

Diesel-elektrischer Hybridantrieb für kommunale Arbeitsmaschinen

Prof. Dr.-Ing. Richard Zahoransky
Fakultät Maschinenbau
und Verfahrenstechnik (M+V)

Badstraße 24
77652 Offenburg
Tel.: 0781 205-255
E-Mail: zahoransky@hs-offenburg.de



1952: Geboren in Todtnau i. Schwarzwald

1972–1977: Studium des Maschinenbaus an der Universität Karlsruhe (TH)

Bis 1982: Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Thermische Strömungsmaschinen der Universität Karlsruhe

1982: Promotion an der Universität Karlsruhe

1982–1984: als Feodor-Lynen-Stipendiat der A.-v.-Humboldt-Stiftung Gastwissenschaftler an der Yale University, New Haven/Ct., USA

1985–1993: leitende Positionen in mittelständischen Unternehmen des Maschinenbaus in Spanien und Deutschland

Seit 1993: Professor für Energietechnik und Strömungsmaschinen an der Hochschule Offenburg, Fachbereich Maschinenbau

Seit 1998: Mitglied des Instituts für Angewandte Forschung (IAF) der Hochschule Offenburg

1998/99: Gastprofessor an der Yale University. Mitglied verschiedener Normenausschüsse

2000–2007: Gründer und Studiengangleiter des auslandsorientierten Master-Studiengangs „Energy Conversion & Management ECM“

Bis 2007: Geschäftsführer des Kuratoriums der Hochschule Offenburg

Seit 2007: Beurlaubt zur Geschäftsführertätigkeit in einem mittelständischen Unternehmen

Forschungsgebiete: Strömungsmaschinen, Energietechnik, Partikelmesstechnik, Partikel/Tropfen-Entstehung und Wachstum, Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik, Nanopartikel-Produktion

3.8 Diesel-elektrischer Hybridantrieb für kommunale Arbeitsmaschinen

Prof. Dr.-Ing. Richard A. Zahoransky
Prof. Dr.-Ing. habil Uwe Nuß
Dipl.-Ing. (FH) Frank Böhler
Dipl.-Ing. Julien Santoire
Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Dipl.-Ing. (FH) Bernd Guggenbühler

Die Koautoren Santoire und Geimer sind vom Institut MOBIMA des KIT/ Karlsruhe, Guggenbühler ist von der Fa. LADOG Fahrzeugbau & Vertriebs GmbH und Böhler ist in der Fa. Heinzmann GmbH & Co. KG.

Abstract

Several duty cycles have been performed with the LADOG multipurpose community vehicle (Fig. 3.8-1) equipped with a conventional diesel engine drive train. Based on these results, simulation calculations have been performed to estimate the fuel savings which can be achieved if this mobile machine would be equipped with a parallel diesel-electric hybrid drive train. Two hybrid configurations were considered, one with the original diesel engine and one with a right-sized, i.e. a smaller diesel engine. Several operation modes of the hybrid were simulated like start-stop function, recuperation, boosting and diesel engine operation for optimized fuel consumption (characteristic mapping).

The simulation results showed fuel savings up to 20 % even for this community vehicle which seemed not to be attractive for hybridization. This LADOG vehicle is actually modified by the hybrid drive train substituting the pure diesel drive train. The experimental proof of the simulations is under way.

Einleitung

Angepasste Hybridantriebe in mobilen Arbeitsmaschinen (off-highway Anwendungen) versprechen wegen der typischerweise auftretenden Lastzyklen mit ausgeprägten, häufigen und schnellen Laständerungen folgende Vorteile: gerin-

gerer Kraftstoffverbrauch, Einsatz eines Dieselmotors kleinerer Leistung, dadurch Erfüllung strikter werdender Emissionsvorschriften (TIER 4, EURO 5) ohne oder mit reduzierter Abgasnachbehandlung, Lärmreduktion, weitere Einsparpotenziale durch Elektrifizierung der Fahrzeugfunktionen möglich (Erhöhung des Hybridisierungsgrads), höhere Produktivität durch höhere Antriebsdynamik.

