

**Name des herausgebenden Bewilligungsempfängers:
Heinzmann GmbH & Co. KG**

Sachtitel:

**Entwicklung und Untersuchung eines drehzahlvariablen
Dieselgenerators kleiner Leistung**

Abschlussbericht

**Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
Förderkennzeichen: 27126-24/0**

Autoren:

**Frank Böhler, Stefan Mußler, Richard Zahoransky
Fa. Heinzmann GmbH und Co. KG**

**Peter Dengler, Marcus Geimer
Karlsruher Institut für Technologie, Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen**

Karlsruhe und Schönau, den 31. Juli 2010

06/02

Projektkennblatt

der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	Referat	Fördersumme	
Antragstitel	Entwicklung und Untersuchung eines drehzahlvariablen Dieselgenerators kleiner Leistung		
Stichworte	Drehzahlvariabler elektrischer Generator, Variable Speed Generator, Schwungradgenerator		
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
7 Monate	10.12.2008	Verl. auf 31.07.2010	1
Endbericht	Spätestens 10.10.2009 Verlängert auf 31.07.10		
Bewilligungsempfänger	Heinzmann GmbH & Co. KG		Tel 07673-82080
	Am Haselbach 1		Fax 07673-8208194
	79677 Schönau		Projektleitung
			Prof. Dr. Richard Zahoransky
			Bearbeiter
			Dipl.-Ing.(FH) Frank Böhler
Kooperationspartner	Institut für Fahrzeugsystemtechnik Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen, Prof. Dr. Marcus Geimer Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Gotthard-Franz-Str. 8 76131 Karlsruhe		

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Kleine Leistungseinheiten, so genannte auxiliary power units (APU) erzeugen aus chemischer Energie durch Umwandlung zuerst mechanische (Verbrennungsmotor) und letztlich elektrische Energie (Generator). Der schlechte Wirkungsgrad ergibt sich aus der heute üblichen Regelung: Die Aggregate werden mit konstanter Drehzahl betrieben und besitzen daher insbesondere im Teillastbereich einen schlechtem Wirkungsgrad. Durch die Anpassung der Drehzahl des Verbrennungsmotors an die Kurve optimalen Verbrauchs kann der Gesamtwirkungsgrad des Systems deutlich gesteigert werden. Ziel dieses Projektes ist es, optimierte Komponenten einzusetzen und eine Regelung zu entwickeln, die abhängig von der benötigten Leistung die Drehzahl des Verbrennungsmotors an maximalen Wirkungsgrad anpasst.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Recherche: Auf Basis von Lastprofilen wird eine Auslegung der Einheiten durchgeführt. Lastprofile bilden das spezielle Know-How eines Maschinenherstellers. Durch intensive Recherchen sollen die für die Auslegung notwendigen Daten beschafft werden.

Simulationsunterstützung: Zur Unterstützung der Entwicklung sind Simulationen geplant, die als Basis für die Auslegung des Funktionsmusters dienen. Die vorab ermittelten Lastprofile sind Input für die Simulation. Neben einem Modell des Verbrennungs- und Elektromotors wird auch die Leistungs- und Steuerungselektronik zu berücksichtigen.

Auslegung der E-Maschine mit Programmsystem FLUX.

Herstellung des Generators: Permanenterregter Synchrongenerator; bürstenlos, elektronisch kommutiert, etwa 7 kW elektrische Leistung, Auslegung des Inverters.

Entwicklung der Software zur optimalen elektronischen Kommutierung

Zusammenbau des Synchrongenerators und des Verbrennungsmotors

Entwicklung der Software des Systemsteuergeräts zur Kennfeldsteuerung (optimale Dieseldrehzahl für jeden Lastpunkt), bzw. zur Vorsteuerung der Dieseldrehzahl vor Lastspitzen.

Aufbau des Demonstrationsaggregates, zusammen mit Dieselmotor-Hersteller Fa. Hatz

Funktionstests des Aggregates auf Prüfständen der Fa. Heinzmann und des Lehrstuhls für Mobile Arbeitsmaschinen; Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen als Basis für die Serienentwicklung

Auswertung und Dokumentation.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	2
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	4
Zusammenfassung	5
Einleitung	6
Hauptteil	8
AP 1: Lastprofile	8
AP 2: Simulationsunterstützung	10
AP 3: Verschaltungskonzept des Generators	13
Konzept	13
Systemsteuerung	15
Verwendete Hauptkomponenten	16
Dieselmotor	16
Generator	17
Motor-Inverter	17
Systemsteuerung	18
AP 4: Bau der Komponenten	18
Generator	18
Systemsteuergerät	19
Elektrik/Elektronik Schaltschrank	19
Elektrische Last-Schaltschrank	20
AP5: Vermessung der Komponenten	21
Aufbau Komponentenprüfstand	21
Vermessung des Generators	22
Vermessung des Inverters	25
Auswertung der Messdaten	26
AP 6: Steuerungsentwicklung	32
Steuerstrategien	32
AP 7: Vermessung des Gesamtsystems	34
Grundaufbau	34
Elektrische Last	36
Prüfstandsperipherie	37
Messtechnik	38
Ergebnisse	40
Fazit	45
Literaturverzeichnis	46
Anhang	47
Anhang 1: Simulationsmodell - Kennfeldinterpolation	47
Anhang 2: Simulationsmodell – Berechnung Kennlinie idealen Verbrauchs	54
Anhang 3: Simulationsmodell – Verbrauchsberechnung: Constant Speed ohne Start/Stopp	57
Anhang 4: Simulationsmodell – Verbrauchsberechnung: Constant Speed mit Start/Stopp	58
Anhang 5: Simulationsmodell – Verbrauchsberechnung: Variable Speed ohne Start/Stopp	60
Anhang 6: Simulationsmodell – Verbrauchsberechnung: Variable Speed mit Start/Stopp	62

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Verbrauchskennfeld eines Verbrennungsmotors	6
Abb. 2: Recherchierte Lastprofile für die Versuchsfahrten	9
Abb. 3: Kennlinien konstanter Leistung mit Linie idealen Verbrauchs	11
Abb. 4: Schematischer Aufbau des erstellten Simulationsmodells	12
Abb. 6: Dieselmotor-Maximalmoment in Abhängigkeit der Drehzahl	14
Abb. 8: Diesel-Digitalsteuergerät mit integriertem Aktuator DG3005.10	16
Abb. 9: HEINZMANN SL-EC160 22B Generator	17
Abb. 10: VSG Steuerung HEINZMANN Theseus DGM-02	18
Abb. 12: Elektrische Last-Schaltschrank	20
Abb. 14: 4-Kanal-Widerstand-Messgerät	22
Abb. 15: Schema der Widerstandsmessung am Beispiel U zu V	22
Abb. 19: Kippschalter für die Lastzugabe	25
Abb. 20: : Leistungsanzeige	25
Abb. 21: Wirkungsgradkennfeld des Generators (3D)	28
Abb. 22: Wirkungsgradkennfeld des Generators (Projektion auf eine Ebene)	29
Abb. 23: Wirkungsgradkennfeld des Inverter (3D)	29
Abb. 24: Wirkungsgradkennfeld des Inverter (Projektion auf eine Ebene)	30
Abb. 25: Gesamtwirkungsgrad (3D)	30
Abb. 26: Gesamtwirkungsgrad (Projektion auf eine Ebene)	31
Abb. 28: Skalierung und Interpolation der Profile	32
Abb. 29: Anpassung der VSG-Verfahrenlinie	33
Abb. 30: Stützstruktur zum Anflanschen der Motoren	35
Abb. 31: Anschluss der Lastwiderstände (Auszug aus den Schaltunterlagen)	36
Abb. 32: Elektrik zum Messen und Schalten der Lastwiderstände	37
Abb. 33: Gesamtaufbau des Prüfstands am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen	38
Abb. 34: Drehkraftverlauf eines Viertaktmotors [Spi07]	39
Abb. 35: Aufbau aus Diesel und Generator mit verbauter Sensorik	39
Abb. 36: Frontansicht Kraftstoffmessanlage	40
Abb. 37: Auftretende Unterschiede in der Spannung	41
Abb. 38: Vergleich von Simulation und Messung beim Drehmomentenverlauf	44
Abb. 39: Vergleich von Simulation und Messung beim Kraftstoffverbrauch	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: mögliche Schalterstellungen	25
Tabelle 2: Widerstand und Induktivität	26
Tabelle 3: Mit dem Oszilloskope gemessene Effektivwerte	26
Tabelle 4: Daten aus Kurzschlussmessung	27
Tabelle 5: Bestimmung der Eisenverluste	27
Tabelle 6: Darstellung des Kraftstoffverbrauchs aus Messung und Simulation	42
Tabelle 7: Darstellung des Kraftstoffverbrauchs aus Messung und Simulation	43

Zusammenfassung

Im Entwicklungsprojekt „VSG – Variable Speed Generator“ haben die Projektpartner Heinzmann GmbH und Co. KG und der Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) vom Karlsruher Institut für Technologie zusammen mit dem assoziierten Projektpartner Motorenfabrik HATZ GmbH & Co.KG ein System aus Dieselmotor und elektrischem Generator aufgebaut, das durch Drehzahlanpassungen kraftstoffsparend fahren kann.

Es wurden geeignete elektrische Komponenten ausgewählt und an einem Prüfstand vermessen. Des weiteren wurde ein Prüfstand aufgebaut, in dem ein Dieselmotor und die elektrischen Komponenten wie Generator und Umrichter verbaut wurden. Weiterhin wurde ein Simulationsmodell erstellt, das aufbauend auf Kennfeldern eine Verfahrenlinie optimalen Kraftstoffverbrauchs generieren kann und die Kraftstoffeinsparung für beliebige Lastprofile berechnen kann.

Unter Verwendung der im Simulationsmodell bestimmten Kurve optimalen Verbrauchs wurde der Kraftstoffverbrauch des Diesels gemessen und mit dem IST-Zustand mit konstanter Drehzahl verglichen.

Das Ergebnis zeigt ein hohes Kraftstoff-Einsparpotential von mindestens 30% bis über 40 % bei den untersuchten Lastprofilen. Dieses in dieser Deutlichkeit nicht vorhergesehene Ergebnis zeigt die hohen Potenziale zur Ressourcenschonung und entsprechender Reduzierung der Abgasemissionen auf. Zusätzlich führt ein Betrieb bei niedriger Drehzahl zu einem insgesamt ruhigeren Lauf und geringeren Geräuschemissionen.

Einleitung

Seit Jahrzehnten werden im industriellen Bereich kleine Dieselgeneratoren eingesetzt, um elektrische Energie im Bereich einiger kW zu erzeugen (Inselbetrieb ohne Speicher für die elektrische Energie: Baustellengeneratoren, Hilfsgeneratoren, sogenannte „Auxiliary Power Units“ in LKWs, usw.). Die Generatoren werden vom Anwender aufgrund der erforderlichen Spitzenleistung ausgesucht und sind daher für den jeweiligen Anwendungszweck zumeist überdimensioniert. Die meiste Zeit werden diese Generatoren im Teillastbetrieb betrieben.

Der schlechte Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors und auch der übrigen Komponenten ergibt sich aus der heute üblichen Regelung solcher Aggregate: Sie werden mit konstanter Drehzahl in der Motordrücke betrieben und besitzen daher insbesondere im Teillastbereich einen schlechten Wirkungsgrad. **Abb. 1** zeigt die Zusammenhänge am Verbrauchskennfeld eines Verbrennungsmotors: Die Linie optimalen Verbrauchs liegt im Teillastbereich bei niedrigen Drehzahlen. Mit einer Betriebskennlinie bei (nahezu) konstanter Drehzahl von beispielsweise 1.500 min^{-1} lässt sich nur in einem bestimmten Lastpunkt ein optimaler Wirkungsgrad erzielen. Die bisherige drehzahlstarre Technik hat im Nennlastbetrieb einen akzeptablen Wirkungsgrad. Jedoch sinkt der Wirkungsgrad im Teillastbereich auf sehr schlechte Werte.

Durch die Anpassung der Drehzahl des Verbrennungsmotors an die Kurve optimalen Verbrauchs kann der Kraftstoffverbrauch und damit der Gesamtwirkungsgrad des Systems deutlich gesteigert werden. Durch den Einsatz eines VSG (Variable Speed Generator) kann je nach aktuellem Leistungsbedarf die Drehzahl des Generators angepasst werden, um zu jedem Zeitpunkt den bestmöglichen Wirkungsgrad zu erhalten. Hierzu ist es notwendig, auf den Einsatz hin optimierte elektrische Komponenten einzusetzen und eine Regelung zu entwickeln, die abhängig von der benötigten Generator-Leistung die Drehzahl des Verbrennungsmotors anpasst.

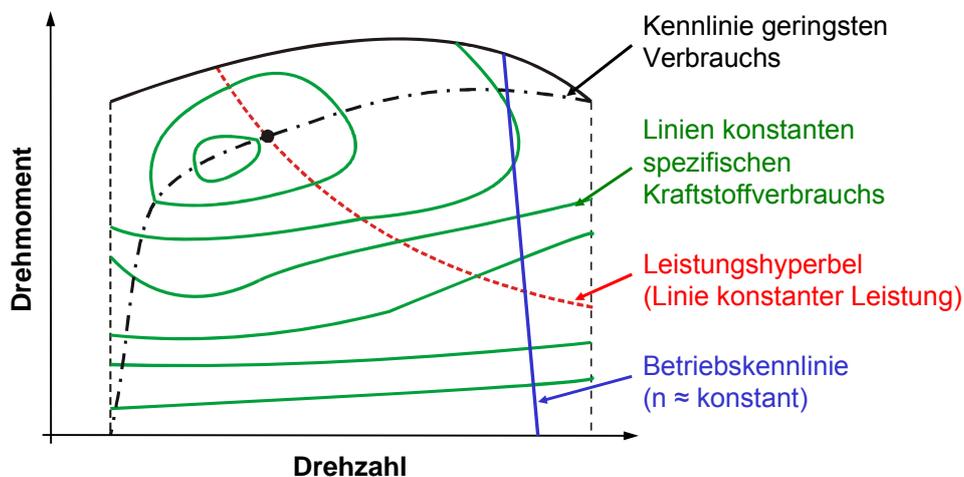


Abb. 1: Verbrauchskennfeld eines Verbrennungsmotors

Die Entwicklung, der Aufbau, der Betrieb und die Vermessung eines VSG mit all seinen notwendigen Regel- und Steuereinheiten war das Projektthema, das erfüllt werden konnte. Ein Demonstrator mit ca. 3 kW Nennleistung wurde im Rahmen des Projektes erfolgreich aufgebaut und vermessen.

Vorrangiges Ziel des Projekts war der Nachweis der Kraftstoffeinsparung des VSG im Vergleich zur bisherigen Generatorlösung. Die vorab abgeschätzten Kraftstoffeinsparungen (als primär erwartete Umweltrelevanz) konnten nicht nur nachgewiesen, sondern sogar deutlich übertroffen werden. Aufgrund dieser Daten lässt sich die Wirtschaftlichkeit des VSG für seinen Einsatz bei wechselnden Lastanforderungen nachweisen.

Darüber hinaus ließ sich die Reduktion der Lärmemission durch den VSG erfüllen. Dies wurde erreicht durch:

- ✓ Absenkung der Drehzahl im Teillastbetrieb,
- ✓ komplette Abschaltung des Diesels, wenn keine Leistung angefordert wird,
- ✓ kleinerer Dieselmotor.

Hauptteil

AP 1: Lastprofile

Die dem VSG zu Grunde liegende Projektidee basiert auf einen Generator, der spontane Leistungssprünge der Verbraucher durch eine Drehzahlانpassung realisieren kann und dadurch stets auf der Linie optimalen Verbrauchs arbeitet. Es wurden daher Lastprofile gesucht, die solche Lastsprünge aufweisen.

Für das Aufzeigen der Funktionstüchtigkeit des Systems bei plötzlichen Lastsprüngen wurde ein Profil gewählt, das bereits als Lastprofil für eine Veröffentlichung zum Thema VSG verwendet wurde [Mie00]. Bei diesem Profil handelt es sich um einen Messschrieb für den Leistungsbedarf eines Haushaltes über 24 h und beinhaltet zahlreiche, zum Teil heftige Lastsprünge, so dass es den eingangs erläuterten Kriterien genüge.

Weiterhin wurden standardisierte Lastprofile ausgesucht, wie Sie vom VDEW (Verband der Elektrizitätswirtschaft) herausgegeben werden, um Netzbetreibern die Ermittlung des Ausgleichsenergiebedarfs von Endkunden mit weniger als 100 000 kWh/a bzw. weniger als 50 kW Anschlussleistung zu ermöglichen. Bei diesen Profilen handelt es sich um eine näherungsweise Bestimmung des Leistungsbedarfs, die jedoch hinreichend genau ist, so dass sie von Anbietern, Netzbetreibern und Versorgungsunternehmen gleichermaßen anerkannt sind [Fue00]. Aus diesen Profilen wurden die für eine mögliche Anwendung des VSG relevanten Profile „Haushalt“ (H0), „Gewerbe allgemein“ (G0), „Gewerbe werktags 8-18 Uhr“ (G1), „Gewerbe mit starkem bis überwiegendem Verbrauch in den Abendstunden“ (G2) sowie „Landwirtschaftsbetriebe“ (L0) gewählt.

Ein wichtiges mögliches Anwendungsgebiet für den VSG ist der Einsatz als APU (Auxiliary Power Unit) in großen Transport-LkWs für die Stromversorgung des Fahrers nach Beendigung seiner Fahrt. Hierzu gibt es Veröffentlichungen [Las00], [Ste06], die ebenso auf diese Anwendung abzielen, jedoch unter Verwendung einer Brennstoffzelle.

Abb. 2 zeigt alle im Rahmen dieses Projektes verwendeten Lastprofile.

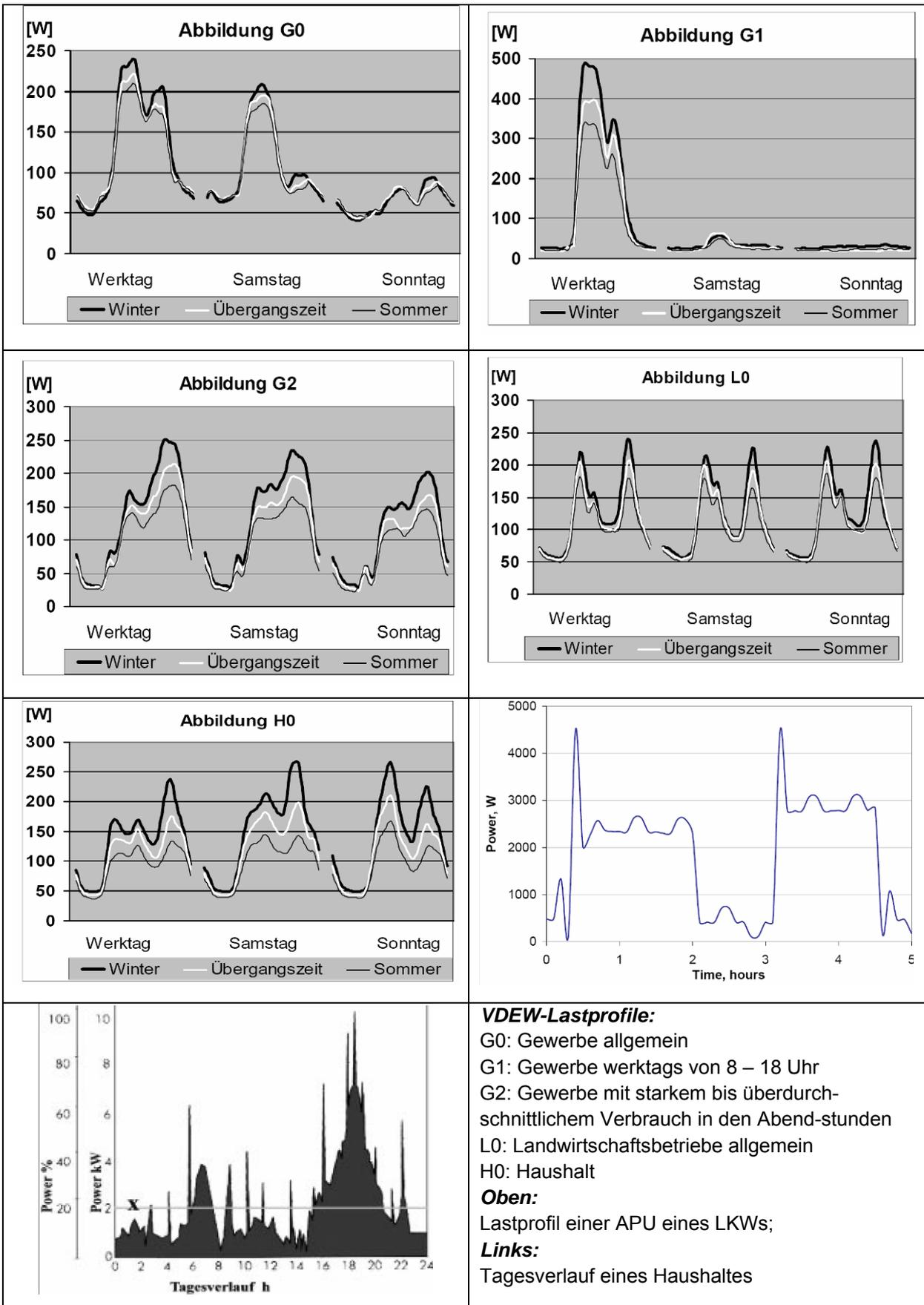


Abb. 2: Recherchierte Lastprofile für die Versuchsfahrten

AP 2: Simulationsunterstützung

Das Simulationsmodell sollte zwei Fragestellungen klären:

1. Wie kann der Verbrennungsmotor verbrauchsoptimal gefahren werden?
2. Wie hoch ist die Kraftstoffersparnis mit einem VSG im Vergleich zu einem herkömmlichen Generator bei gegebenem Zyklus?

