	NMTstate_maschine (0x0)
~ dummy	<Tx> NMTstate_maschine (0x0)	
~ Betriebsart_Belastung	<Tx> setze_Betriebsart (0x304)	setze_Betriebsart (0x304)
~ dummy	<Tx> setze_Betriebsart (0x304)	setze_Betriebsart (0x304)

Anhang 5

Beispiel zum Einstellen der PDOs

Nummer	Index	Name	Wert	Einheit	Beschreibung
2045		COM_301_MappRxPd...			1600H DS301 mapping parameter for rxpdo1
2045	0	Number of mapped ob...	02h		1600H DS301 mapping parameter for rxpdo1
2045	1	Mapped object 1	60400010h		1600H DS301 mapping parameter for rxpdo1
2045	2	Mapped object 2	60710010h		1600H DS301 mapping parameter for rxpdo1
2045	3	Mapped object 3	00000000h		1600H DS301 mapping parameter for rxpdo1
2045	4	Mapped object 4	00000000h		1600H DS301 mapping parameter for rxpdo1
2045	5	Mapped object 5	00000000h		1600H DS301 mapping parameter for rxpdo1
2045	6	Mapped object 6	00000000h		1600H DS301 mapping parameter for rxpdo1
2045	7	Mapped object 7	00000000h		1600H DS301 mapping parameter for rxpdo1
2045	8	Mapped object 8	00000000h		1600H DS301 mapping parameter for rxpdo1
2046		COM_301_MappRxPd...			1601H DS301 mapping parameter for rxpdo2
2047		COM_301_MappRxPd...			1602H DS301 mapping parameter for rxpdo3
2048		COM_301_MappRxPd...			1603H DS301 mapping parameter for rxpdo4
2049		COM_301_MappTxPd...			1A00H DS301 mapping parameter for txpdo1
2049	0	Number of mapped ob...	03h		1A00H DS301 mapping parameter for txpdo1
2049	1	Mapped object 1	60410010h		1A00H DS301 mapping parameter for txpdo1
2049	2	Mapped object 2	606C0020h		1A00H DS301 mapping parameter for txpdo1
2049	3	Mapped object 3	60770010h		1A00H DS301 mapping parameter for txpdo1
2049	4	Mapped object 4	00000000h		1A00H DS301 mapping parameter for txpdo1
2049	5	Mapped object 5	00000000h		1A00H DS301 mapping parameter for txpdo1
2049	6	Mapped object 6	00000000h		1A00H DS301 mapping parameter for txpdo1
2049	7	Mapped object 7	00000000h		1A00H DS301 mapping parameter for txpdo1
2049	8	Mapped object 8	00000000h		1A00H DS301 mapping parameter for txpdo1

Zum Ändern der Einstellung zuerst „Number of mapped objects“ auf 00h stellen und die Änderung im Gerät speichern. Dann das neue Objekt eingeben, bestehend aus der vierstelligen Objekt Nummer, dem zweistelligen Index und der zweistelligen Angabe der Größe des Objekts im Hexadezimalsystem. Die Änderungen im Gerät speichern und zuletzt die „Number of mapped objects“ wieder auf die gewünschte Länge stellen.