In diesem Projekt haben die Unternehmen HEINZMANN, LADOG sowie die Hochschule Offenburg und das KIT in Karlsruhe kooperiert. Die Partner verfügen über die notwendige Erfahrung der hier involvierten verschiedenen ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen wie Fahrzeugtechnik, Verbrennungsmotoren, elektrische Maschinen, Inverter, Steuer- und Regelungstechnik sowie Batteriesysteme.

In diesem Projekt verantwortete Heinzmann das Gesamtsystem und entwickelte die E-Maschine, die Systemsteuerung sowie die Software für den Hybridantrieb. LADOG stellte das Fahrzeug, Abb. 3.8-1, als Versuchsträger zur Verfügung. Der Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen MOBIMA des KIT führte die Simulationsrechnungen durch. Das Labor für elektrische Antriebe und Leistungselektronik der Hochschule Offenburg lieferte den Inverter.



Abb. 3.8-1: Kommunalfahrzeug LADOG, ausgerüstet mit parallelem diesel-elektrischem Hybridantrieb von Heinzmann

Paralleler diesel-elektrischer Hybrid für mobile Arbeitsmaschinen

Die elektrische Maschine wird bei diesem Hybrid ohne eigene Lagerung direkt auf die Kurbelwelle des Dieselmotors montiert und ersetzt in manchen Fällen das Schwungrad, Abb. 3.8-2. Dadurch wird der Hybridmotor allenfalls geringfügig, z. B. um ca. 50 mm, länger als der reine Dieselmotor, bzw. mit einem leistungsschwächeren Dieselmotor wird er sogar kürzer.

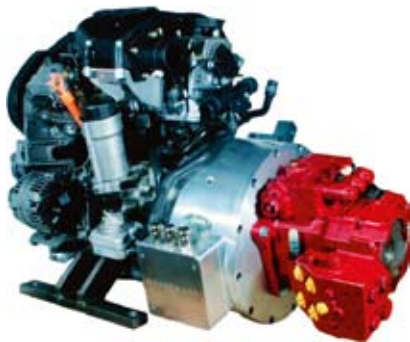


Abb. 3.8-2: HEINZMANN E-Maschine mit Hydraulikpumpe als Parallelhybrid-Aggregat mit VW Industriemotor

Damit passt er ohne nennenswerte Umkonstruktionen in vorhandene Arbeitsmaschinen wie in Abb. 3.8-3.



Abb. 3.8-3: Multifunktionaler Bagger MECA-LAC, ausgerüstet mit Hybrid von Heinzmann

Deshalb ist dieser Hybridtyp derzeit am populärsten für mobile Arbeitsmaschinen. Die elektrische Maschine hat vier Funktionen:

- Boost: Die elektrische Maschine deckt geforderte Lastspitzen ab
- Generator: Bei geringen Lastanforderungen wird die E-Maschine auf Generatormodus umgeschaltet und lädt die Batterie
- Regeneration: Ebenso arbeitet sie als Generator, um die Energie beim Bremsen zu nutzen

- Starter: Der E-Motor erlaubt eine effiziente Start-Stopp-Funktion mit Schnellstart des Dieselmotors in 150 bis 300 ms. In Leerlaufphasen kann also abgeschaltet werden

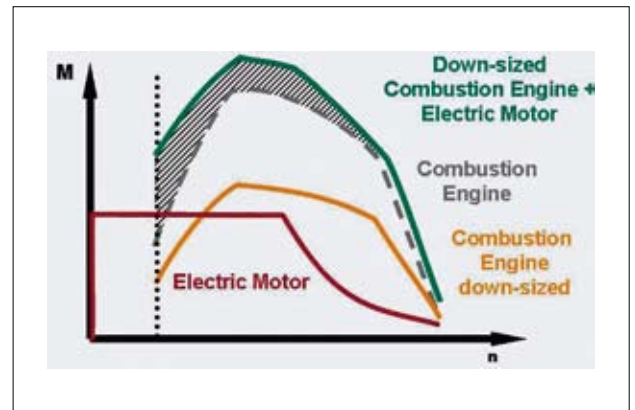
Systemüberblick

Der prinzipielle Aufbau des Parallelhybrid-Systems mit folgenden Komponenten ist in [1] erläutert:

- Elektrische Maschine (Motor, Generator und Starter)
- Hybridsystem-Steuergerät zur Umsetzung der Hybridstrategie
- Diesel-Steuergerät, das den Dieselmotor regelt
- Inverter: Drehzahl-/Drehmoment-Steuerung für die bürstenlose E-Maschine
- DC/DC Konverter: Wandelt die hohe Busspannung des Hybridsystems mit Batterie in die On-board Spannung

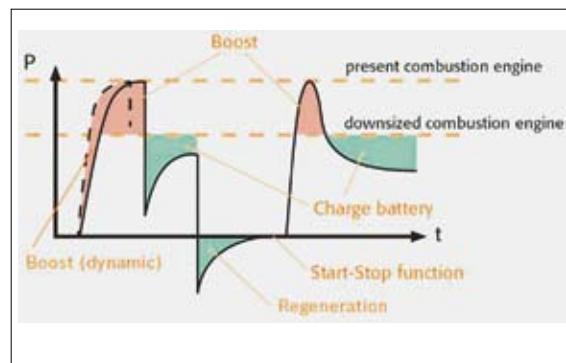
Drehmomentverhalten

Die E-Maschine im Hybridantriebsstrang liefert ein weiteres Drehmoment, was einen kleineren Dieselmotor mit geringerer Leistung einzusetzen erlaubt („right-sizing“ oder „down-sizing“ des Verbrennungsmotors). Abbildung 3.8-4 zeigt die Momentenüberlagerung. Es ergeben sich große Vorteile bei geringen Drehzahlen. Das Lastprofil (abverlangte Leistung) über der Zeit, Abb. 3.8-5, visualisiert eine mögliche Steuerung des Parallelhybrids. Hierbei wird der Dieselmotor idealisiert mit konstanter Last gefahren, was eine von mehreren Hybridstrategien ist.



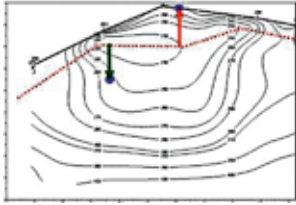
- Drehmoment $M(n)$ des Elektromotors
- Drehm. $M(n)$ des kleineren Dieselmotors (right-sized bzw. down-sized)
- $M(n)$ des ursprünglichen Dieselmotors
- $M(n)$ des Hybridmotors (Addition der $M(n)$ von Elektro- und kl. Dieselmotor)

Abb. 3.8-4: Drehmomentdarstellung des parallelen Hybridantriebs in Abhängigkeit der Drehzahl n



- E-Maschine im Motorbetrieb (Boost)
- E-Maschine im Generatorbetrieb (Batterieladung)

Abb. 3.8-5: Hybridfahrweise zur Abdeckung des geforderten Lastprofils



• Geforderter Betriebspunkt

↓ Batterieladung Generatorbetrieb

↑ Boost Motorbetrieb

Abb. 3.8-6: Hybridstrategie für optimalen Kraftstoffverbrauch

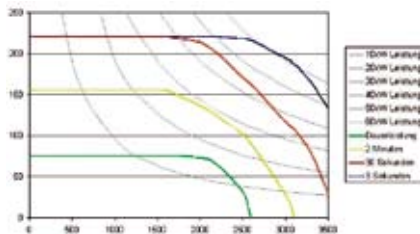


Abb. 3.8-7: Drehmomentverhalten der E-Maschine von Heinzmann mit 15 kW Nennleistung (Dauerleistung S1)

Alternativ kann eine konstante Drehzahl des Dieselmotors (Phlegmatisierung) vorgegeben werden oder eine drehzahlabhängige Leistungssteuerung des Dieselmotors für jeweils geringsten Verbrauch oder geringste Emissionen (Kennfeldsteuerung). Der Dieselmotor wird wie Abbildung 3.8-6 bei jeder Drehzahl mit geringstem Verbrauch gefahren, wobei die E-Maschine jeweils „boostet“ oder die Batterie lädt.

Auslegung der Elektromaschine

Elektrische Maschinen werden i. a. nach ihrer Dauerleistung (S1 Betrieb) kategorisiert – diese hängt von der zulässigen Sator/Rotor-Temperatur ab. Die E-Maschine läuft nicht permanent, wie Abbildung 3.8-5 veranschaulicht. Die Boost- und Regenerationsphasen dauern nur kurze Zeit im Sekundenbereich. Deshalb ist eher das Kurzzeitverhalten der E-Maschine, also deren Überlastfähigkeit, von Interesse, Abb. 3.8-7.