Ausgehend von diesen beiden Fragestellungen ist ein statisches Kennfeld-Modell am ehesten geeignet, den Kraftstoffverbrauch zu bestimmen, da es in der Handhabung einfach ist und relativ geringe Rechenzeiten in Anspruch nimmt.

Für die Generierung der verbrauchsoptimalen Betriebspunkte müssen die Kennfelder sowohl für den Verbrennungsmotor als auch für den Generator/Umrichter bekannt sein. Vom Projektpartner Heinzmann sowie vom assoziierten Projektpartner Hatz wurden entsprechende Kennfelder zur Verfügung gestellt.

Als Simulationsprogramm wurde das Programm Matlab [®] gewählt, da dieses im Bereich der technisch-wissenschaftlichen Simulation weit verbreitet ist und für numerische Optimierungsaufgaben wie die Berechnung der optimalen Betriebspunkte geeignet ist.

In einem ersten Schritt wurden die Kennfelder für den Dieselmotor (Angaben spez. Kraftstoffverbrauch über Drehmoment und Drehzahl) und das Kennfeld aus Generator und Umrichter (Angaben Wirkungsgrad über Drehmoment und Drehzahl) tabellarisch in ein von Matlab lesbares Format übertragen (in diesem Fall: MS Excel).

Matlab verfügt über Interpolations-Tools, welche in der Lage sind, aus den gegebenen Punkten Wirkungsgrade für beliebige Betriebszustände zu generieren. Dadurch wurden dreidimensionale Felder erstellt, welche den Wirkungsgrad des Diesels bzw. des Generators/Umrichters graphisch darstellen. Für die Bestimmung des Wirkungsgrades des Verbrennungsmotors wurde der Brennwert von Dieselmotorkraftstoff von 45,4 MJ/kg hinzugezogen.

Die Angaben zum Drehmoment und zur Drehzahl sind im Diesel-Kennfeld Werte, die an der Ausgangswelle gemessen wurden. Im Kennfeld Generator/Umrichter jedoch sind die genannten Größen Eingangswerte (Ausgangsgröße ist die elektrische Leistung). Dadurch können beide Kennfelder direkt miteinander multipliziert werden und es entsteht ein Gesamtkennfeld des Systems.

In einem nächsten Schritt wurden Stufen konstanter Leistung definiert. Als Abstufung wurden die selben Leistungsstufen verwendet wie auch am Prüfstand, um die optimale Kennlinie auf den Prüfstand anpassen zu können. Um die zur geforderten Leistung zugehörige Drehzahl im verbrauchsoptimalen Betrieb zu erhalten, wurden die Leistungsstufen als Parabeln in das Kennfeld gelegt. Dabei geht der Algorithmus schrittweise vor, um für jede Drehzahl das zugehörige Drehmoment zu berechnen.

Hierzu unterteilt der Algorithmus zunächst den Drehzahlbereich (x-Achse) entsprechend der Schrittweite in viele Teilschritte. Bei jedem Schritt wird der

Drehmomentbereich (y-Achse) ebenfalls in viele Teilschritte unterteilt. Das Programm berechnet nun iterativ für jeden Drehmoment-Schritt die an der gegebenen Drehzahl erzeugte mechanische Leistung und vergleicht diese unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades aus Generator und Umrichter mit der gegebenen Leistungsstufe. Stimmt diese überein, wird das entsprechende Drehmoment mit der Drehzahl und dem zugehörigen Wirkungsgrad in einem Vektor gespeichert. Beim Durchlauf durch alle Drehzahl-, Drehmoment- und Leistungsstufen ergeben sich dadurch die charakteristischen Parabeln konstanter (elektrischer) Leistung, die aufgrund des Wirkungsgrades aus Generator/Umrichter verzerrt sind.

Für die Berechnung der Verbrauchskurve optimalen Verbrauchs wird aus den Vektoren, in denen die Wirkungsgrade für die Leistungsstufen hinterlegt sind, der Maximalwert bestimmt und zusätzlich mit der dazugehörigen Drehzahl und dem dazugehörigen Drehmoment in einem neuen Vektor gespeichert. Dieser Vektor enthält somit die Drehzahlen für einen verbrauchsoptimalen Betrieb des VSG für die gegebenen Leistungsstufen.

Damit kann graphisch veranschaulicht werden, in welchem Bereich im Motorkennfeld sich das System befinden wird. Die zunehmend hohen Wirkungsgrade des Generator/Umrichters für höhere Eingangsmomente erfordern somit ein sehr rasches Ansteigen des Drehmomentes bis hin zur Vollastlinie. Ausgehend von der gewählten Leerlaufdrehzahl von 1500 min^{-1} bewegt sich das System zu höheren Leistungen entlang dieser Vollastlinie bis hin zum Eckpunkt bei maximaler Drehzahl (**Abb. 3**).

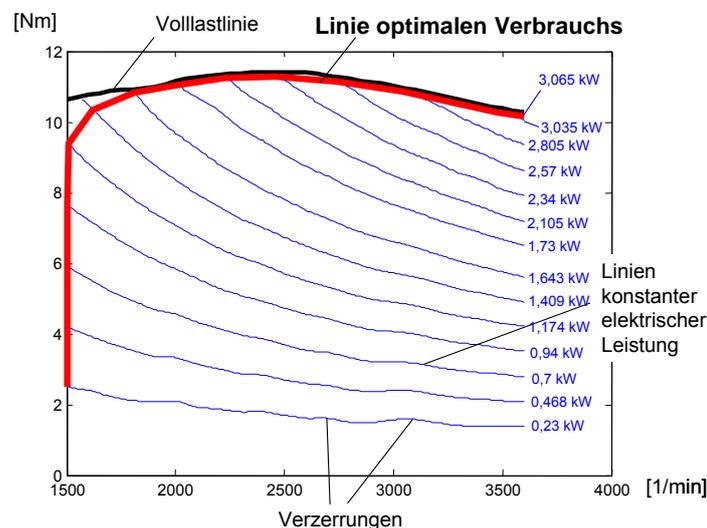


Abb. 3: Kennlinien konstanter Leistung mit Linie idealen Verbrauchs

Für die Berechnung der Werte, die sich zwischen diesen Stützpunkten befinden, wird eine lineare Interpolation verwendet. Je nach Größe der Abstufungen bei der Wahl der Leistungsstufen zu Beginn der Rechnung wird mit diesem Verfahren eine ausreichend hohe Genauigkeit erreicht.

Mit der so erhaltenen Kurve kann nun ein beliebiges Profil in das Programm eingelesen und zu jedem Zeitpunkt die Drehzahl und das Drehmoment berechnet werden. Diese Größen werden in das Dieselkennfeld eingelesen, welches einen entsprechenden spezifischen Kraftstoffverbrauch ausgibt. Zusammen mit der mechanischen Leistung und der Kraftstoffdichte kann somit der Momentan- und schließlich auch der Gesamtverbrauch berechnet werden.

Abb. 4 beschreibt noch mal das erzeugte Simulationsmodell und fasst die einzelnen Schritte zur Bestimmung der Kennlinie optimalen Verbrauchs und des Kraftstoffverbrauchs zusammen.

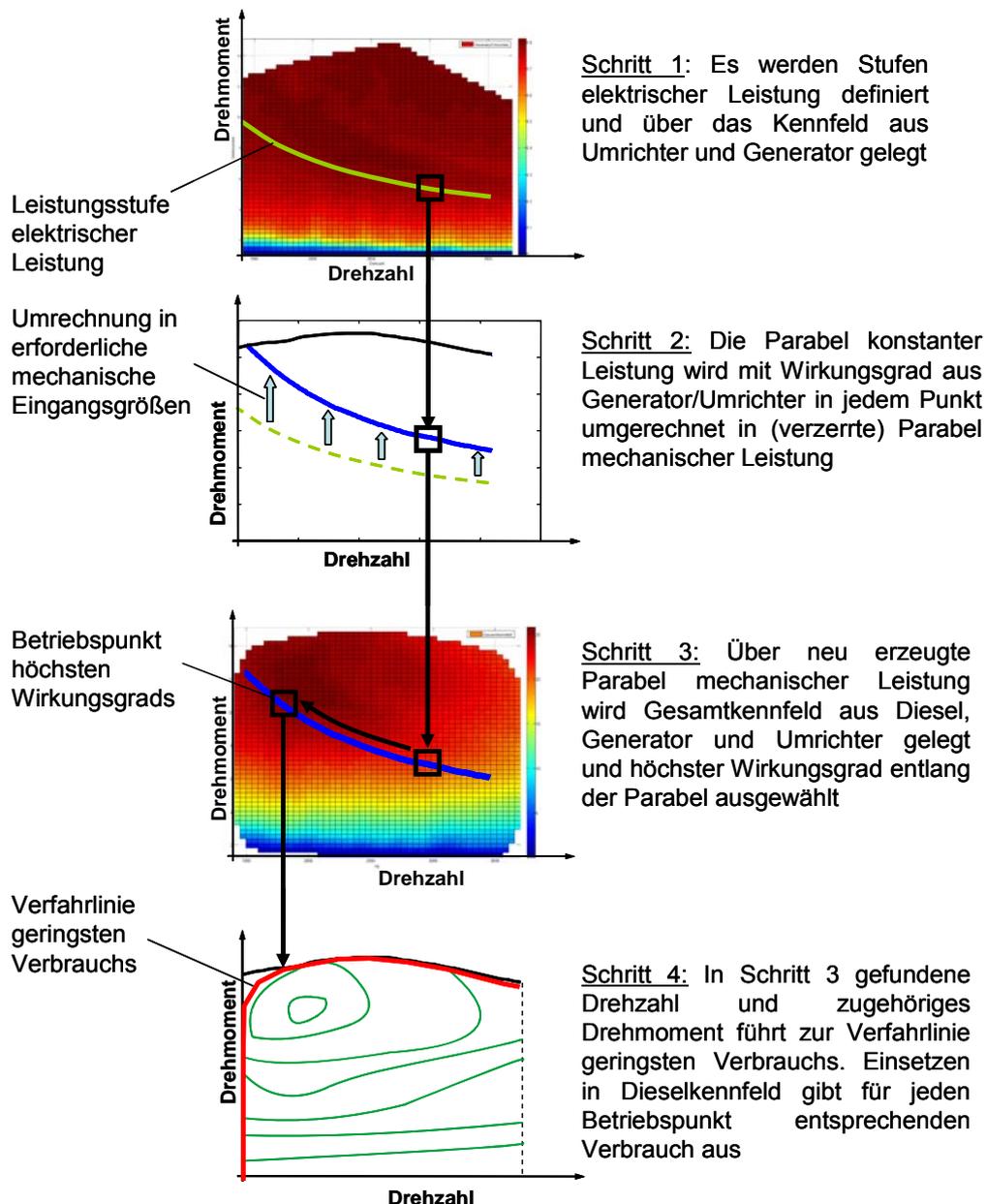


Abb. 4: Schematischer Aufbau des erstellten Simulationsmodells

AP 3: Verschaltungskonzept des Generators

Konzept

Das vor Projektstart aufgestellte Konzept (siehe **Abb. 5**) musste im Projektverlauf verändert werden. Grund hierfür war, dass im Markt kein Motor-Inverter gefunden werden konnte, der die Batterieladefunktion übernimmt bzw. eine konstante Ausgangsspannung liefert. Eine Eigenentwicklung im Rahmen dieses Förderprojekts wäre zu zeit- und kostenaufwändig. Daher musste im Projekt auf die Batterie verzichtet werden.

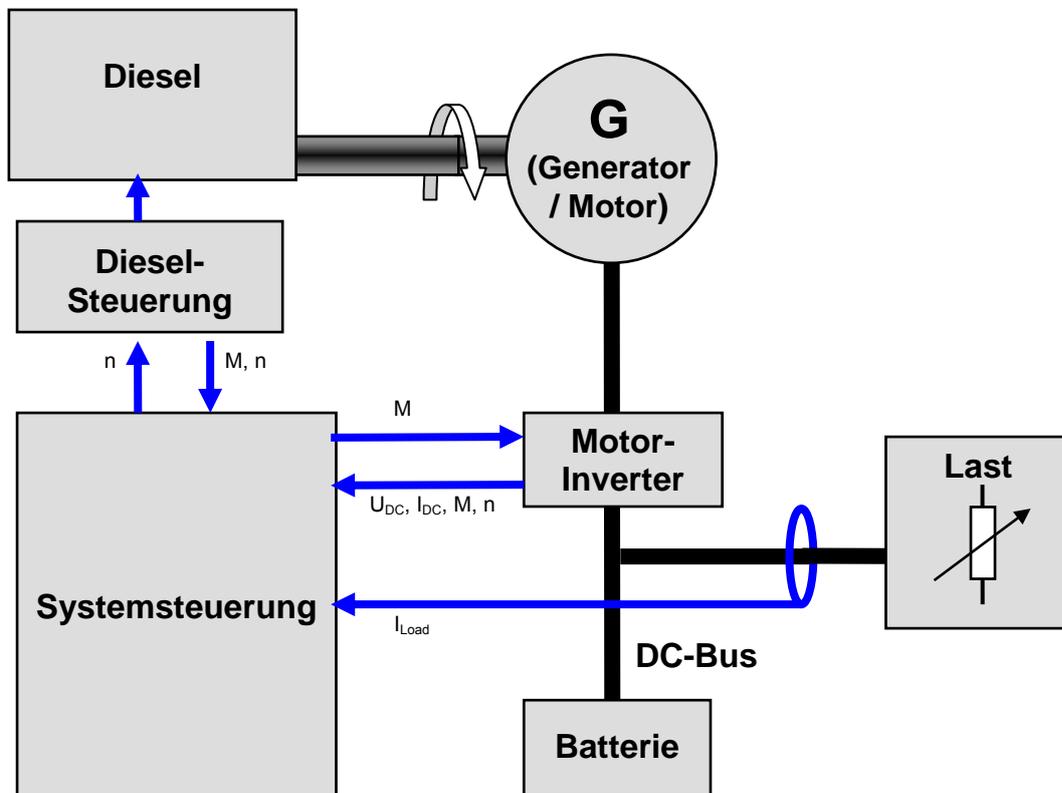


Abb. 5: Konzept VSG

Der Verzicht auf die Pufferbatterie führt nun zu folgendem Problem: Das Prinzip der Kraftstoffeinsparung beim VSG besagt, dass bei geringer Last die Drehzahl des Diesels reduziert wird, bis der Diesel im verbrauchsoptimalen Betriebspunkt arbeitet. Dieser Arbeitspunkt ist dieselmotor-typisch bei annähernd maximalem Dieseldrehmoment bei dieser reduzierten Drehzahl.

Der Diesel kann bei geringer Drehzahl nur eine geringe Spitzenleistung abgeben, da die Leistung proportional der Drehzahl ist (siehe **Abb. 6**). Unvorhergesehene Lastspitzen bei niedriger Drehzahl würden dazu führen, dass der Diesel vom

Generator gestoppt („abgewürgt“) wird, da diese Lastspitzen nicht vom Diesel bedient werden können und jetzt auch nicht durch eine Batterie gepuffert werden können.

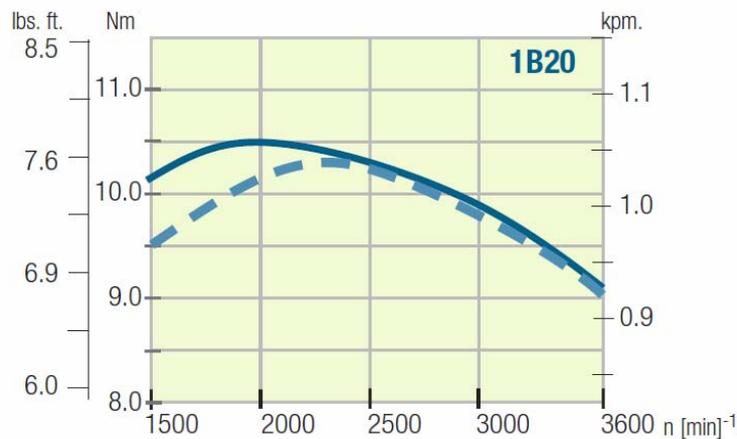


Abb. 6: Dieselmotor-Maximalmoment in Abhängigkeit der Drehzahl

Um dieses Problem in der Untersuchung zu umgehen, wurde in Rücksprache mit dem Förderträger entschieden:

Das Lastprofil ist in der Systemsteuerung hinterlegt. Unmittelbar vor Änderung der Last (Lastsprung) passt die Systemsteuerung die Dieseldrehzahl entsprechend dem Punkt des geringsten Verbrauchs an. Siehe Aufbau in **Abb. 7**.

Bezogen auf die Realität wäre dies z.B. die Konstellation eines dieselelektrisch angetriebenen Fahrzeugs. Der Fahrer teilt über die Gaspedalstellung der Systemsteuerung einen Lastsprung (Beschleunigung) mit. Die Systemsteuerung berechnet einen Lastbedarf und wählt eine dem Lastbedarf entsprechende Dieseldrehzahl. Wenn diese Dieseldrehzahl erreicht worden ist, wird dem Traktionsumrichter die Anweisung zur Beschleunigung übermittelt.

Der realisierte Aufbau aus Abb. 7 hat weiterhin den Vorteil, dass der VSG mit einer Ausgangsspannung von $3 \times 400 \text{ V}$ mit 50 Hz der in Mitteleuropa üblichen Spannung des Niederspannungsnetzes entspricht.