Das Kennfeld der in Abb. 3.8-7 dargestellten bürstenlosen DC-Maschine mit 15 kW Dauerleistung kann für 3 Sekunden bei 60 kW bei einer Drehzahl von

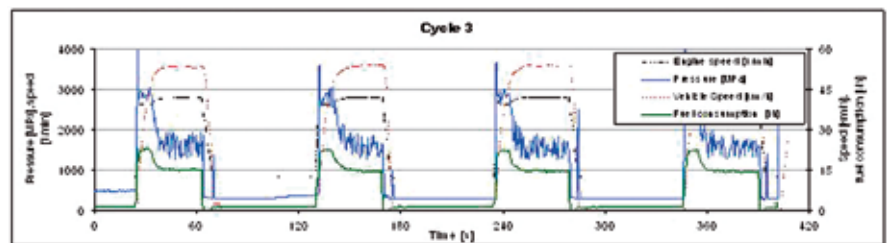
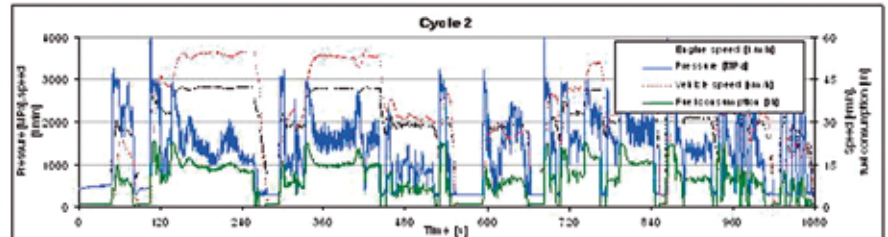
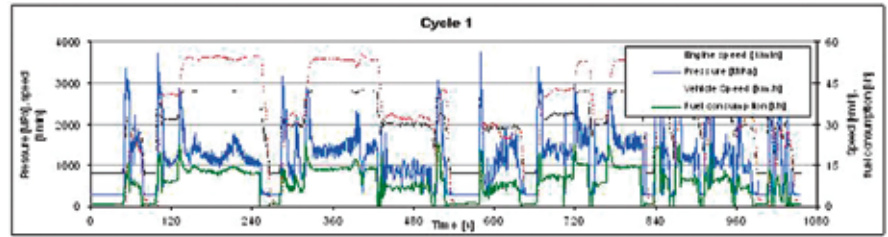


Abb. 3.8-8: Messwerte von drei verschiedenen Arbeitszyklen

3.000 min^{-1} betrieben werden. Für zwei Minuten sind im Drehzahlband 1500 bis 2500 min^{-1} nahezu 30 kW möglich. Die Wirkungsgrade liegen deutlich über 90%.

Batteriegröße

Es wurde eine Batterie mit 125 LiFePO4 Zellen gewählt, um eine Spannung von 400 V zu erzielen. Diese oder noch höhere Spannungen setzen sich für mobile Arbeitsmaschinen durch [2]. Aus den Lastprofilen, z. B. Abb. 3.8-5, kann die minimal notwendige Batteriekapazität abgeleitet werden. Die integrierte Boostleistung über der Zeit (Fläche im P-t-Diagramm von Abb. 3.8-5) und das entsprechende Ladungs/Rekuperations-Integral repräsentieren die notwendige Batteriekapazität. Diese Energien müssen von der Batterie abgebar oder aufnehmbar sein. Da bei mobilen Arbeitsmaschinen die Lastzyklen sehr schnell sowie die Boost- und Rekuperationszeiten sehr kurz sind, ist die Batterie lediglich „Mikrozyklen“ ausgesetzt. Deshalb kann eine Batterie mit geringer Kapazität gewählt werden, z. B. 4,5 Ah bei 400 V.