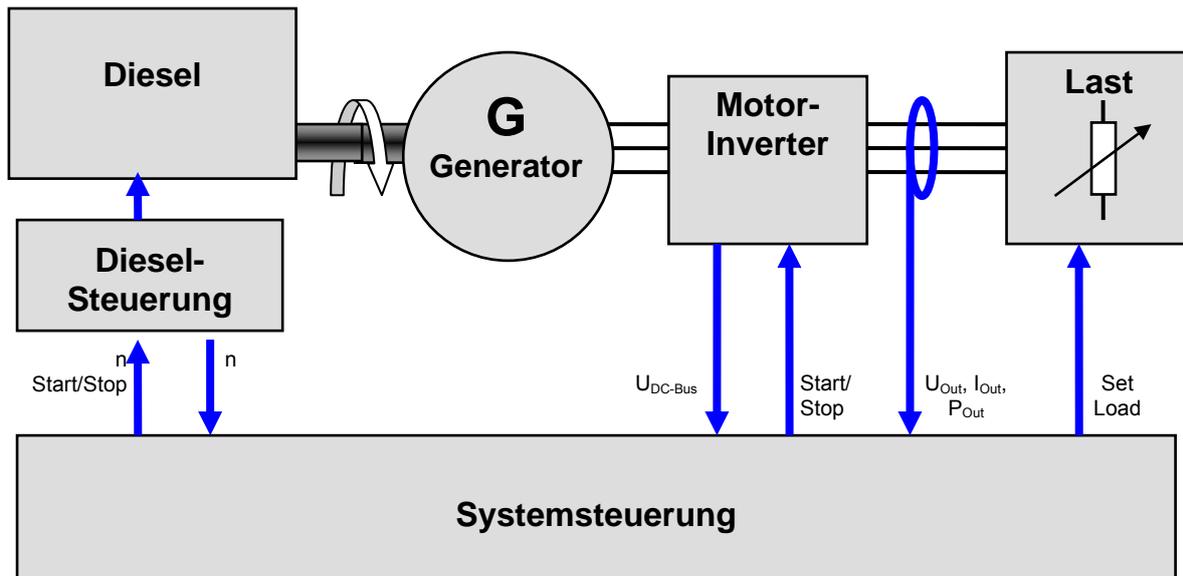


Abb. 7: Realisierter Aufbau

Systemsteuerung

Zentrale Steuerung ist das Systemsteuergerät. Dieses steuert nicht nur den VSG, sondern auch den gesamten Prüfablauf.

Die Aufgaben der Systemsteuerung sind:

- Ansteuerung der Last: Je nach hinterlegtem Lastprofil wird die Last entsprechend eingestellt, durch Hinzuschalten bzw. Abschalten von Widerständen.
- Stellung der Dieseldrehzahl und Überwachung der tatsächlichen Drehzahl: Hierfür kommuniziert die Systemsteuerung mit einem integrierten HEINZMANN Dieselsteuergerät mit Aktuator. Die Dieseldrehzahl wird entsprechend der angeforderten Leistung mittels einer hinterlegten Kennlinie bestimmt (**siehe AP6**).
- Starten und Stoppen des Dieselmotors: Im Betriebsmodus „Start-Stopp“ stoppt die Systemsteuerung den Diesel wenn keine Leistung gefordert wird, bzw. startet den Dieselmotor bei Lastzuschaltung.
- Messung der Ausgangsleistung: Die 3-phasige konstante Ausgangsspannung und der Ausgangsstrom des VSG-Systems werden gemessen. Aus dem Produkt wird Wirk-, Schein- und Blindleistung, sowie der Leistungsfaktor ermittelt.
- Ansteuerung des Motor-Inverters: Der Motor-(Generator) Inverter wird angesteuert und die Status- bzw. Fehlermeldungen verarbeitet.

Verwendete Hauptkomponenten

Die Auswahl der Systemgröße wurde dadurch bestimmt, dass einerseits das System klein gewählt werden sollte, um den Aufwand für System- und Messaufbau unter Kontrolle zu halten, andererseits musste das System aussagekräftig sein.

Hierdurch wurde eine Systemgröße von 3 kW gewählt. Sowohl die Größe beim Dieselmotor, Generator, Motorinverter, Filterung und Last schienen ein guter Kompromiss zu sein.

Dieselmotor

Hersteller: HATZ GmbH & Co. KG (Assoziierter Projektpartner)
Typ: 1B20
Leistung: 3,1 kW @ 3600 rpm (ISO Standardleistung)
Drehzahlband: 1500 – 3600 rpm
Regelung: HEINZMANN **DG3005.10** Digitalsteuergerät mit integriertem Aktuator.

Grund für die Auswahl dieses Dieselmotors war unter anderem die digitale Regelbarkeit über das HEINZMANN DG3005.10 Digitalsteuergerät (**Abb. 8**).



Abb. 8: Diesel-Digitalsteuergerät mit integriertem Aktuator HEINZMANN DG3005.10

Generator

Hersteller:	HEINZMANN
Typ:	SL-EC160 22B (Scheibenläufergenerator)
Leistung:	4,5 kVA @ 3500 rpm
Spannung:	3x 360VAC @ 3500 rpm & Nennlast

Die Wicklung wurde entsprechend ausgelegt, dass bei 1500 rpm der Generator unter Last noch 150 VAC liefert. Dies ist nötig, damit der nachgeschaltete Motor-Inverter eine stabile Spannung vom 100 VAC, 50 Hz erzeugen kann.



Abb. 9: HEINZMANN SL-EC160 22B Generator

Motor-Inverter

Durch Zuarbeit der Firma LTi konnte ein Motor-Inverter mit Sondersoftware bezogen werden. Dieser Inverter wird mit seinem Eingang an den Generatorausgang angeschlossen. Über einen ungesteuerten Eingangsgleichrichter wird intern im Inverter die 3-phasige Generatorspannung in eine Gleichspannung (Zwischenkreisspannung) umgesetzt. Aus dieser Gleichspannung generiert der Inverter eine 3-phasige konstante Ausgangsspannung mit 100 V und 50 Hz. Über einen nachfolgenden Transformator wird die Ausgangsspannung auf 400 VAC hochgesetzt. Der Inverter wird somit als Netz-Wechselrichter betrieben.

Hersteller:	LTi
Typ:	ServoOne BG4 – SO84.032,W
Software:	Sonderausführung
Eingangsspannung:	3 Phasen 150...500 VAC
Ausgangsspannung:	3 Phasen 100 VAC, 50 Hz
Ausgangsstrom:	32 Arms

Systemsteuerung

Hersteller:	HEINZMANN
Typ:	Theseus DGM-02 Medium
Software:	Sonderausführung
Spannungsmessung:	2x 3 Phasen 240..480 VAC
Strommessung:	3 Phasen 0..5 Arms
Eingänge:	12 digital, 7 analog
Ausgänge:	12 digital, 5 analog
Schnittstellen:	2x CAN, HZM RS232

Die aus dem Bereich „HEINZMANN Generatormanagement“ stammende Steuerung „Theseus“ passt sehr gut für das VSG-Projekt, da neben den zahlreichen Ein- und Ausgänge vor allem die 3 phasige Strom-/ Spannungsmessung und die damit zusammenhängende interne Wirk-/Schein- und Blindleistungsberechnung von Vorteil ist.

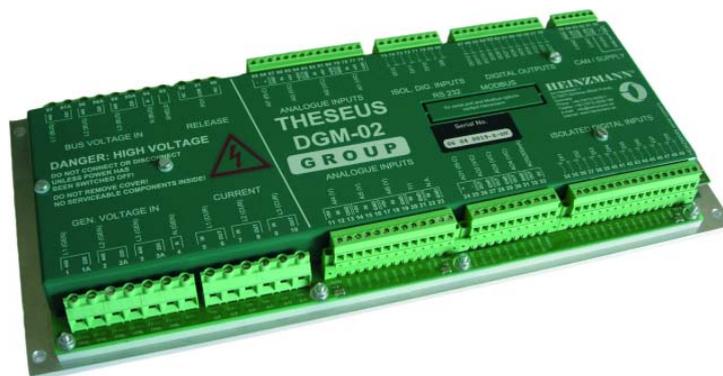


Abb. 10: VSG Steuerung HEINZMANN Theseus DGM-02

AP 4: Bau der Komponenten

Generator

Beim Generator handelt es sich um einen bürstenlosen, permanentenerregten Scheibenläufer-Synchrongenerator vom Typ SL-EC160 22B von HEINZMANN.

Der Generator konnte in einer Standardausführung gebaut werden. Die mechanische Anbindung des Generators mit der Drehmoment-Messwelle zwischen Generator und Dieselmotor wurde entsprechend konstruiert.

Systemsteuergerät

Das HEINZMANN Steuergerät „Theseus“ aus dem Bereich „Generatormanagement“ konnte in einer Standard Hardwareausführung verwendet werden. Seitens der Software mussten die speziellen Funktionen und Anforderungen dieses Projekts erstellt werden.

Hinsichtlich der Leistungsmessung, der Softwarefunktionalität der zu hinterlegenden Kurven für optimalen Wirkungsgrad bzw. die Lastprofile sowie bei der Bedienung des Systems über das HEINZMANN Software Tool „DcDesk2000“ für Windows PCs, konnte auf HZM-interne Software und Softwaremodule zurückgegriffen werden.

Elektrik/Elektronik Schaltschrank

Die Elektrik/Elektronik bestehend aus

- Motorinverter
- Systemsteuerung
- Transformator
- Filter und Drossel

wurde in einem Schaltschrank eingebaut (siehe **Abb. 11**)

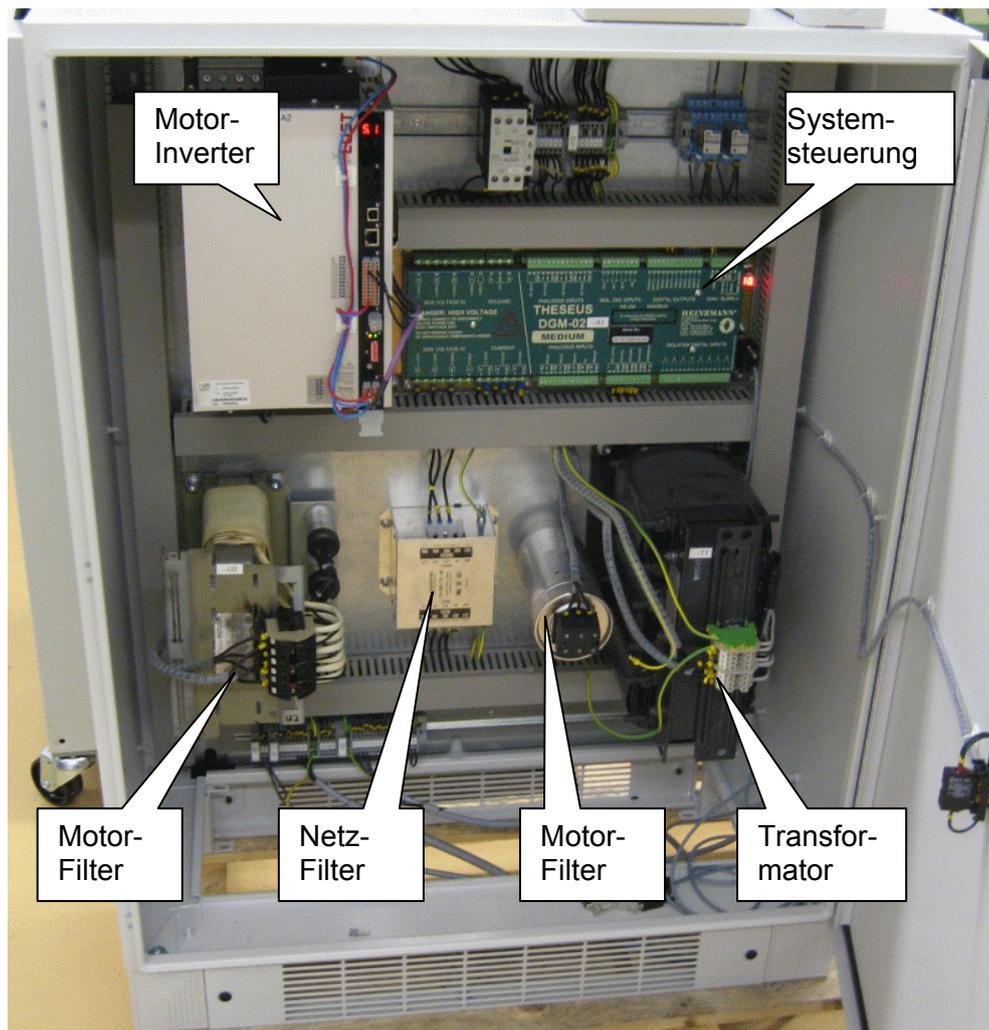


Abb. 11: Aufbau System-Schaltschrank

Elektrische Last-Schaltschrank

Die Last, die zugehörigen Schütze und ein zusätzliches 3-Phasen Leistungsmessgerät wurden in einem zweiten Schaltschrank zusammengefasst (siehe **Abb. 12**). Die Ansteuerung der Last-Schütze erfolgt über das Systemsteuergerät „Theseus“.

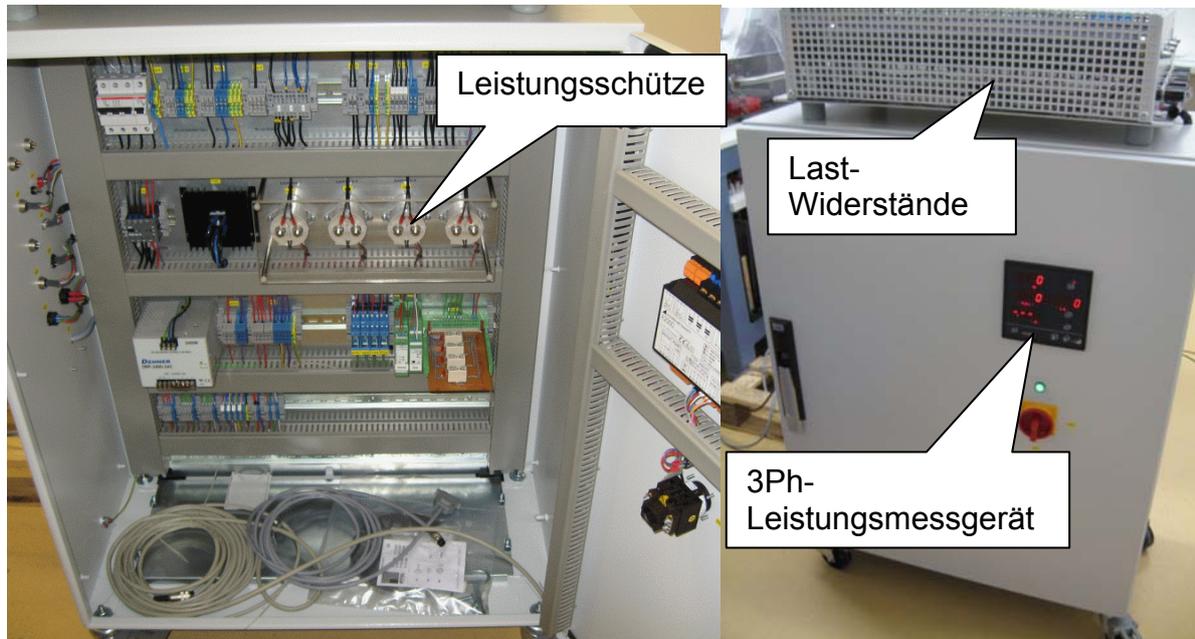


Abb. 12: Elektrische Last-Schaltschrank

Die Lastbank besteht aus 4 Widerständen, die über die 3 Phasen der VSG Ausgangsspannung verteilt sind (**siehe auch AP7**):

Name	Widerstand	Leistung	Phase
R1	85	1880 W	L1-L2
R2	170	940 W	L2-L3
R3	340	470 W	L3-L1
R4	680	235 W	L3-L1
Gesamt		3525 W	

Mit einer Auflösung von 235 W kann der Leistungsbereich von 0 bis 3525 W abgedeckt werden. Die unsymmetrische Lastaufteilung auf die Phasen ist möglich, da der Wechselrichter (Motor-Inverter) entsprechend überdimensioniert ist, zum anderen stellt dieser Betrieb eher die Realität dar. Hier muss die Last ebenfalls nicht zu gleichen Teilen auf die 3 Phasen aufgeteilt sein.

AP5: Vermessung der Komponenten

In diesem Abschnitt werden der Aufbau der Komponenten und die Vermessung des Generators und des Inverters am E-Prüfstand beschrieben.

Aufbau Komponentenprüfstand

Der Prüfstand besteht aus einem Prüftisch und einem Prüfschrank in dem ein Leistungsmessgerät (LMG), ein PC und die Regelelektronik der Belastungsmaschine untergebracht sind (**Abb. 13**).

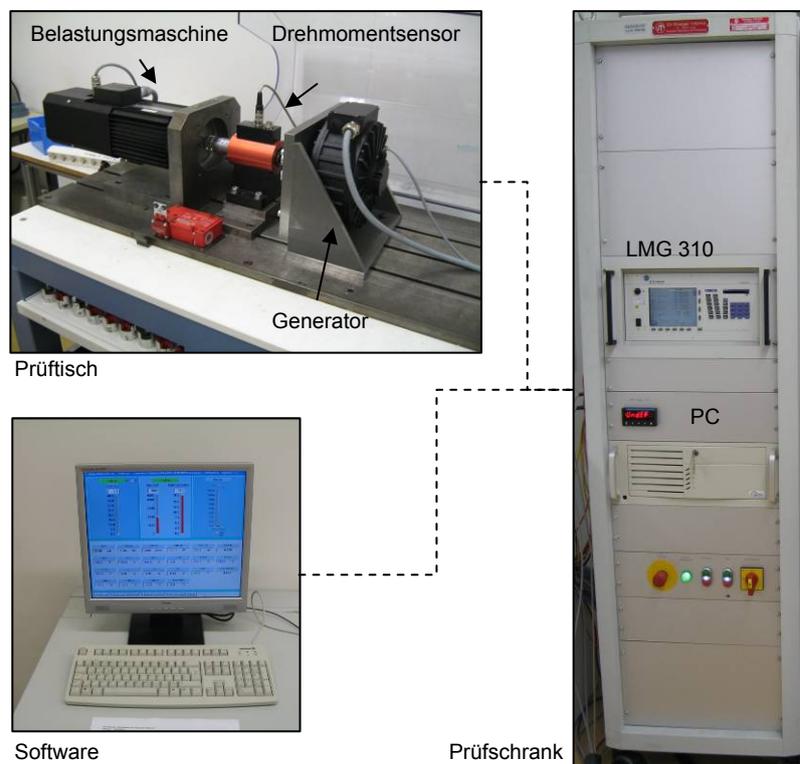


Abb. 13: Darstellung der Prüfstandkomponenten

Komponenten:

- LMG 310: ZES ZIMMER Electric Systems GmbH; 3-Phasen-Präzisions-Leistungsmessgerät
- Drehmomentsensor: Dr. Staiger Mohilo GmbH; Typ 260DM100H L; 10Nm und 100Nm
- Belastungsmaschine: AMK Arnold Müller GmbH & Co. KG; Asynchron Servomotor ($n = 3000 \text{ 1/min}$; $M = 18\text{Nm}$; $P = 5,7\text{kW}$; $n_{\text{max}} = 14000 \text{ 1/min}$)

Der Prüfstand wurde von Dr. Staiger Mohilo GmbH konzipiert und geliefert. Über die mitgelieferte Software lassen sich die Belastungsmaschine ansteuern und die anfallenden Messdaten anzeigen, graphisch darstellen und speichern.

Vermessung des Generators

Der Generator ist ein Scheibenläufer mit der Bezeichnung SL-EC 160-22B. Bevor dieser zusammen mit dem Inverter getestet wurde, wurde der Generator separat untersucht.

Widerstandsmessung

Zur Messung des Widerstands kam ein 4-Kanal-Widerstand-Messgerät (**Abb. 14**) zwischen je zwei Phasen (**Abb. 15**) zum Einsatz.



Abb. 14: 4-Kanal-Widerstand-Messgerät

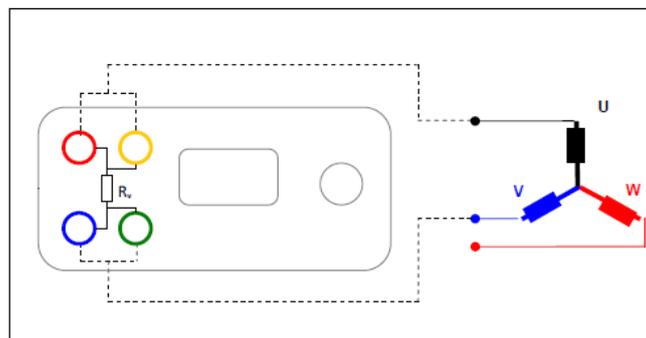


Abb. 15: Schema der Widerstandsmessung am Beispiel U zu V

Induktivitätsmessung

Nach dem gleichen Prinzip der Widerstandmessung wurde die Induktivität der Wicklungen mittels eines LCR-Messgerät gemessen (**Abb. 16**).