Zielsetzung und Testfahrten

Zielsetzung der Simulation ist die Abschätzung des Potenzials der Kraftstoffreduktion. Als Versuchsträger dient der Antriebsstrang eines Mehrzweck-Kommunalfahrzeugs der Fa. LADOG Fahrzeugbau und Vertriebs GmbH, Abb. 3.8-1. Das originale Fahrzeug ist mit einem 72-kW Dieselmotor ausgerüstet. Das hybridisierte Fahrzeug – dessen Betrieb bisher nur simuliert wurde – ist zum Vergleich mit einem Parallelhybrid ausgestattet. Bei den Testfahrten wurden verschiedene Daten wie Fahrzeug- und Motorgeschwindigkeit, der Kraftstoffverbrauch und Druck der Hydraulik dokumentiert. In Abb. 3.8-8 sind einige der aufgenommenen Arbeitszyklen wiedergegeben.

Simulationen

Mit Matlab Simulink wurden die Fahrzyklen mit und ohne Hybrid simuliert. Hierbei bildeten die Wirkungsgradkennfelder für Dieselmotor und Elektromaschine die Grundlage. Mechanische Übertragungsglieder wurden zusammengefasst. Tabelle 1 zeigt die Grunddaten.

Beschreibung	Einh.	Wert
Fahrzeuggewicht	kg	2.950 Zyklus 1
		4.600 Zyklus 2
		2.800 Zyklus 3
Dieselmotorleistung (konventionell)	kW	72
Dieselmotorleistung (right sized)	kW	42
Motorleistung	kW	30
Spitzengeschwindigkeit	km/h	53,5

Tabelle 1

In der Simulation fanden verschiedene Antriebskonfigurationen und Betriebsstrategien („Konfigurationen“) Berücksichtigung. Der Dieselmotor wurde bei minimalem Kraftstoffverbrauch simuliert (Abb. 3.8-6). Nächste Simulationsschritte waren Start-Stopp-Funktion und Rekuperation der Bremsenergie. Betrachtung fanden einmal der ursprüngliche Diesel mit 72 kW und der kleinere (right sized) mit 42 kW Leistung. Die E-Maschine hat 15-kW-S1-Leistung.

Konfiguration	Diesel =72 kW	Diesel =42 kW	Maximaler Wirkungsgrad	Start-Stopp	Rekuperation	Kraftstoffersparnis [%]		
						Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3
Konventionell (gemessen)	x					0,0	0,0	0,0
Hybrid 1	x	x				0,2	0,3	0,4
Hybrid 2	x	x	x			3,1	3,4	9,8
Hybrid 3	x	x	x	x		5,7	5,3	13,4
Hybrid 4		x	x			16,7	14,6	15,7
Hybrid 5		x	x	x		19,0	15,5	19,0
Hybrid 6		x	x	x	x	21,6	17,6	22,8

Tabelle 2: Simulationsergebnisse

Tabelle 2 gibt den Überblick über den Kraftstoffverbrauch bei den verschiedenen Konfigurationen und Lastzyklen. Das Kommunalfahrzeug verspricht ein beträchtliches Kraftstoffeinsparpotenzial von über 20 %. Die Tabelle 2 zeigt aber auch, dass gewisse Konfigurationen nur geringe Spareffekte aufweisen. Die Verkleinerung des Dieselmotors (right-sized) ergibt unter allen Maßnahmen den höchsten Wirkungsgradsprung. Die durch den Parallelhybrid mögliche Elektrifizierung der Hilfs- und Nebenaggre-

gate (Kühlgebläse, Wasserkühlpumpe, Klimakompressor) wurde bei den Simulationen noch nicht berücksichtigt.

Referenzen

- [1] Böhler F. und Zahoransky R., Hybridantriebe für industrielle Anwendungen, in: 2. Fachtagung Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 18.02.2009 in Karlsruhe, S. 13 – 23
- [2] Harms H.H. (Herausgeber), 400 V auf der mobilen Arbeitsmaschine – wird die Elektrik zu einer ernst zu nehmenden Konkurrenz?, Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der TU Braunschweig, Braunschweig 2009

Danksagung

Die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Rahmen des Programms „Förderung der Erhöhung der Innovationskompetenz mittelständischer Unternehmen“ (PRO INNO II), Förderkennzeichen KF0592901LK7 wird dankend erwähnt.