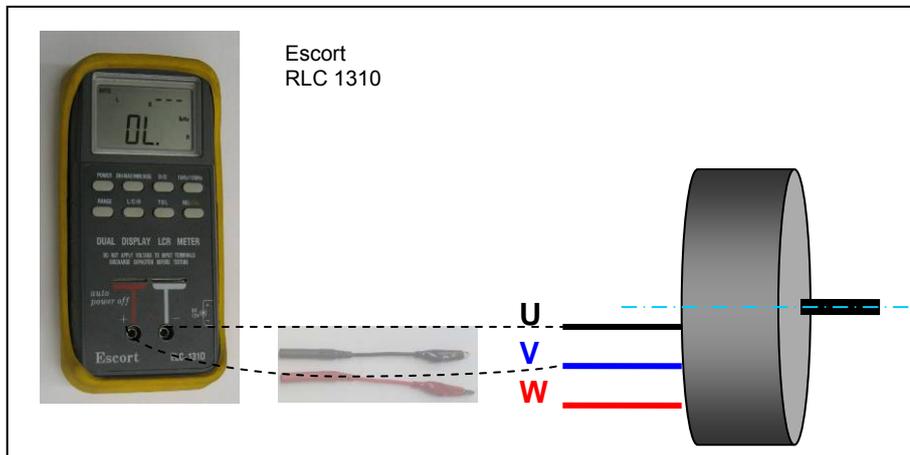


Abb. 16: Schema der Induktivitätsmessung am Beispiel U zu V

Spannungskonstante (K_e) Messung

Für diese Messung wurde der Generator auf dem Prüftisch befestigt und mit der Belastungsmaschine mit 1000 Umdrehungen pro Minute angetrieben. Währenddessen wurde die Spannung zwischen den Motorphasen mit einem Oszilloskop betrachtet und aufgezeichnet (**Abb. 17** und **Abb. 18**), durchgeführt in beiden Drehrichtungen.

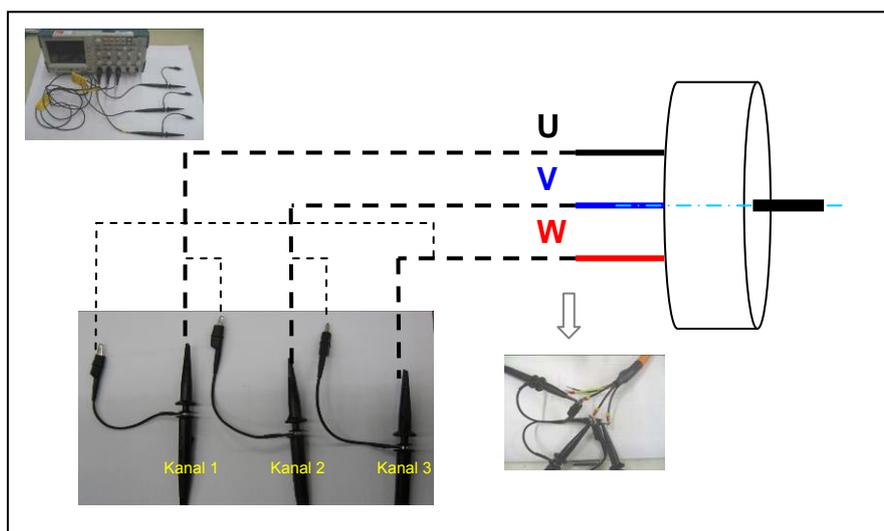


Abb. 17: Anschlussschema der Oszilloskopkanäle an den Motorphasen

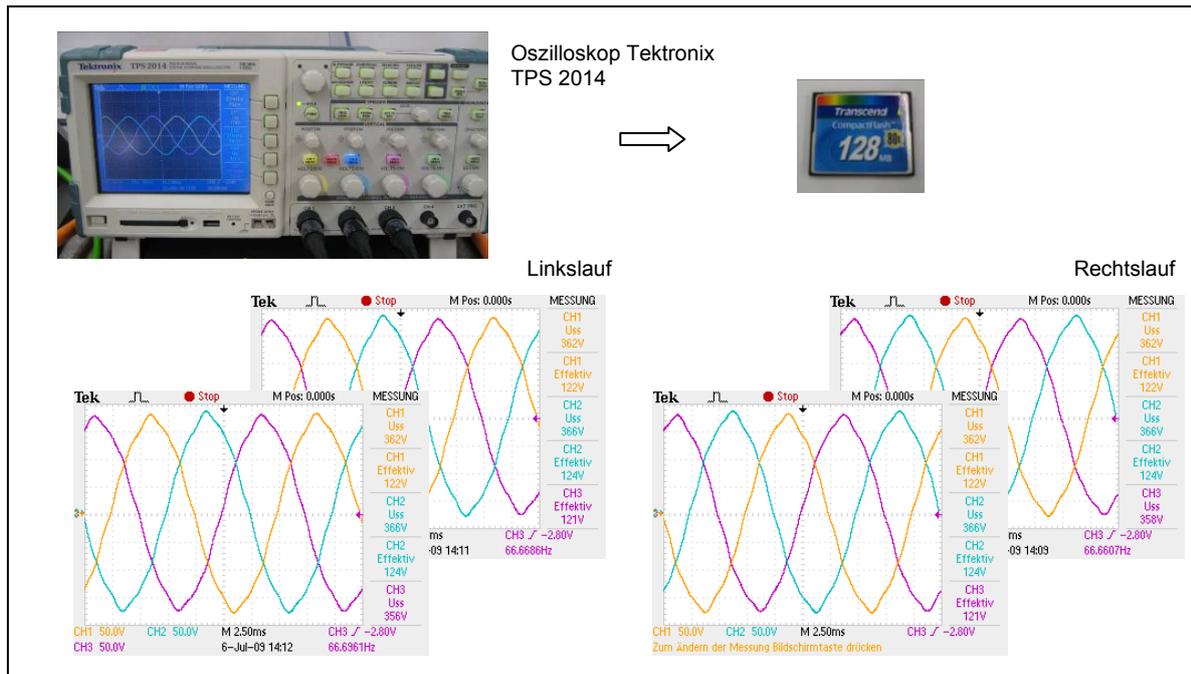


Abb. 18: Aufzeichnungen mit dem Oszilloskop

Die Effektivspannung bei 1000 U/min entspricht dem Ke-Wert (Spannungskonstante).

K_T-Messung

Für die Ermittlung des K_T-Wertes wurden die Motorphasen kurzgeschlossen und der Generator nun mit kleiner Drehzahl angetrieben (10 U/min) bei paralleler Erfassung des Stromes in einer Phase und des Drehmoments. In 10 U/min Schritten wurde die Drehzahl erhöht bis der Nennstrom leicht überschritten wurde. K_T lässt sich nun für beide Drehrichtungen nach **Formel 1** ermitteln.

Formel 1: K_T

$$K_T = \frac{M}{I}$$

M = Drehmoment in Nm

I = Strom in A

1.1.1. Generator Betrieb

Zur Bestimmung der Eisenverluste wurde der Generator mit offenen Motorphasen angetrieben und das Drehmoment gemessen. **Formel 2** dient zur Berechnung der Verlustleistung (Eisenverluste).

Formel 2: Eisenverluste P_{Vfe}

$$P_{Vfe} = \frac{2\pi \cdot n \cdot M}{60}$$

n = Drehzahl in 1/min

Vermessung des Inverters

Der Inverter ist von LTi DRIVES GmbH vom Typ ServoOne 84.032,W. Dieser wurde mit dem Generator verbunden, der wiederum mit der Belastungsmaschine am Prüfstand angetrieben. Über vier Kippschalter (**Abb. 19**) konnte eine Last stufenweise zugeschaltet werden. Die anfallende Energie wandelte sich über Leistungswiderstände in Wärmeenergie um. Dabei wurde die anfallende Leistung zu einem mit den eingebauten Messinstrumenten (**Abb. 20**), zum anderen mit dem LMG am Prüfstand gemessen und festgehalten. Die Messungen wurden in 200 U/min Schritten zwischen 1600 U/min und 4000 U/min wiederholt.



Abb. 19: Kippschalter für die Lastzugabe



Abb. 20: : Leistungsanzeige

Je nach Schalterstellung ergab sich folgendes Lastschema (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: mögliche Schalterstellungen

Schalterstellung			
P	1/2 P	1/4 P	1/8 P
0	0	0	0
0	0	0	1
0	0	1	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	0	1
0	1	1	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	0	1
1	1	1	0
1	1	1	1

Aus den gemessenen Leistungen können die Wirkungsgrade umgerechnet werden (**Formel 3, Formel 4 und Formel 5**).

Formel 3: Wirkungsgrad Generator

$$\eta_{Generator} = \frac{P_{elektrisch}}{P_{mechanisch}} \quad P_{elektrisch} = \text{elektrische Leistung}$$

$$P_{mechanisch} = \text{mechanische Leistung}$$

Formel 4: Wirkungsgrad Inverter

$$\eta_{Inverter} = \frac{P_{Last}}{P_{elektrisch}} \quad P_{Last} = \text{Leistung der Last}$$

Formel 5: Gesamtwirkungsgrad

$$\eta_{Gesamt} = \eta_{Generator} \cdot \eta_{Inverter}$$

Auswertung der Messdaten

Es folgen die resultierenden Messergebnisse:

Daten der Vermessung des Generators

Tabelle 2: Widerstand und Induktivität

	Widerstand in Ohm	Induktivität in mH
U-V	1,563	7,39
V-W	1,562	7,39
U-W	1,559	7,48
Mittelwert	1,561	7,42

Tabelle 3: Mit dem Oszilloskop gemessene Effektivwerte

	Effektivwert			Drehrichtung
	U-V	V-W	U-W	
kE V/1000 min ⁻¹	122	124	121	Links
	122	124	121	Rechts
Mittelwert kE V/1000 min⁻¹	122,3			
K_T (Nm/A)	2,02			

Tabelle 4: Daten aus Kurzschlussmessung

Drehzahl (U/min)	Drehrichtung				<i>Mittelwert (Nm/A)</i>
	Links		Rechts		
	Strom (A)	Drehmoment (Nm)	Strom (A)	Drehmoment (Nm)	
10	0,8	2,12	0,6	1,81	<i>2,83</i>
20	1,1	3,85	1,6	3,42	<i>2,82</i>
30	2,6	5,59	2,5	5,08	<i>2,09</i>
40	3,2	7,23	3,3	6,74	<i>2,15</i>
50	4,3	8,92	4,1	8,36	<i>2,06</i>
60	5,1	10,41	4,9	9,91	<i>2,03</i>
70	5,9	11,92	5,7	11,41	<i>2,01</i>
80	6,6	13,36	6,2	12,81	<i>2,05</i>
90	7,3	14,63	7,2	14,22	<i>1,99</i>
100	8	15,91	7,9	15,51	<i>1,98</i>
<i>Mittelwert:</i>					<i>2,20</i>

Bei ca. 6 A entspricht der Mittelwert für K_T 2,0 Nm/A.

Tabelle 5: Bestimmung der Eisenverluste

Drehzahl (U/min)	Drehrichtung		<i>Mittelwert</i>
	Links	Rechts	<i>P_{VFE} in W</i>
	Drehmoment (Nm)		
100	0,39	0,05	<i>2</i>
200	0,3	0,01	<i>3</i>
500	0,36	0,05	<i>11</i>
700	0,39	0,08	<i>17</i>
1000	0,45	0,13	<i>30</i>
1500	0,5	0,18	<i>53</i>
2000	0,54	0,21	<i>79</i>
2500	0,59	0,22	<i>106</i>
3000	0,62	0,29	<i>143</i>

Auswertung der Messungen mit dem Inverter

Nach den beschriebenen Messungen ergeben sich folgende Wirkungsgradkennfelder. In **Abb. 21** und **Abb. 22** ist das Wirkungsgradkennfeld des Generators abgebildet. Wie man sieht, liegt der Wirkungsgrad in einem großen Bereich bei über 90%. **Abb. 23** und **Abb. 24** zeigen das Wirkungsgradkennfeld des Inverters, in zwei- und dreidimensionaler Darstellung. Der Wirkungsgrad liegt zwischen 80 und 90%. Der Gesamtwirkungsgrad ist in **Abb. 25** und **Abb. 26** abgebildet. Er liegt bei 75 bis 85%. **Abb. 27** stellt das Drehmoment über der Drehzahl dar. Als Unterstützung sind Hilfslinien bei 1, 2 und 3 kW eingetragen. Auch hier ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad des Gesamtsystems zum Teil über 80% liegt, was bei dem relativ kleinen Generator ein sehr guter Wert darstellt.

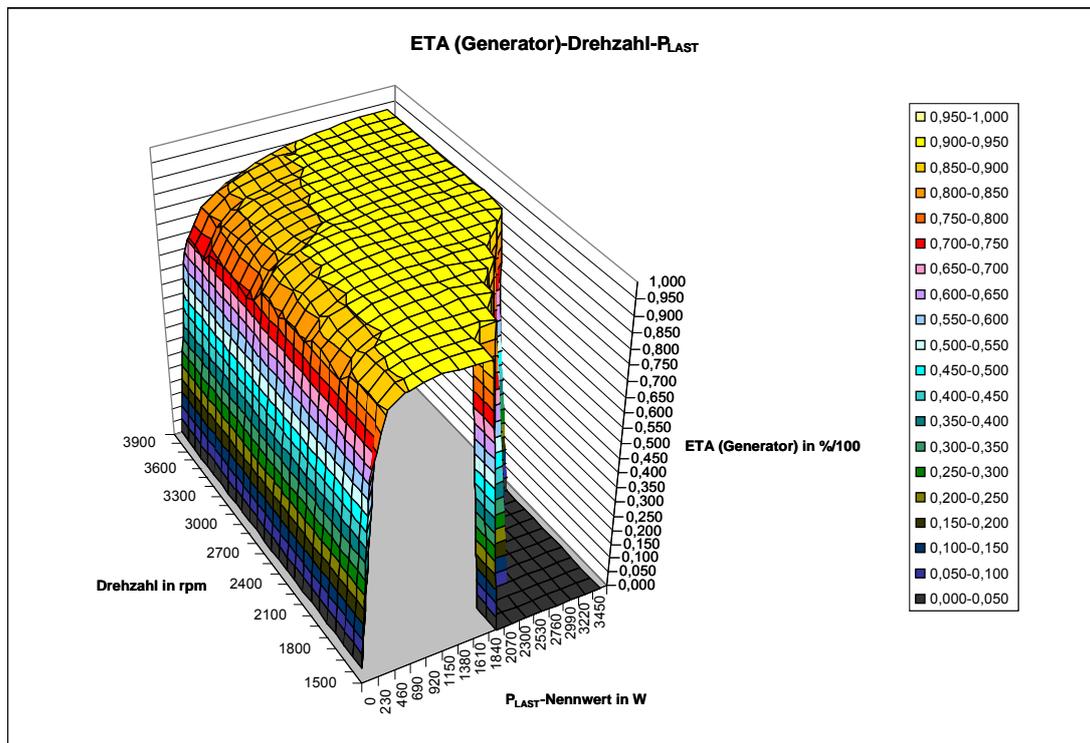


Abb. 21: Wirkungsgradkennfeld des Generators (3D)

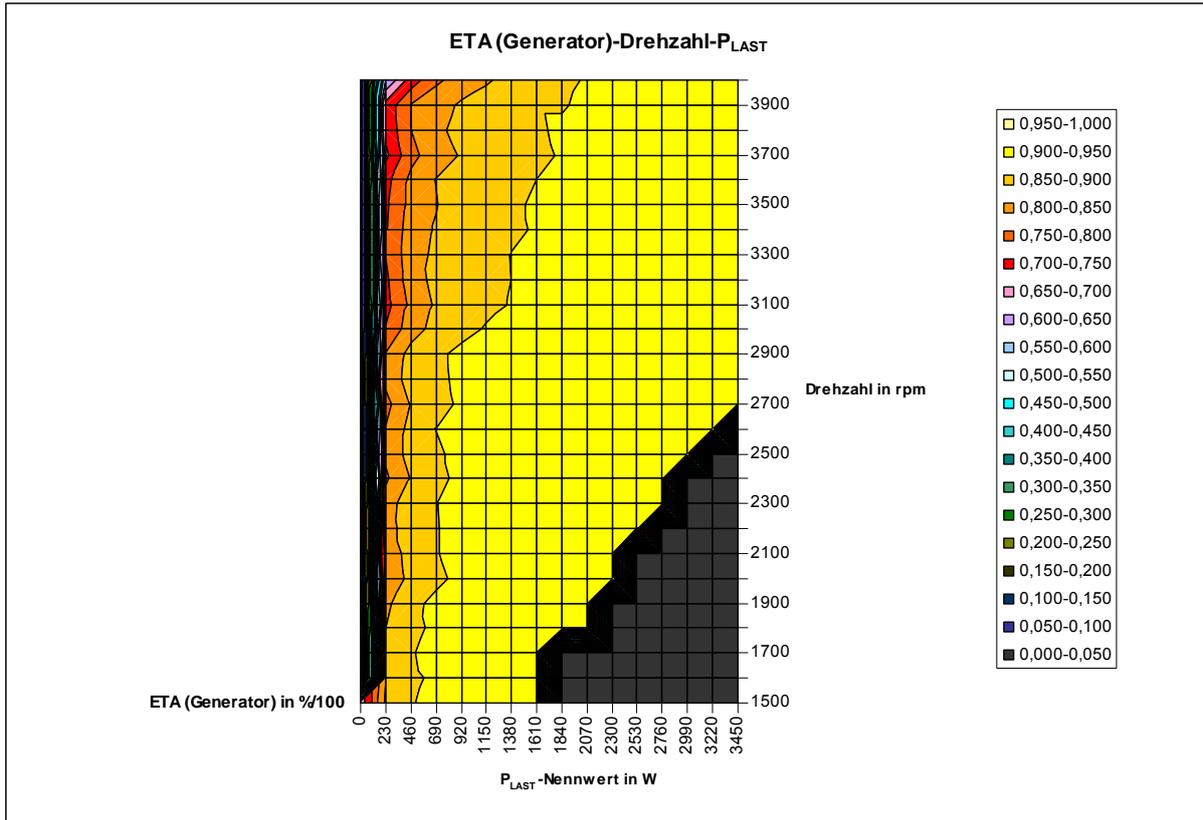


Abb. 22: Wirkungsgradkennfeld des Generators (Projektion auf eine Ebene)

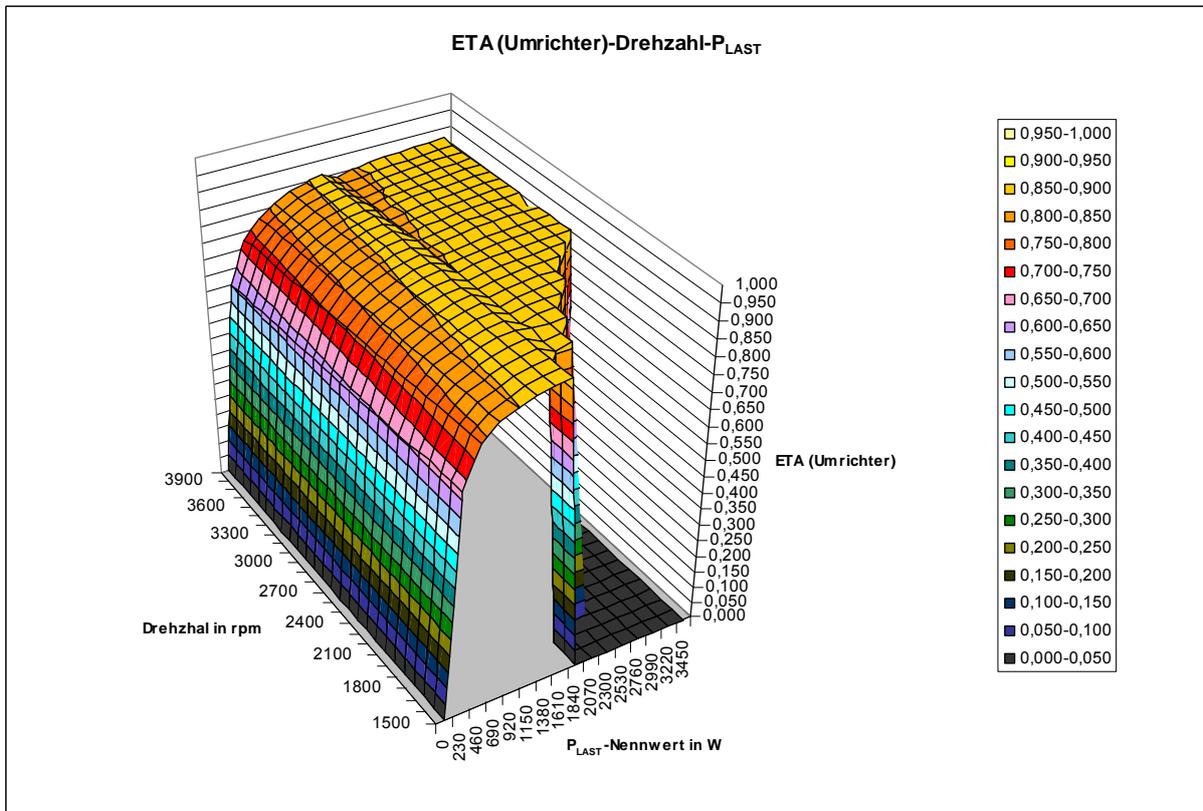


Abb. 23: Wirkungsgradkennfeld des Inverter (3D)

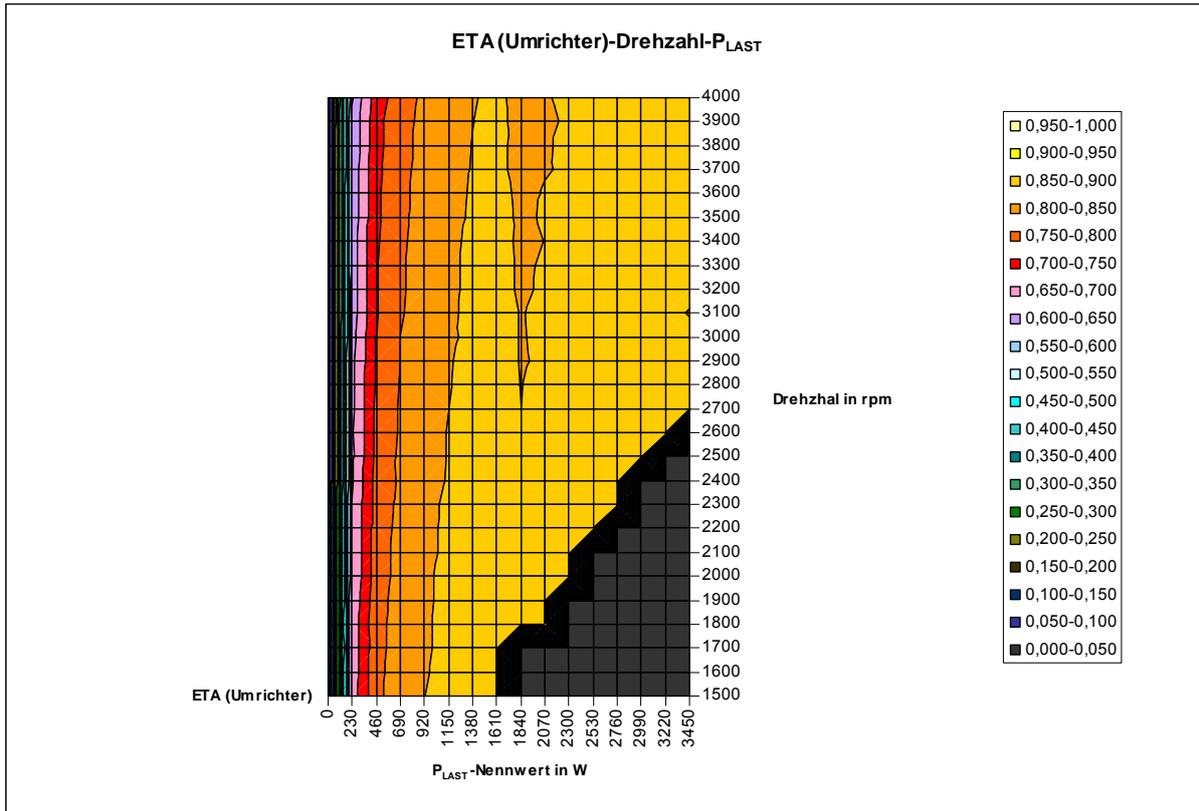


Abb. 24: Wirkungswirkungsfeld des Inverter (Projektion auf eine Ebene)

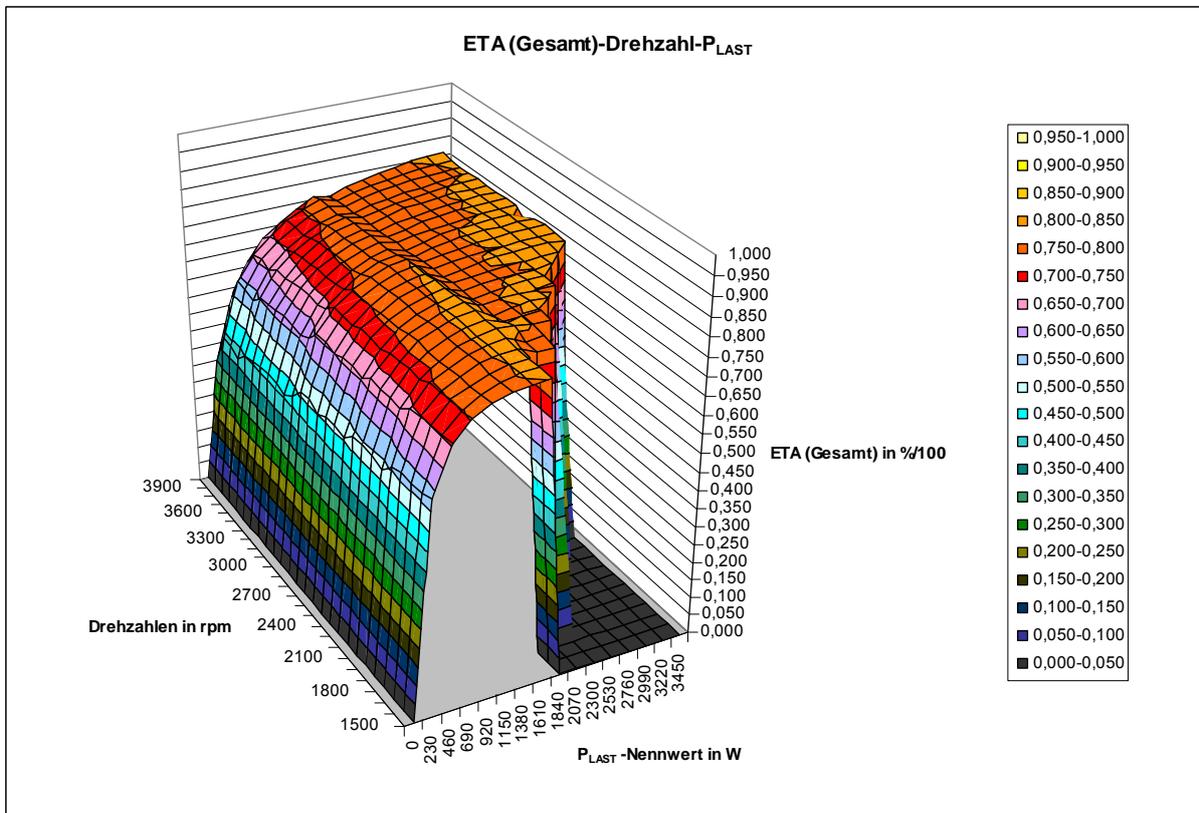


Abb. 25: Gesamtwirkungsgrad (3D)

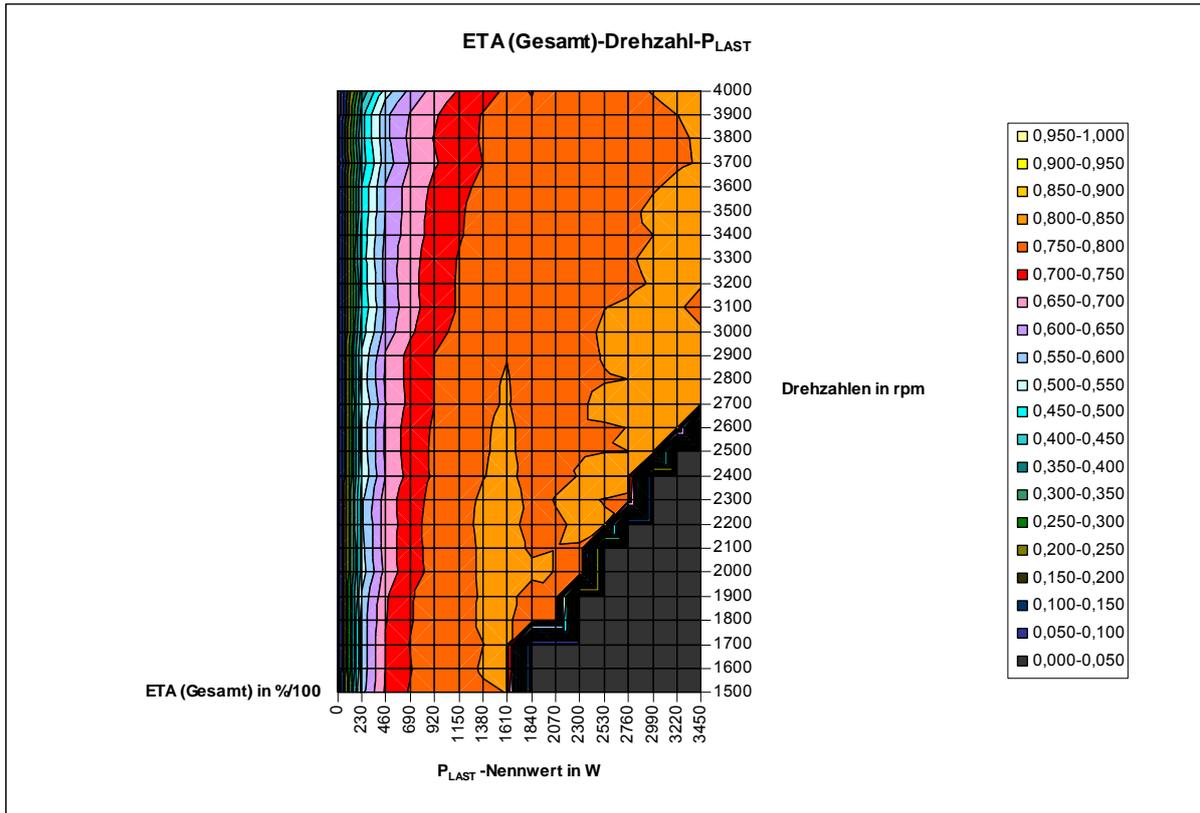


Abb. 26: Gesamtwirkungsgrad (Projektion auf eine Ebene)

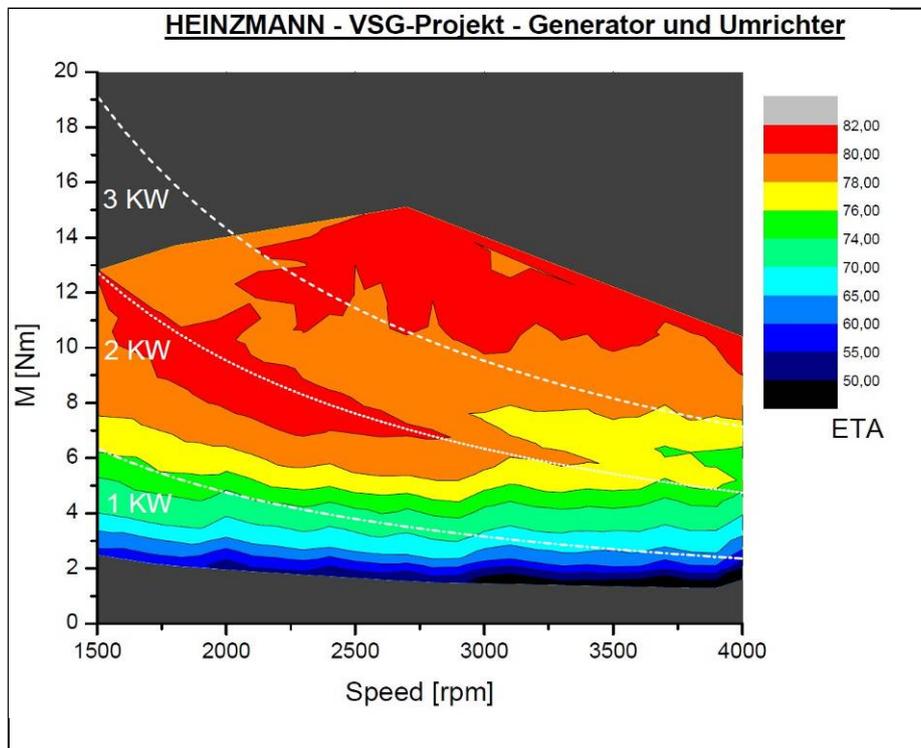


Abb. 27: Drehmoment über Drehzahl

AP 6: Steuerungsentwicklung

Steuerstrategien

Die Firma Heinzmann und der Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen haben sich für vier verschiedene Betriebsstrategien entschieden, mit denen der VSG gefahren werden soll. Diese sind im Einzelnen:

1. Konstante Drehzahl ohne Start/Stop
2. Konstante Drehzahl mit Start/Stop
3. Variable Drehzahl ohne Start/Stop
4. Variable Drehzahl mit Start/Stop

Die erste Betriebsstrategie entspricht einem herkömmlichen Generator der von einem Verbrennungsmotor mit konstanter Geschwindigkeit betrieben wird. Strategie Nr. 2 wird ebenfalls mit konstanter Drehzahl betrieben, hat jedoch Stopp-Phasen, wenn von der Last keine Leistung abgerufen wird. Entsprechendes wurde auch für den Betrieb mit variabler Drehzahl vorgesehen.

Um das gesamte Leistungsspektrum des Dieselmotors ausnutzen zu können, wurde für den Betrieb mit konstanter Drehzahl eine Geschwindigkeit von 3600 U/min vorgesehen. Für den Betrieb mit variabler Drehzahl im Betrieb ohne Start/Stop wurde als Leerlaufdrehzahl 1500 U/min festgelegt.

Alle Versuche wurden mit eingefahrenem Motor mit abgeklemmter Lichtmaschine gefahren, entsprechend den Versuchsbedingungen beim assoziierten Projektpartner Hatz für das Erstellen des Kennfeldes.

Die Programmierung der Last, sowie der Hinterlegung der Kennlinie optimalen Verbrauchs erfolgte über die Heinzmann-Software „DC Desk“. Die ausgewählten Lastprofile wurden auf die maximal mögliche elektrische Ausgangsleistung von ca 3 kW und auf eine Länge von 20 Minuten skaliert. Das eingegebene (stetige) Lastprofil wird von der Software automatisch in ein diskretes, aus den Leistungsstufen bestehendes Profil umgewandelt.

Um auch bei den VDEW-Lastprofilen den Start/Stop-Modus nutzen zu können, wurde von den Projektpartnern vereinbart, die konstante Grundlast nicht zu berücksichtigen.

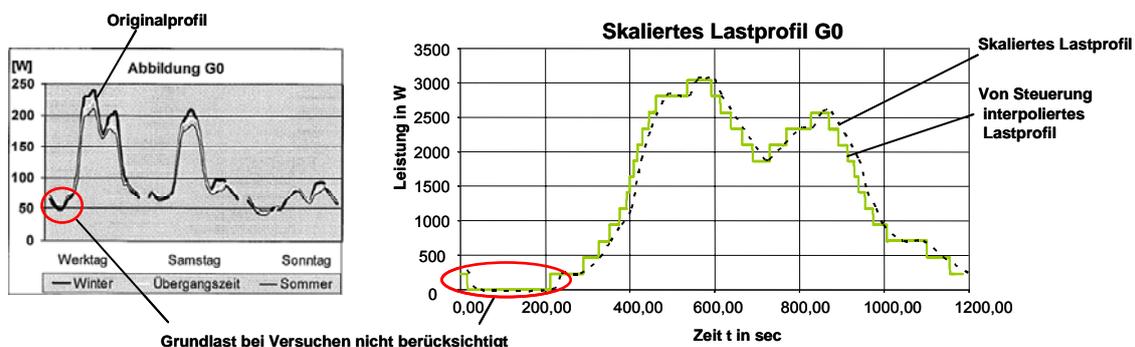


Abb. 28: Skalierung und Interpolation der Profile

Zu Beginn der Versuchsreihe wurde zunächst mit Hilfe der Simulation eine Verfahrenlinie idealen Verbrauchs generiert und anschließend in der VSG-Steuerung hinterlegt. Es zeigte sich jedoch, dass der Umrichter im VSG-Modus bei mittleren Leistungen und der geforderten geringen Drehzahl von 1500 U/min die Spannung von 400 V nicht aufrechterhalten konnte und sich regelmäßig selbständig ausschaltete, so dass die theoretische Ideallinie nicht gefahren werden konnte. Daher wurde die Verfahrenlinie etwas angepasst, um die Versuche fahren zu können.

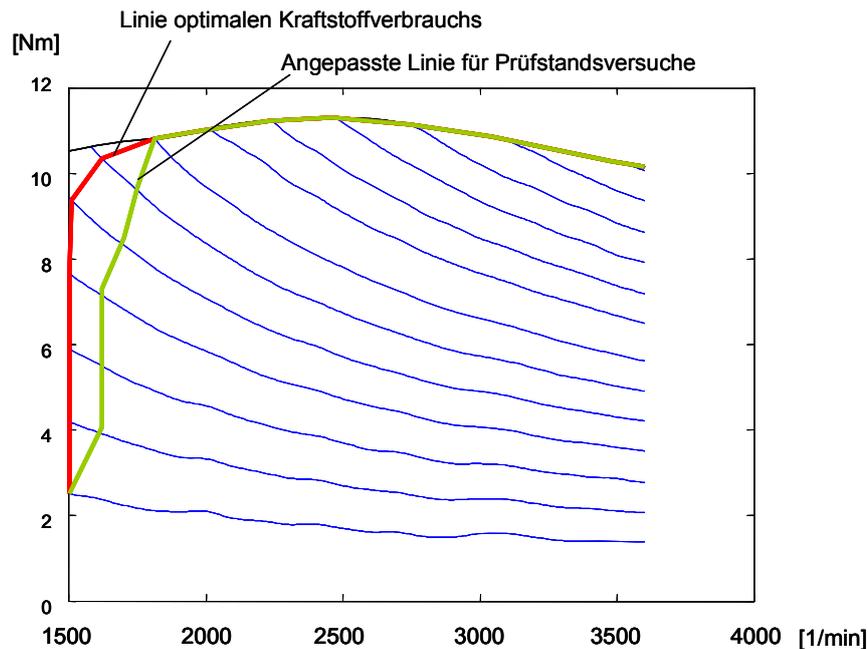


Abb. 29: Anpassung der VSG-Verfahrenlinie

Ein Durchgang wurde auf eine Dauer von 20 Minuten angesetzt. Um alle Durchläufe zeitlich zu synchronisieren wurde ein Trigger programmiert, der auf einen künstlich am Profilanfang gesetzten Leistungssprung reagierte und die auf 20 Minuten Aufzeichnungsdauer begrenzte Messdatenaufzeichnung in Gang setzte. Dadurch ließ sich sicherstellen, dass alle Profile exakt die selbe Aufzeichnungsdauer haben und sich zu jedem Zeitpunkt an der selben Stelle im Lastprofil befinden.

Aufgrund der hohen Dynamik des Drehmoments hat man sich am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen dazu entschieden, die Abtastrate der Sensorsignale auf 22 kHz zu setzen. Vorausgegangen war die Überlegung, dass sich das Drehmoment innerhalb von 60° Wellenumdrehung vom (negativen) Minimalwert zum Maximalwert ändert (siehe **Abb. 34**). Es ist davon auszugehen, dass das durchschnittliche Drehmoment maßgeblich durch die Höhe dieses Drehmoment-Peaks definiert wird, so dass für eine genaue Messung diese Werte möglichst lückenlos erfasst werden müssen. Mit einer Abtastrate von 22 kHz werden auch bei 3600 U/min Drehmomentwerte in Abständen von <math><1^\circ</math> Wellendrehung aufgezeichnet, was zu einer hohen Genauigkeit bei der Ermittlung des Nennmoments führt.

Am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen wurde für das Projekt nur ein Datenerfassungssystem im Rahmen dieses Projektes besorgt (Hersteller National Instruments, Bezeichnung: CompactDAQ), das nur mit einer Abtastrate messen kann, so dass alle Messwerte mit dieser hohen Auflösung erfasst wurden.

Für die spätere Auswertung und einfachere Handhabung wurden die Rohdaten wieder reduziert mit einem Reduktionsfaktor von 10 000. Von jeweils 10 000 Messwerten wurde der Mittelwert gebildet, so dass für die graphische Darstellung der Ergebnisse 2,2 Werte pro Sekunde zur Verfügung standen.

AP 7: Vermessung des Gesamtsystems

Für die Erfassung des IST-Zustandes und den Vergleich mit dem VSG wurde auf dem Prüffeld des Lehrstuhls für Mobile Arbeitsmaschinen ein Prüfstand aufgebaut. Die den elektrischen Generator antreibende Verbrennungskraftmaschine war ein Einzylinder-Viertakt-Dieselmotor mit einem Hubraum von 0,243 L mit der Typenbezeichnung 1B20, gestellt vom assoziierten Projektpartner Hatz. Dieser Motor hat eine Leistung von 3,5 kW, einen Drehzahlbereich von 1500 U/min – 3600 U/min und ein maximales Drehmoment von 9 – 11,5 Nm (drehzahlabhängig).

Der verwendete Generator ist eine permanenterregte Synchronmaschine vom Projektpartner Heinzmann, Typenbezeichnung SL-EC 160 22 B.

Grundaufbau

Um den Wirkungsgrad des Systems in möglichst hoher Genauigkeit messen zu können, muss sicher gestellt sein, dass die mechanische Leistung möglichst verlustfrei vom Verbrennungsmotor zum elektrischen Generator übertragen werden kann. Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, dass die Kopplung von Dieselmotor, Drehmomentsensor und Generator biegespannungsfrei erfolgt, um einer Beschädigung oder Zerstörung des Antriebsstranges vorzubeugen. Dies kann durch eine Kupplung gelingen, die axialen und angularen Versatz zulässt, wie z.B. eine Gelenkwelle. Nachteilig bei solchen Ausgleichkupplungen sind Verluste in den Reibstellen der Kupplung wie auch mögliche Unwuchten, die sich als Drehmomentschwingung über das Messsignal legen und später aufwändig wieder herausgefiltert werden müssen.

Alternativ kann auf eine Ausgleichkupplung verzichtet werden, wenn die Abtriebswelle des Dieselmotors mit der Eingangswelle des Generators so genau ausgerichtet werden, dass sie fluchten. Dies kann durch ein System aus Messuhren und Stellschrauben erreicht werden, was jedoch im Aufbau und in der Ausführung aufwändig ist.

Bei der Wahl des für den Prüfstand geeigneten Aufbaus hat man sich am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen für einen drehsteifen Antriebsstrang entschieden, um die o.g. Leistungsverluste zu vermeiden. Für die genaue Flucht von Diesel-

Ausgangswelle und Generator-Eingangswelle wurde ein Aufbau gewählt, der ohne aufwändige Ausrichtearbeiten auskommt, indem Motor und Generator an eine Stützstruktur aufgehängt werden, so dass der Wellenversatz zwischen beiden Einheiten nur von der Fertigungsgenauigkeit dieser Struktur abhängig ist (siehe **Abb. 30**).

Zunächst wurde in ein 20mm starkes Blech auf einer CNC-Fräsmaschine eine Passung gefräst, in die der Motor mit seinem Lagerschild eingesetzt und mit dem Blech verschraubt werden kann. In der selben Aufspannung wurden vier Passbohrungen um die Ausfräsung herum gesetzt. In einem weiteren Arbeitsschritt wurden dann Stäbe gefertigt, die stirnseitig ebenfalls eine Passbohrung haben und an dieser Stelle mit dem Blech mittels Passstift und Schraube verbunden werden. Auf der anderen Seite der Stäbe wurde auf die selbe Art ein zweites Blech bearbeitet für den Anschluss des Generators. Der Vorteil bei diesem Aufbau ist, dass der Fluchtungsfehler nur durch Fertigungsungenauigkeiten abhängen kann, welcher durch präzise Bearbeitung und durch die Passstifte reduziert ist. Motor und Generator sind bei diesem Aufbau beiderseits direkt an die Stützstruktur angeflanscht.

Durch die Länge der Stäbe kann der Bauraum für den Antriebsstrang zwischen Motor und Generator definiert werden, in dem der Drehmomentsensor, eine drehsteife Ausgleichkupplung, eine Sicherheitskupplung, sowie diverse Adapterflansche Platz haben.

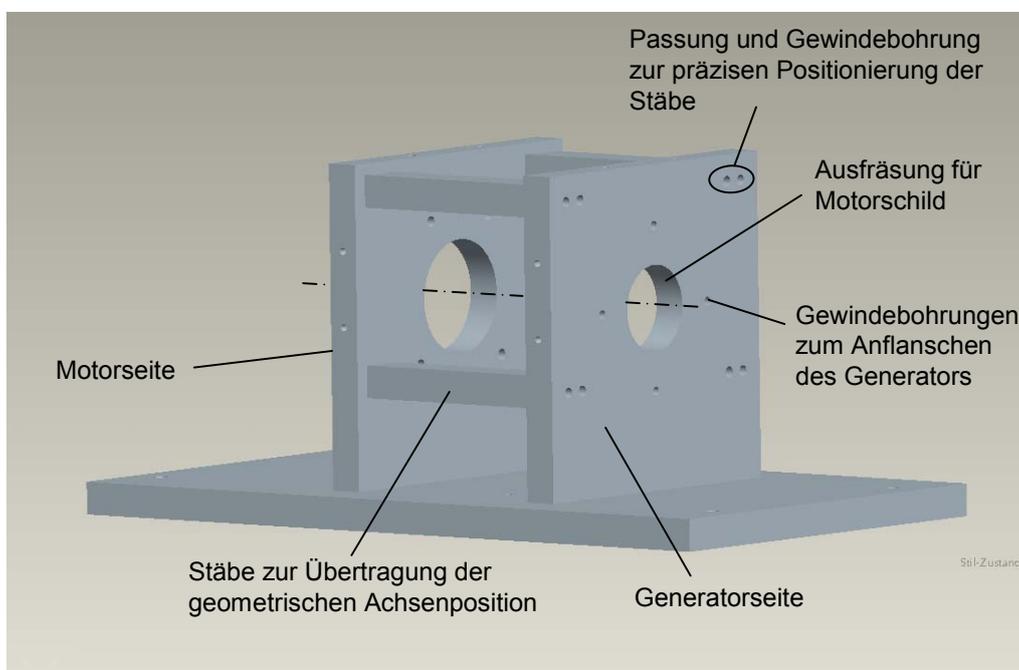


Abb. 30: Stützstruktur zum Anflanschen der Motoren

Elektrische Last

Um den elektrischen Verbraucher zu simulieren, wurde von den Projektpartnern frühzeitig festgelegt, dass dies durch 4 Lastwiderstände erfolgen soll, die im Wert ihrer Widerstände eine geometrische Reihe bilden, so dass

$$R_2 = 2 \times R_1$$

$$R_3 = 2 \times R_2$$

$$R_4 = 2 \times R_3$$

gilt. Damit können je nach Schaltkombination 16 linear ansteigende Leistungsstufen erreicht werden. Die Widerstände wurden direkt an die einzelnen Phasen des Generators angeschlossen (siehe **Abb. 31**).

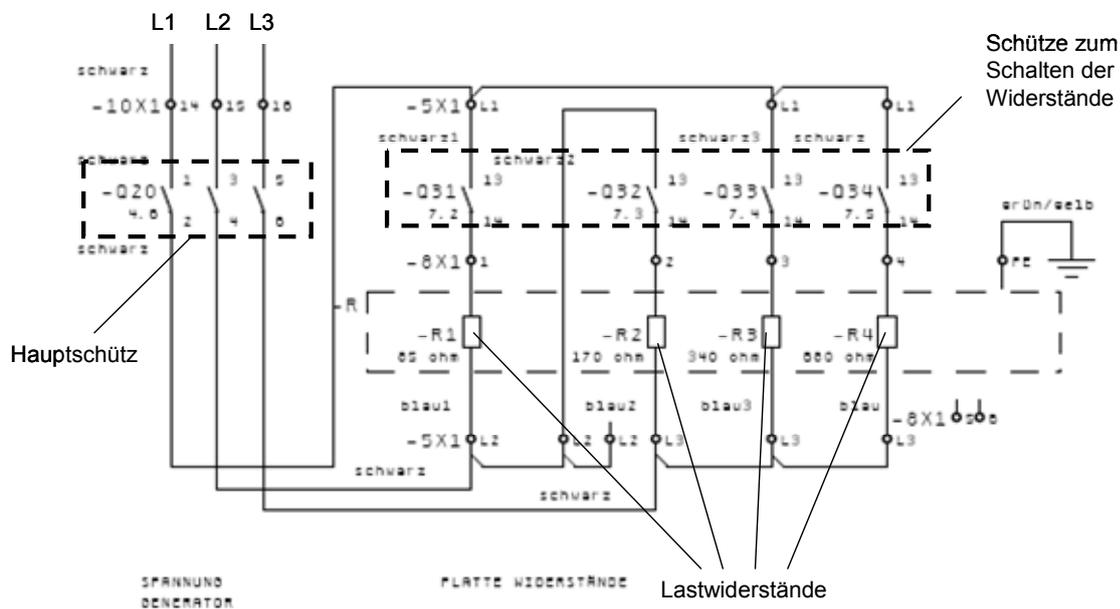


Abb. 31: Anschluss der Lastwiderstände (Auszug aus den Schaltunterlagen)

Zum Anschluss und Schalten der Widerstände sowie zum Verbauen der dazu benötigten peripheren Komponenten wie Schütze, Sicherungen, Schalter etc. wurde am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen ein Schaltschrank aufgebaut. Neben seiner Hauptfunktion als elektrische Last diente er auch zum Verbau von diverser Messtechnik. In **Abb. 32** sind die wichtigsten Bauelemente des Schrankes bezeichnet.

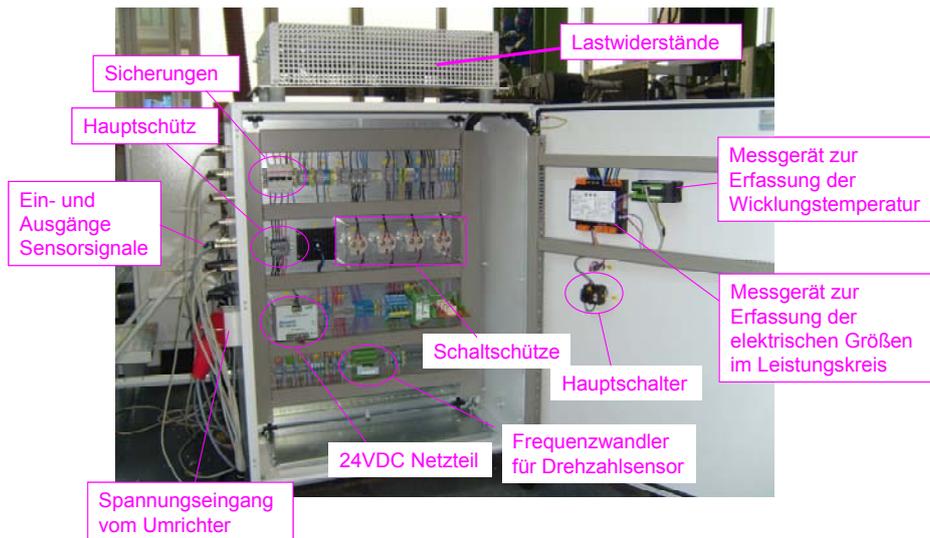


Abb. 32: Elektrik zum Messen und Schalten der Lastwiderstände

Prüfstandsperipherie

Der Prüfstand besteht aus den folgenden Komponenten:

- Externer Kraftstofftank
- Kraftstoffmessanlage
- Prüfstand mit Haube
- Abgasabsaugung
- Umrichter mit VSG-Steuerung
- elektrische Last
- Datenlogger
- PC zum Anzeigen von Messwerten und zur Programmierung der Steuerung

Für den Abzug der Abgase und auch zur Schalldämmung wurde um den Grundaufbau aus Generator und Dieselmotor eine Abdeckung konstruiert, die abnehmbar ist und von innen mit schalldämmendem Material verkleidet ist. Auf der Oberseite der Haube befindet sich auf Höhe des Auspuffes eine Öffnung, an die ein Schlauch zur Abgasabsaugung befestigt werden kann. Die Abgase werden von einem Radialventilator angesaugt und über ein weiteres Schlauchstück über eine abnehmbare Vorrichtung zum Hallenfenster ausgeblasen. Der Schlauch ist speziell für diese Anwendung ausgelegt und verträgt Temperaturen bis 300°C.

Der Dieselmotor wird serienmäßig mit Kraftstofftank geliefert, der direkt auf dem Motor aufsitzt. Um einfacher an die Zulauf- und Rücklaufleitung des Tanks zu kommen und zur einfacheren Betankung, wurde der Motor mit externem Tank bestellt. Es wurde ein Gestell konstruiert, auf die der Tank montiert wurde. Die Leitungen für Zu- und Rücklauf des Kraftstoffes sind mit der Kraftstoffmessanlage verbunden und werden von dort über wärmeisolierte Rohre zum Motor geführt. In **Abb. 33** sind die Komponenten des Prüfstandes gezeigt.

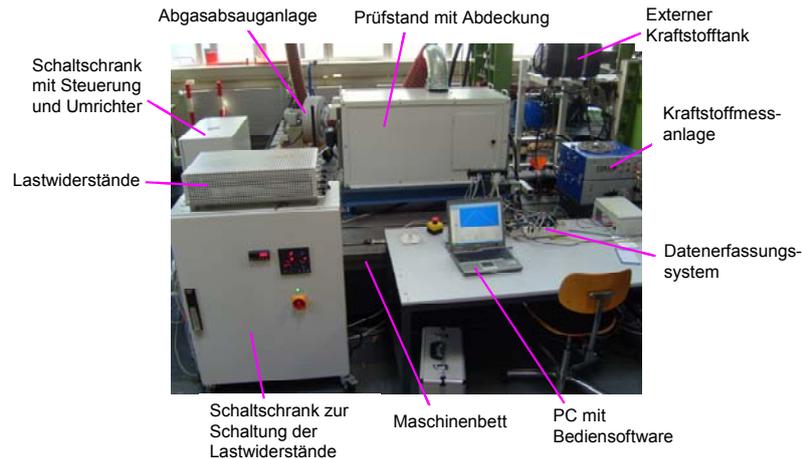


Abb. 33: Gesamtaufbau des Prüfstands am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen

Messtechnik

Für die Messung des Antriebsmomentes wurde im Antriebsstrang zwischen Diesel und Generator ein hochgenauer Drehmomentmessflansch (Hersteller: HBM, Messungengenauigkeit: $\leq 0,07\%$) verbaut. Die Wahl für einen Messflansch anstelle einer Messwelle ist seiner kompakten Bauart geschuldet.

Der Sensor besteht aus zwei Bauteilen, Rotor und Antenne. Der Rotor ist direkt im Antriebsstrang verbaut und erzeugt in Abhängigkeit vom auf ihn wirkenden Torsionsmoment ein Signal, das über Telemetrie berührungslos an die Antenne übertragen wird. Die Antenne ist mit einem Sockel verschraubt, der am Boden befestigt ist und in dem sich auch die Aufbereitungselektronik befindet, welche aus dem hochfrequenten Signal ein analoges Spannungssignal von $-10V / +10V$ erzeugt.

Einzyylinder-Viertakt-Motoren wie der verwendete 1B20 Motor zeichnen sich durch sehr starke Drehmomentschwankungen aus (siehe Abb. 34). Die im Datenblatt oder im Kennfeld angegebenen Werte beziehen sich lediglich auf das zeitlich gemittelte Moment. Der tatsächliche Verlauf zeigt eine starke Drehmomentspitze, die Werte bis zum 10fachen des Nennmomentes erreichen kann, was beim verbauten Motor zu Drehmomenten bis zu 100 Nm führen würde. Für die Auswahl des Drehmomentsensors musste diese Eigenschaft des Motors beachtet werden, um eine korrekte Messung zu ermöglichen.

Die im Antennenfuß des Sensors integrierte Auswerteelektronik verfügt über einen nicht verstellbaren Filter, der hohe Frequenzen abschneidet. Gespräche mit dem Hersteller führten zu der Entscheidung, einen Messbereich bis 200 Nm zu wählen, um Signalverfälschungen durch die Aufbereitungselektronik zu vermeiden.

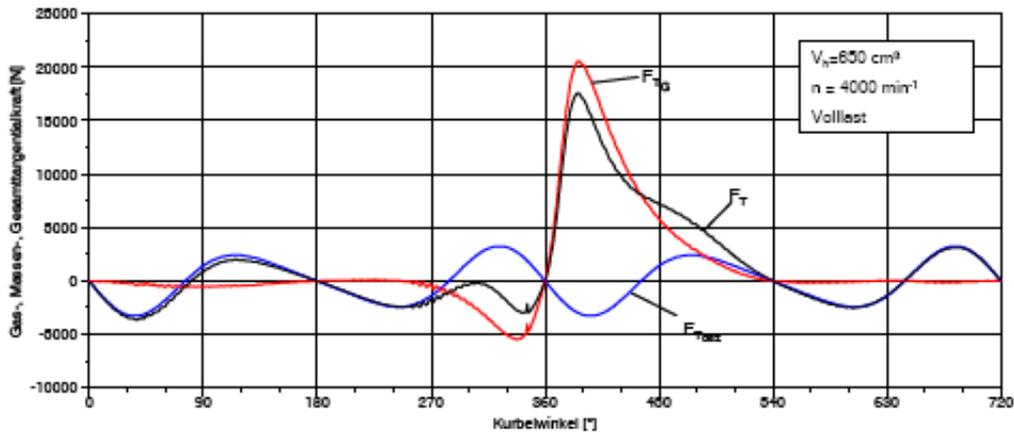


Abb. 34: Drehkraftverlauf eines Viertaktmotors [Spi07]

Zur Messung der Drehzahl wurde ein optischer Drehgeber (Hersteller: IFM electronics) verwendet, welcher 2048 Impulse pro Umdrehung ausgibt. Dadurch entstehen bei bereits mittleren Drehzahlen sehr hohe Frequenzen, was das Datenerfassungssystem vor sehr große Herausforderungen stellt. Daher wird das Signal zunächst von einem Frequenzwandler (Hersteller: Motrona) in ein analoges Spannungssignal umgewandelt. **Abb. 35** zeigt den Antriebsstrang mit den Sensoren für Drehmoment und Drehzahl.

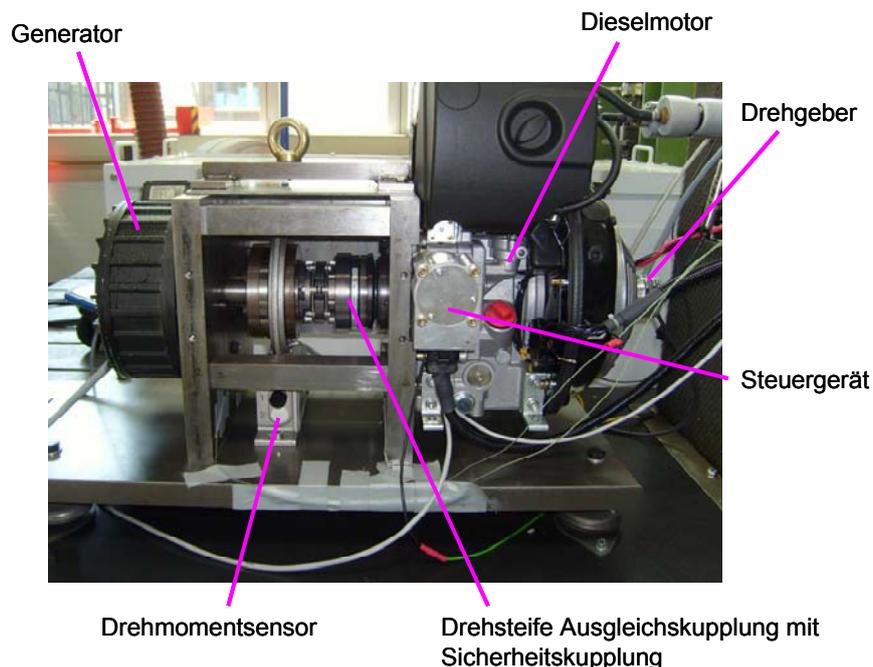


Abb. 35: Aufbau aus Diesel und Generator mit verbauter Sensorik

Für die Messung des Kraftstoffes wurde eine am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen bereits befindliche Kraftstoffmessaanlage (KMA) vom Hersteller AVL verwendet (**Abb. 36**). Die KMA besteht aus einem Messmodul und einem Aufbereitungsmodul und gibt ein analoges Ausgangssignal aus, das im Messdatenerfassungsprogramm des Datenloggers um seine Kalibrierfaktoren korrigiert wurde. Das Messprinzip beruht auf einen internen Druckregler, der eine

hochpräzise Außenzahnradpumpe Kraftstoff fördern lässt, wenn auf der Auslassseite der Druck in der Leitung sinkt. Die Drehgeschwindigkeit der KMA wird durch einen optischen Drehgeber erfasst und entweder als Frequenz- oder als analoges Signal ausgegeben.

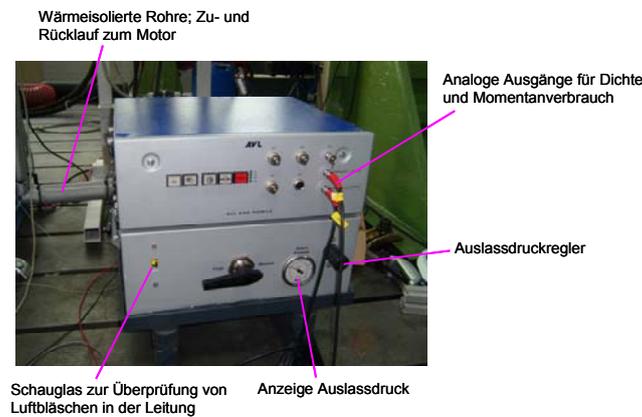


Abb. 36: Frontansicht Kraftstoffmessanlage

Um die Wirkungsgrade des Gesamtsystems mit den verschiedenen Betriebsstrategien messen und vergleichen zu können, wurde an der elektrischen Last ein Messgerät zur Erfassung der elektrischen Größen eingebaut. Dabei handelt es sich um ein programmierbares Gerät (Messungenauigkeit $\leq 1,0\%$; Hersteller: Gossen Metrawatt) mit vier analogen Ausgängen, deren Belegung frei programmierbar ist.

Ergebnisse

Für die Berechnung der Kurve idealen Verbrauchs wurden als Stützpunkte für die Leistung (siehe AP2) keine theoretisch berechneten, sondern gemessene Werte verwendet, um eventuellen Abweichungen vorzubeugen. Diese gemessenen Werte stammen jedoch aus dem Betrieb mit konstanter Drehzahl, bei dem systematisch andere Leistungen erzeugt werden, als beim Betrieb mit variabler Drehzahl.

Der Prüfstand wurde bei allen Versuchen mit variabler Drehzahl nur mit einer Verfahrenlinie betrieben, so dass die in der Simulation berechneten Werte aus Drehmoment, Drehzahl und Verbrauch nicht mit denen aus den Versuchen übereinstimmen.

Der Grund für die Abweichung sind leistungsabhängige Schwankungen in den Leiterspannungen, die vor allem im Betrieb mit variabler Drehzahl verstärkt auftreten.

In **Abb. 37** ist ein synthetischer Zyklus abgebildet, in dem alle Leistungsstufen nacheinander abgefahren werden. Der Unterschied in der abgerufenen elektrischen Leistung ist deutlich zu erkennen. Besonders deutlich ist der Unterschied an der Leistungsstufe 1,8kW bzw. 1,87 kW. Bei dieser Leistung wird der Widerstand R1 mit den Leitungen L1 und L2 verbunden (siehe auch Abb. 31). In diesem Zustand ist der größte Spannungsunterschied zu erkennen und beträgt ca. 8 V. Dieser Betrag ist nicht sehr groß, der dadurch erzeugte Leistungsunterschied ist jedoch aufgrund von

$P=U^2/R$ potenziert. Bei einem Widerstandswert von 85 Ohm beträgt der Leistungsunterschied demnach 75 W. Dadurch ergibt sich in den gefahrenen Lastprofilen ein Unterschied in der gesamten abgegebenen Energie zwischen konstanter und variabler Drehzahl zwischen 2 und 3,5%.

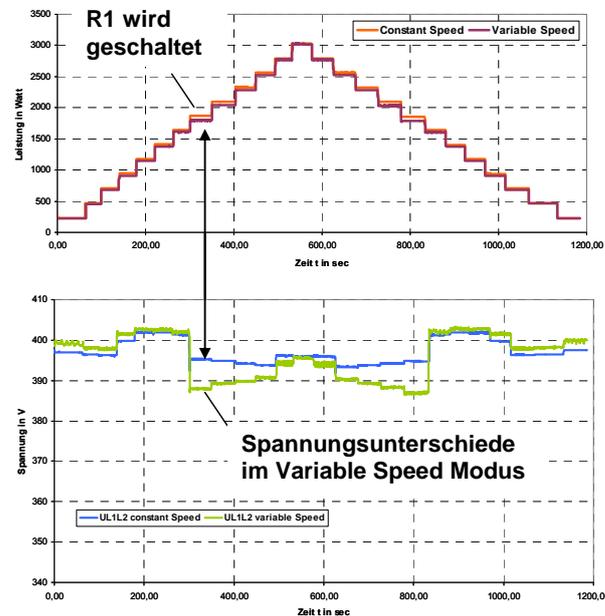


Abb. 37: Auftretende Unterschiede in der Spannung

Tabelle 6 und **Tabelle 7** zeigen die Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchsmessung und der Simulation. Es ist zu erkennen, dass der Kraftstoffverbrauch bei jedem Lastprofil am niedrigsten ist, wenn es mit variabler Drehzahl und Start/Stop-Modus betrieben wird. Dabei fällt in den gemessenen Profilen die variable Drehzahl deutlich stärker ins Gewicht als der Start/Stop-Modus. Wie zu erwarten war, fiel der Start/Stop-Modus vor allem bei langen Stillstandsphasen ins Gewicht wie z.B. beim Profil G1.

Weiterhin wird deutlich, dass das verwendete Simulationsmodell den Kraftstoffverbrauch sehr gut abbildet. Die Abweichung vom realen Wert beträgt nur wenige Prozentpunkte.

Für die Anzeige von Momentanwerten wie den aktuellen Kraftstoffbedarf sowie mechanische Größen wie Drehmoment und Drehzahl ist das Modell ebenfalls geeignet. In **Abb. 38** sind der gemessene Drehmomentenverlauf am Beispiel des Profils G0 (Variable Speed Modus) abgebildet. Es ist zu erkennen, dass das simulierte Drehmoment dem gemessenen Moment sehr nahe kommt. Die Abweichung resultiert aus der Fehlerkette aus Messfehler bei der Erstellung des Kennfeldes, Ungenauigkeiten bei der Interpolation, sowie Messfehler bei der Messung am Prüfstand. Trotzdem nähert sich die Simulation gut an das real auftretende Drehmoment an.

	Profil G0				Profil G1				Profil G2			
Strategie	CS	CS S/St	VS	VS S/St	CS	CS S/St	VS	VS S/St	CS	CS S/St	VS	VS S/St
Messung [L]	0,272	0,249	0,195	0,189	0,235	0,175	0,154	0,133	0,287	0,268	0,209	0,204
Einsparung (gemessen) [%]	---	8,48	28,46	30,50	---	25,49	34,54	43,20	---	6,77	27,13	29,03
Simulation [L]	0,259	0,237	0,185	0,178	0,221	0,162	0,144	0,123	0,271	0,252	0,198	0,192
Einsparung (simuliert) [%]	---	8,49	28,57	31,27	---	26,70	34,84	44,34	---	7,01	26,94	29,15
Gesamtenergieverbrauch [MJ]	1,58		1,55		1,10		1,08		1,74		1,70	
Abweichung im E.verbrauch [%]	--		-1,9				-1,8		---		-2,3	
CS = Constant Speed Modus, CS S/St = Constant Speed Modus mit Start/Stop, VS = Variable Speed Modus, VS S/St = Variable Speed Modus mit Start/Stop												

Tabelle 6: Darstellung des Kraftstoffverbrauchs aus Messung und Simulation

	Profil L0				Profil H0				Profil „LKW“				Profil „Kasseler“			
Strategie	CS	CS S/St	VS	VS S/St	CS	CS S/St	VS	VS S/St	CS	CS S/St	VS	VS S/St	CS	CS S/St	VS	VS S/St
Messung [L]	0,266	0,252	0,184	0,179	0,280	0,254	0,198	0,190	0,279	0,275	0,194	0,193	0,212	---	0,112	---
Einsparung (gemessen) [%]	---	5,49	31,14	32,89	---	9,04	29,22	32,00	---	1,26	30,27	30,81	---	---	43,50	---
Simulation [L]	0,249	0,235	0,171	0,168	0,261	0,237	0,186	0,178	0,260	0,256	0,180	0,179	0,197	---	0,112	---
Einsparung (simuliert) [%]	---	5,6	31,33	32,53	---	9,20	28,74	31,80	---	1,54	30,77	31,15	---	---	43,15	---
Gesamtenergieverbrauch [MJ]	1,52		1,48		1,67		1,63		1,66		1,61		0,88		0,85	
Abweichung im E.verbr. [%]	---		-2,6		---		-2,4		---		-3,0		---		-3,4	
CS = Constant Speed Modus, CS S/St = Constant Speed Modus mit Start/Stopp, VS = Variable Speed Modus, VS S/St = Variable Speed Modus mit Start/Stopp																

Tabelle 7: Darstellung des Kraftstoffverbrauchs aus Messung und Simulation

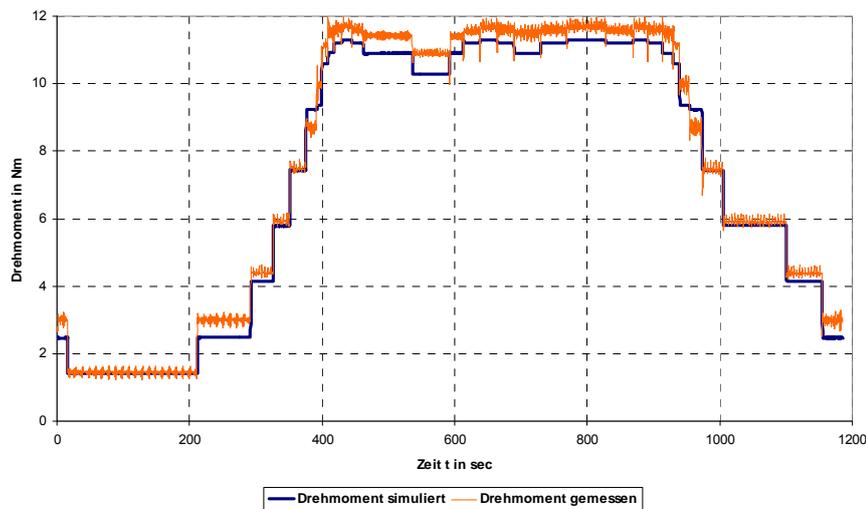


Abb. 38: Vergleich von Simulation und Messung beim Drehmomentenverlauf

Noch genauer sind die Werte für den Kraftstoffverbrauch, hier gibt es nur sehr geringe Abweichungen. Im Betrieb mit variabler Drehzahl ergibt sich bei Drehzahländerungen eine Beschleunigungsphase in der kurzzeitig eine hohe Verbrauchsspitze entsteht (**Abb. 39**). Diese Spitzen können im rein statischen Simulationsmodell nicht abgebildet werden und tragen einen Teil zur Ungenauigkeit bei.

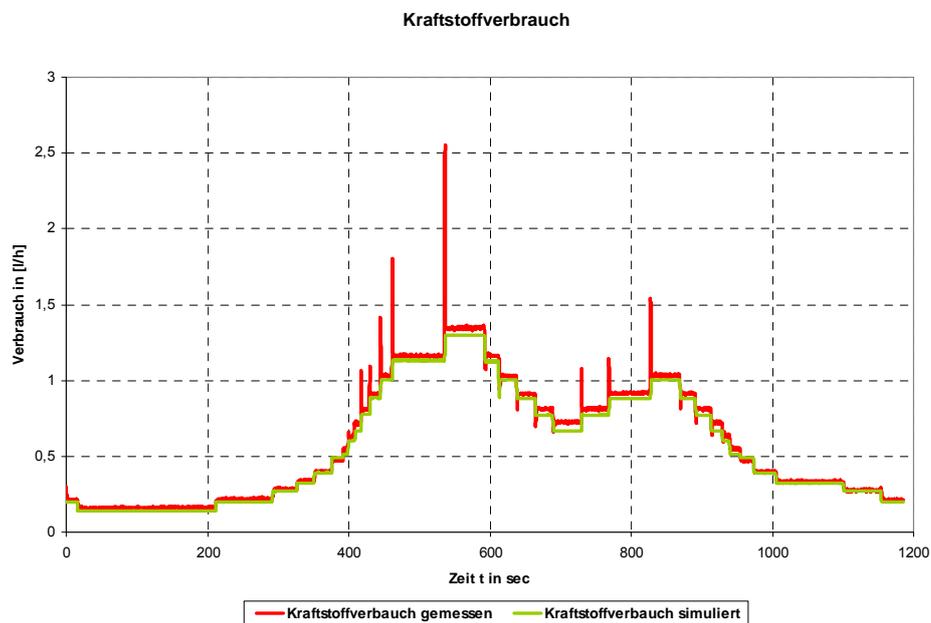


Abb. 39: Vergleich von Simulation und Messung beim Kraftstoffverbrauch

Fazit

Die Versuche haben gezeigt, dass der Betrieb mit variabler Drehzahl eine sehr große Kraftstoffreduktion zur Folge hat, die bei allen gefahrenen Zyklen mindestens 30% beträgt, was ein überraschend hoher Wert ist. Es ist anzunehmen, dass auch bei Lastprofilen mit weniger großen Schwankungen der geforderten Leistung die Kraftstoffeinsparung immer noch signifikant ausfallen wird. Wie an den Simulationsergebnissen zu erkennen ist, führt die bei der Beschleunigung auftretende Kraftstoffspitze nur zu einer geringen Erhöhung des Gesamtverbrauchs und kann vernachlässigt werden.

Es muss bei einer kritischen Analyse der Ergebnisse allerdings mit berücksichtigt werden, dass die Leistung nur stufenweise abgerufen wurde und die Beschleunigungsphasen dementsprechend nur vereinzelt auftreten konnten. Ein verbrauchsoptimaler Betrieb des Systems für kontinuierliche Lastprofile setzt jedoch eine kontinuierliche Änderung der Drehzahl voraus, wobei aus jetziger Sicht noch nicht absehbar ist, wie sich die daraus resultierenden permanenten Beschleunigungsvorgänge auf den Kraftstoffverbrauch auswirken.

Weiterhin muss für einen einwandfreien Betrieb bei variabler Drehzahl sichergestellt sein, dass das System auf unvorhersehbare Lastsprünge am Verbraucher reagieren kann. Dieses Verhalten konnte im Rahmen dieses Projektes nicht geklärt werden und sollte daher im Rahmen nachfolgender Projekte untersucht werden.

Dennoch sind die erreichten Ergebnisse vielversprechend und lassen den Schluss zu, dass der Variable Speed Generator durch seine deutliche Kraftstoffeinsparung grundsätzlich einen erheblichen Beitrag zur Verringerung der Umweltbelastung leisten kann.

Literaturverzeichnis

- [Fue00] FÜNFELD, C. und TIEDEMANN, R.: *Anwendung der Repräsentativen VDEW-Lastprofile step-by-step*, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2000
- [Las00] LASHER, S., ISHERWOOD, K., SRIRAMULA, S. und BRODRICK C.-J.: *Evaluation of the potential for fuel cell APUs*”, Proceedings of the Fuel Cell Seminar, San Antonio, USA, 2004
- [Ste06] STEINBERGER-WILCKENS, R.: *Wissenschaftlicher Ergebnisbericht 2006, Schwerpunkt: Energie, FE-Vorhaben: P12 Rationelle Energieumwandlung*, Forschungszentrum Jülich, 2006
- [Mie00] MIES, K.: *Drehzahlvariable Stromerzeugung*, Kasseler Symposium Energie Systemtechnik 2000, ISET, Kassel, 2000
- [Spi07] SPICHER, U.: *Verbrennungsmotoren A*, Institut für Kolbenmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie, Vorlesungsumdruck, 2007

Anhang

Anhang 1: Simulationsmodell - Kennfeldinterpolation

```
%einlesen des Excel-Sheets mit dem Kennfeld des Diesels:
Kennfeld = xlsread('Diesel3.xls');
feld=xlsread('Diesel3.xls');
volllast=xlsread('volllastlinie.xls');

%Groesse des Excel-Sheets wird definiert:
[row col]=size(Kennfeld);

%x- und y-Achsen werden herausgeschrieben
drehzahl=Kennfeld(row-1,2:col);
spezVerbrauch=Kennfeld(1:row-2,1);

%Volllastmoment wird herausgeschrieben
volllastmoment = volllast(:,2);

volleTA=volllast(:,3);

%Interpolation Volllastmoment:
ok_ = isfinite(drehzahl) & isfinite(volllastmoment');
ft_ = fitype('smoothingspline');
cf_ = fit(drehzahl(ok_)',volllastmoment(ok_),ft_);

%Kennfeld wird "zurechtgeschnitten", um nur den spezifischen Verbrauch zu
%haben (ohne x- und y-Achsen)
Kennfeld(:,1)=[];
Kennfeld(row-1:row,:)=[];

%Im Kennfeld werden solche Felder mit "1" belegt, in welche auch ein Wert
%eingetragen wurde
ind=~isnan(Kennfeld);

%Anzahl der Werte wird bestimmt; diese definiert die Groesse der x-,y- und
%z-Vektoren, so dass jeder Drehzahl und jedem Drehmoment ein spezifischer
%Verbrauch zugeordnet werden kann
summe=sum(ind);
summe=sum(summe);

%Vektoren "zeile" und "spalte" werden erzeugt, die als Laenge die
%Anzahl der im Kennfeld eingetragenen Werte haben und als Werte den
%entsprechenden Index im (zurechtgeschnittenen) Kennfeld haben; der Vektor
%Zeile trägt als Werte die Indizes der Zeilen in dem sich die Werte im
%Kennfeld befinden und der Vektor "spalte" entsprechend die Indizes der
%Spalten
[zeile,spalte,v]=find(~isnan(Kennfeld));

%Nach Kenntnis der Laenge der gesuchten Vektoren und der Indizes fuer
%Zeilen und Spalten, mit deren Hilfe die spezifischen Verbraeuche eindeutig
%zugeordnet werden koennen koennen,
%koennen der x-Vektor fuer die Drehzahl, der y-Vektor fuer das Drehmoment
```

```
%und der z-Vektor fuer den dazugehoerigen spez. Verbrauch gebildet werden
i=1;
j=1;
n=1;

while(i<=summe);
    while(j<=summe);
        a=(zeile(i));
        b=(spalte(j));
        y(n)=(Kennfeld(a,b));
        x(n)=(drehzahl(spalte(j)));
        z(n)=(spezVerbrauch(zeile(i)));
        j=j+1;
        i=i+1;
        n=n+1;
    end
end

a=length(x);

%Hinzufügen des Spezifischen Verbrauchs der Vollastlinie:
for i=1:length(volllastmoment)
    x(a+i)=volllast(i,1);
    y(a+i)=volllast(i,2);
    z(a+i)=volllast(i,3);
end

%Einlesen des Kennfelds des E-Motors:

EMotor = xlsread('Kennfeld_EMotor.xls');

xe = EMotor(:,1);
ye = EMotor(:,2);
ze = EMotor(:,3);

%Interpolationsparamter (kubische Interpolation):
ft = 'cubicinterp';
opts = fitoptions( ft );
opts.Weights = zeros(1,0);
opts.Normalize = 'on';

%Interpolation Verbrennungsmotor:
[fitresultv, gofv] = fit( [x', y'], z', ft, opts );

%Interpolation E-Motor:
[fitresulte, gofe] = fit( [xe, ye], ze, ft, opts );

%Hubraum:
V_h = 0.243;

%Aus Interpoliertem Kennfeld des Verbrennungsmotors werden Randbereiche
%extrapoliert:

%Extrapolation "oberer Rand" (oberhalb Vollastlinie). Delta-M von 1 Nm
%gesucht; vorherige Umrechnung auf ein Delta-Mitteldruck notwendig
```

```
%Extrapolationsschritt:
extrapol = 1;

% Delta-M:
dy = extrapol/100/V_h*4*pi;

a=length(x);

%Extrapolation der Werte über den Volllastbereich hinaus; lineare Abnahme;
%lineare Interpolation über letzten zwei Werte:
for i=1:length(volllastmoment)
    x(a+i)=volllast(i,1);
    y(a+i)=volllast(i,2)+dy;
    z(a+i)=2*volllast(i,3)-feval(fitresultv, volllast(i,1),(volllast(i,2)-
dy));
end

%Extrapolation "unterer Rand",
%lineare Abnahme; lineare Interpolation über letzten zwei Werte:

%Neues dy bilden:
dy = 1/100/V_h*4*pi;

%Durchsuchungsvektor bilden:
M_durch=0:0.001:2;
a=1;

for i=1500:100:3600

    ETA_durch=feval(fitresultv, i, M_durch);
    n_min= max(ETA_durch);
    n_min=find(ETA_durch==n_min);
    M_min(a)=M_durch(n_min);
    n_durch(a)=i;
    ETA_min(a)=ETA_durch(n_min);
    a=a+1;

end

a=length(x);

for i=1:length(M_min)
    x(a+i)=n_durch(i);
    y(a+i)=M_min(i)-dy;
    z(a+i)=2*ETA_min(i)-feval(fitresultv, n_durch(i),(M_min(i)+dy));
end
```

```
%Extrapolation des Kennfeldes für Drehzahlen kleiner 1500 U/min  
%("linker Rand"). Verfahren wie bei Extrapolation oberer und utnerer Rand
```

```
clear ETA_durch  
clear n_min  
clear M_min
```

```
ETA_durch = feval(fitresultv, 1500, M_durch);  
n_min = max(ETA_durch);  
n_min=find(ETA_durch==n_min);  
M_min=M_durch(n_min);  
M_max = feval(cf_, 1400);
```

```
clear M_durch
```

```
%Durchgangsvektor für Momente für 1400 U/min  
M_durch = linspace(M_min, M_max, 50);
```

```
clear ETA_durch  
clear n_min  
clear M_min
```

```
a=length(x);
```

```
for i=1:length(M_durch)  
    x(a+i)=1400;  
    y(a+i)=M_durch(i);  
    z(a+i)=2*feval(fitresultv, 1500,M_durch(i))-feval(fitresultv,  
1600,M_durch(i));
```

```
end
```

```
%Extrapolation des Kennfeldes für Drehzahlen "rechter Rand".  
M_durch=0:0.001:2;
```

```
clear ETA_durch  
clear n_min  
clear M_min
```

```
ETA_durch = feval(fitresultv, 3600, M_durch);  
n_min = max(ETA_durch);  
n_min=find(ETA_durch==n_min);  
M_min=M_durch(n_min);  
M_max = feval(cf_, 3700);
```

```
clear M_durch
```

```
%Durchgangsvektor für Momente für 3700 U/min  
M_durch = linspace(M_min, M_max, 50);
```

```
clear ETA_durch  
clear n_min  
clear M_min
```

```
a=length(x);
```

```
for i=1:length(M_durch)
    x(a+i)=3700;
    y(a+i)=M_durch(i);
    z(a+i)=2*feval(fitresultv, 3600,M_durch(i))-feval(fitresultv,
3500,M_durch(i));

end

clear gofv
clear fitresultv

%Umrechnung von Mitteldruck in Drehmoment:
y = 100*V_h/4/pi*y;

%neue Interpolation des Kennfelds für Verbrennungsmotor:
[fitresultv, gofv] = fit( [x', y'], z', ft, opts );

%Graphik Motorkennfeld mit spez. Verbrauch:
figure(10)
h = plot( fitresultv);
legend( h, 'Verbrennungsmotor', 'z vs. x, y', 'Location', 'NorthEast' );
% Label axes
xlabel( 'Drehzahl' );
ylabel( 'Drehmoment' );
zlabel( 'Wirkungsgrad' );
grid on
view( 0, 90 );
hold on

%Umwandlung des spez. Verbrauchs in Wirkungsgrad:
z = 360000./(z*45.4);

%Verbrennungsmotor:
[fitresultv, gofv] = fit( [x', y'], z', ft, opts );

w=50;

%Definition Durchlaufvektoren:
yv = [min(y):(max(y)-min(y))/w:max(y)]';
xe = min(xe):(max(xe)-min(xe))/w:max(xe);
ye = [min(ye):(max(ye)-min(ye))/w:max(ye)]';
```

```
%Umrechnung Vollastlinie Mitteldruck in Drehmoment:  
volllastmoment = 100*V_h/4/pi*volllastmoment;
```

```
%Berechnung Gesamtkennfeld
```

```
%Spalten (x-Richtung) sind Drehzahlen, Zeilen (y-Richtung) sind Drehmomente  
for jj=1:length(yvv)
```

```
Zv = feval(fitresultv, min(x):(max(x)-min(x))/w:max(x),yvv(jj));  
Ze = feval(fitresulte, min(xe):(max(xe)-min(xe))/w:max(xe),yvv(jj));  
  
KV(jj,:) = Zv;  
KE(jj,:) = Ze;  
jj;  
end
```

```
KG=KV.*KE;
```

```
%Gesamtkennfeld:
```

```
clear summe  
clear ind
```

```
ind=~isnan(KG);  
summe=sum(ind);  
summe=sum(summe);
```

```
clear zeile  
clear spalte  
clear v
```

```
[zeile,spalte,v]=find(~isnan(KG));
```

```
clear a  
clear b
```

```
i=1;  
j=1;  
n=1;  
while(i<=summe);  
while(j<=summe);  
a=(zeile(i));  
b=(spalte(j));
```

```
zg(n)=(KG(a,b));
zge(n)=KE(a,b);
xg(n)=(xee(spalte(j)));
yg(n)=(yee(zeile(i)));
zg_el(n)=xg(n)*yg(n)*2*pi/60000*zge(n);

j=j+1;
i=i+1;
n=n+1;
end
end

%Interpolation Gesamtkennfeld mit Drehzahl: x-Wert, Drehmoment: y-Wert,
%Wirkungsgrad: z-Wert
[fitresultg, gofg] = fit( [xg', yg'], zg', ft, opts );

%Interpolation Generator/Umrichter kennfeld mit Drehzahl= x-Wert, el.
Ausgangsleistung= y-Wert,

%Drehmoment= z-Wert

ze_M = ze.*xe.*ye*2*pi/60000;
[fitresultM_last, gofM_last] = fit([xe, ze_M], ye, ft, opts);

%Interpolation mit Drehzahl = x-Wert, el. Ausgangsleistung =
%y-Wert, Wirkungsgrad: z-Wert
[fitresultG_ETA, gofM_last] = fit([xg', zg_el'], yg', ft, opts);
```

Anhang 2: Simulationsmodell – Berechnung Kennlinie idealen Verbrauchs

%Berechnung der Kennlinie:

```
clear P_mech
clear ZE
clear ETA
clear dz
clear dm
clear c
clear Koeff
clear P_el
clear weite
clear toleranz
clear M_min
clear M_max
clear delta_M
clear Punkt
clear index
clear M_last
clear abw
clear n_opt
clear m_opt
clear M_voll1
clear n_interp
clear m_interp
clear M_interp
clear P_mech
clear ZE
clear ETA1
clear dz1
clear dm1
clear c1
clear Koeff1
clear P_el1
clear n_opt
clear m_opt
clear n_opt1
clear m_opt1
```

%Toleranz bei Berechnung der Leistung:
toleranz= 0.01;

%Rechenschrittweite:
weite = 100000;

%betrachtete Leistung (in kW):

%Leistung an Widerständen, Festlegung Leistungsstufen:

```
vsg=xlsread('VSG1.xls');
```

```
cc=1;

M_min = min(ye);

%Spalten (x-Richtung) sind Drehzahlen, Zeilen (y-Richtung) sind Drehmomente

for j=1:length(vsg);
    c=1;
    jj=vsg(j)/1000
    P_el(cc)=jj;

for ii=1500:10:3600
a=1;
ii;

    %Maximal mögliches Moment:
    MV = feval(cf_, ii);
    M_max = MV;
    delta_M= (M_max-min(ye))/weite;

    ZE = feval(fitresulte, ii, M_min:delta_M:M_max);
    ZG = feval(fitresultg, ii, M_min:delta_M:M_max);
    P_mech=((M_min:delta_M:M_max)*ii/60*2*pi/1000)';
    M_last= (M_min:delta_M:M_max)';

    Koeff = abs(1-ZE/jj.*P_mech);

    [value, index] = min(Koeff);

    if ~isempty(index) && value <= toleranz
        ETA(cc,c)= ZG(index);
        dz(cc,c)= ii;
        dm(cc,c)= M_last(index);
        abw(cc,c)=value;

        c=c+1;

    end

    a = a+1;

end
```

```
%Bestimmung der Kurve optimalen Verbrauchs:
[value1, index1] = max(ETA(cc,:));

m_opt(cc)=dm(cc, index1);
n_opt(cc)=dz(cc, index1);

index2 = find(dz(cc,:));
index3 = find(dm(cc,:));

plot_dz = dz(cc,index2);
plot_dm = dm(cc, index3);

figure(11)
plot(plot_dz, plot_dm)
hold on

cc=cc+1;

end

%Erstellung einer Volllastlinie:
n_voll= 1500:50:3600;
M_voll= feval(cf_, n_voll);

%Zeichnen der Volllastlinie:
plot(n_voll, M_voll, 'k', 'LineWidth', 2)
hold on

%Eckleistung bei Kurve optimalen Verbrauchs hinzufügen:
n_opt(cc) = 3600;
m_opt(cc) = M_max;

%Berechnung der entsprechenden elektrischen Leistung bei mech. Eckleistung:
ZE=feval(fitresulte, n_opt(cc), m_opt(cc));
P_el(cc)= m_opt(cc)*n_opt(cc)/60/1000*2*pi*ZE;
P_el_eck = P_el(cc);

%Einzeichnen der Kurve optimalen Verbrauchs
figure(11)
plot(n_opt, m_opt, 'r', 'LineWidth', 2)
hold on

%Einzeichnen der Kurve optimalen Verbrauchs
figure(11)
plot(n_opt, m_opt, 'g', 'LineWidth', 2)
hold on
```

Anhang 3: Simulationsmodell – Verbrauchsberechnung: Constant Speed ohne Start/Stop

```
profil=xlsread('LastprofileCS.xls');
t=xlsread('Zeitachse.xls');

%Variable Speed mit idealer Kennlinie:
%Verbrauchsmessung & Kennlinie:

clear P_mech;

%Interpolationstyp definieren:
ft_vsg= fitype('linearinterp');

%Interpolation des Drehmoments über konstante Drehzahl mit Linear-Fit
ok_vsg_moment = isfinite(P_el) & isfinite(m_opt);
cf_vsg_moment = fit(P_el(ok_vsg_moment)',m_opt(ok_vsg_moment)',ft_vsg);

[row col]=size(profil);

%for k=1:col
    werte = profil(:,1);

for i=1:length(werte)

    n_profil(i)=3600;

    if abs(werte(i))<=200
        M_profil(i)=1.285;

    else

        M_profil(i)=feval(fitresultM_last, 3600, werte(i)/1000);

    end

    ETAv_profil(i)=feval(fitresultv, n_profil(i), M_profil(i));
    me_profil(i)=360000/ETAv_profil(i)/45.4;
    P_mech(i)=n_profil(i)*M_profil(i)*2*pi/60000;
    l_h_profil(i)=P_mech(i)*me_profil(i)/830;

    i;

end
```

Anhang 4: Simulationsmodell – Verbrauchsberechnung: Constant Speed mit Start/Stop

```
profil=xlsread('LastprofileCS.xls');
t=xlsread('Zeitachse.xls');

clear P_mech;

%Interpolationstyp definieren:
ft_vsg= fitype('linearinterp');

%Interpolation des Drehmoments über konstante Drehzahl mit Linear-Fit
ok_vsg_moment = isfinite(P_el) & isfinite(m_opt);
cf_vsg_moment = fit(P_el(ok_vsg_moment)',m_opt(ok_vsg_moment)',ft_vsg);

[row col]=size(profil);

for k=1:col
    werte = profil(:,k);

    for i=1:length(werte)

        if abs(werte(i))<=200
            M_profil(i)=0;
            n_profil(i)=0;
            ETAv_profil(i)=0;
            me_profil(i)=0;
            P_mech(i)=0;
            l_h_profil(i)=0;

        else

            n_profil(i)=3600;
            M_profil(i)=feval(fitresultM_last, 3600, werte(i)/1000);
            ETAv_profil(i)=feval(fitresultv, n_profil(i), M_profil(i));
            me_profil(i)=360000/ETAv_profil(i)/45.4;
            P_mech(i)=n_profil(i)*M_profil(i)*2*pi/60000;
            l_h_profil(i)=P_mech(i)*me_profil(i)/830;

        end
    end

end

verbrauch_VSG = mean(l_h_profil)*t(length(t))/3600
Verbr_Matrix(:,k)=l_h_profil;

clear n_profil
clear M_profil
clear ETAv_profil
clear me_profil
clear P_mech
clear l_h_profil

end
```

```
clear werte
clear M_profil
clear n_profil
clear ETAv_profil
clear me_profil
clear P_mech
clear l_h_profil

xlswrite('Ergebnisse.xls', Verbr_Matrix);

clear Verbr_Matrix
```

Anhang 5: Simulationsmodell – Verbrauchsberechnung: Variable Speed ohne Start/Stop

```
profil=xlsread('Lastprofile.xls');
t=xlsread('Zeitachse.xls');

%Variable Speed mit idealer Kennlinie:
%Verbrauchsmessung & Kennlinie:

%Berechnung des spezifischen Verbrauchs:
clear P_mech

%Interpolation der Drehzahl der VSG-Kennlinie mit Linear-Fit
ok_vsg_drehzahl = isfinite(P_el) & isfinite(n_opt);
ft_vsg= fitttype('linearinterp');
cf_vsg_drehzahl =
fit(P_el(ok_vsg_drehzahl)',n_opt(ok_vsg_drehzahl)',ft_vsg);

%Interpolation des Drehmoments der VSG-Kennlinie mit Linear-Fit
ok_vsg_moment = isfinite(P_el) & isfinite(m_opt);
cf_vsg_moment = fit(P_el(ok_vsg_moment)',m_opt(ok_vsg_moment)',ft_vsg);

[row col]=size(profil);

for k=1:col
    werte = profil(:,k);

for i=1:length(werte)
    if abs(werte(i))<=200
        n_profil(i)=1500;
        M_profil(i)=1.418;
        ETAv_profil(i)=feval(fitresultv, n_profil(i), M_profil(i));
        me_profil(i)=360000/ETAv_profil(i)/45.4;
        P_mech(i)=n_profil(i)*M_profil(i)*2*pi/60000;
        l_h_profil(i)=P_mech(i)*me_profil(i)/830;
    else
        n_profil(i)= feval(cf_vsg_drehzahl, werte(i)/1000);
        M_profil(i)=feval(cf_vsg_moment, werte(i)/1000);
        ETAv_profil(i)=feval(fitresultv, n_profil(i), M_profil(i));
        me_profil(i)=360000/ETAv_profil(i)/45.4;
        P_mech(i)=n_profil(i)*M_profil(i)*2*pi/60000;
        l_h_profil(i)=P_mech(i)*me_profil(i)/830;
    end

    i;

end

verbrauch_VSG = mean(l_h_profil)*t(length(t))/3600
```

```
Verbr_Matrix(:,k)=l_h_profil;  
  
clear n_profil  
clear M_profil  
clear ETAv_profil  
clear me_profil  
clear P_mech  
clear l_h_profil  
  
end  
  
xlswrite('Ergebnisse.xls', Verbr_Matrix);  
  
clear werte  
clear M_profil  
clear n_profil  
clear ETAv_profil  
clear me_profil  
clear P_mech  
clear l_h_profil  
clear Verbr_Matrix
```

Anhang 6: Simulationsmodell – Verbrauchsberechnung: Variable Speed mit Start/Stop

```
profil=xlsread('Lastprofile.xls');
t=xlsread('Zeitachse.xls');

%Variable Speed mit idealer Kennlinie:
%Verbrauchsmessung & Kennlinie:

%Berechnung des spezifischen Verbrauchs:
clear P_mech

%Interpolation der Drehzahl der VSG-Kennlinie mit Linear-Fit
ok_vsg_drehzahl = isfinite(P_el) & isfinite(n_opt);
ft_vsg= fitttype('linearinterp');
cf_vsg_drehzahl =
fit(P_el(ok_vsg_drehzahl)',n_opt(ok_vsg_drehzahl)',ft_vsg);

%Interpolation des Drehmoments der VSG-Kennlinie mit Linear-Fit
ok_vsg_moment = isfinite(P_el) & isfinite(m_opt);
cf_vsg_moment = fit(P_el(ok_vsg_moment)',m_opt(ok_vsg_moment)',ft_vsg);

[row col]=size(profil);

for k=1:col
    werte = profil(:,k);

for i=1:length(werte)
    if abs(werte(i))<=200
        n_profil(i)=0;
        M_profil(i)=0;
        ETAv_profil(i)=0;
        me_profil(i)=0;
        P_mech(i)=0;
        l_h_profil(i)=0;
    else
        n_profil(i)= feval(cf_vsg_drehzahl, werte(i)/1000);
        M_profil(i)=feval(cf_vsg_moment, werte(i)/1000);
        ETAv_profil(i)=feval(fitresultv, n_profil(i), M_profil(i));
        me_profil(i)=360000/ETAv_profil(i)/45.4;
        P_mech(i)=n_profil(i)*M_profil(i)*2*pi/60000;
        l_h_profil(i)=P_mech(i)*me_profil(i)/830;
    end

    i;

end

verbrauch_VSG = mean(l_h_profil)*t(length(t))/3600
```

```
Verbr_Matrix(:,k)=l_h_profil;  
  
clear n_profil  
clear M_profil  
clear ETAv_profil  
clear me_profil  
clear P_mech  
clear l_h_profil  
  
end  
  
xlswrite('Ergebnisse.xls', Verbr_Matrix);  
  
clear werte  
clear M_profil  
clear n_profil  
clear ETAv_profil  
clear me_profil  
clear P_mech  
clear l_h_profil  
clear Verbr_Matrix
```