

# NEUE ENERGIEN 2020

## Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

07/07/2014

## Projekttitlel:

Gesamtsystemoptimierung eines Parallelhybrid-  
Antriebsstrangs für den Non-Road-Einsatz

Projektnummer: 829822

# Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	4. Ausschreibung NEUE ENERGIEN 2020
Projektstart	01/03/2011
Projektende	31/03/2014
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	37 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz (TUG)
AnsprechpartnerIn	Univ.-Prof. Dr. Helmut Eichlseder
Postadresse	Inffeldgasse 19, 8010 Graz
Telefon	+43 316 873-30001
Fax	+43 316 873-30002
E-mail	eichlseder@ivt.tugraz.at
Website	www.ivt.tugraz.at

# Gesamtsystemoptimierung eines Parallelhybrid- Antriebsstrangs für den Non-Road-Einsatz

GPA-NonRoad

**AutorInnen:**

P. Grabner, C. Hepp, W. Monschein (TUG)

J. Unger (TUW)

C. Kiegerl (LBH)

K. Schneider (LWN)

W. Rossegger (KS)

M. Quasthoff (LMB)

## 1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis .....	4
2	Einleitung .....	5
3	Inhaltliche Darstellung .....	6
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	7
5	Ausblick und Empfehlungen .....	9
6	Literaturverzeichnis .....	10
7	Kontaktdaten .....	11

## 2 Einleitung

### Aufgabenstellung

Der Fokus dieses Projektes liegt auf der Darstellung eines Hybridantriebssystems für Non-Road-Anwendungen unter Berücksichtigung erweiterter und alternativer Verbrennungskonzepte sowie Einsatzspezifischer Anforderungen. Das Projekt beinhaltet die Modellierung der Batterie und die Entwicklung eines adaptiven Energiemanagementsystems. Abschließend wird ein auf den Ergebnissen der vorausgegangenen Arbeitspakete basierender Hybridantrieb an einem Prüfstand zwecks Validierung und Optimierung des Gesamtsystems aufgebaut. Wesentliches Ziel ist eine Optimierung hinsichtlich Effizienz, Emissionen und Kosten.

### Schwerpunkte des Projektes

Schwerpunkte sind alternative und neue Verbrennungskonzepte für den Dieselmotor eines Hybridantriebs, die Entwicklung eines Batteriemodells zur Ladezustandsschätzung, die Entwicklung von Betriebsstrategien für den Hybridantrieb sowie Vermessung bzw. Validierung und auch Anpassung der vorausgelegten Betriebsstrategien am Hybridantriebsprüfstand.

### Einordnung in das Programm

Energieeffiziente Fahrzeugkomponenten und -systeme, Industrielle Forschung (IF)

### Verwendete Methoden

Simulationsmethoden

- Matlab/Simulink (Batteriemodellierung, Betriebsstrategiemodellierung)
- SiL-Umgebung inkl. Längsdynamik-Simulationsmodell
- Brennverfahrenoptimierung mittels DoE
- 1D-Ladungswechselsimulationsrechnung

Prüfstandsuntersuchungen am Einzylindermotor

- Alternative Brennverfahren
- Hoch-, Nieder- und Null-AGR-Brennverfahren
- Untersuchungen von Düsenspritzlochgeometrien

Prüfstandsuntersuchungen am Hybridantrieb

- Betriebsstrategie durch modellprädiktive Regelung
- Regelbasierte Betriebsstrategie

### Aufbau der Arbeit

Die Arbeiten sind in folgende Arbeitspakete unterteilt:

- 1 Projekt-Management und wissenschaftliche Koordination
- 2 Verbrennungsentwicklung am Einzylindermotor
- 3 Erhebung der Anforderungen an den Antrieb hinsichtlich Dynamik

- 4 Entwicklung eines echtzeitfähigen generischen Batteriemodells sowie der Methodik zur automatischen Identifizierung der Modellparameter
- 5 Modellbasierte Funktionsentwicklung: Generisches Energiemanagement mit Zyklenprädiktion
- 6 Applikation des Hybrid-Antriebes am Prüfstand
- 7 Recherche und Dissemination

## 3 Inhaltliche Darstellung

Ausgangssituation war die mit Euro Stage IV bzw. Tier 4 2013/2014 in Kraft getretene Emissionsgesetzgebung für Non-Road-Dieselmotoren, wodurch hohe Anforderungen zur Einhaltung der festgelegten Abgasgrenzwerte gestellt wurden. Die Hybridisierung kann ein geeignetes Mittel darstellen, um gleichermaßen eine Reduzierung der Schadstoffemissionen sowie des Kraftstoffverbrauches zu erreichen, obwohl es sich eigentlich bei diesen beiden Minderungen um einen Zielkonflikt handelt. Um bezüglich der Gesamtsystemkosten wettbewerbsfähig zu bleiben, ist jedoch eine Reduktion oder aber zumindest eine Vereinfachung des Dieselmotors inkl. der Abgasnachbehandlung erforderlich.

Zusammengefasst beinhaltet das Forschungsvorhaben folgende Umfänge:

### Verbrennungsentwicklung (AP 2):

In einem ersten Schritt wurden alternative und konventionelle Verbrennungskonzepte durch Untersuchungen an einem Einzylindermotor bewertet und in weiterer Folge für die Übertragung auf einen Vollmotor vorbereitet. Als wesentlicher Inhalt war dabei die Anwendung und Bewertung von Verbrennungskonzepten zu sehen, die erst in einem Hybridantrieb sinnvoll einsetzbar werden (z.B. aufgrund einer möglichen Eingrenzung der genutzten Betriebsbereiche und der Phlegmatisierung des Dieselmotors).

### Anforderungsanalyse (AP 3):

Damit das Gesamtkonzept allgemein auf mobile Arbeitsmaschinen anwendbar ist, müssen die an den Non-Road-Hybridantrieb gestellten Anforderungen vollständig bekannt sein. Daher wurden Lastzyklen von verschiedenen Zielgeräten erhoben. Des Weiteren erfolgte eine Bewertung des Kraftstoff-Einsparungspotentials eines diesel-elektrischen Hybridantriebs mit Hilfe von Simulationsrechnungen.

### Batteriemodellierung für Non-Road-Bereich (AP 4):

Es erfolgte eine Entwicklung von echtzeitfähigen Batteriemodellen für die spezifischen Einsatzbedingungen des Non-Road-Bereiches, welche zum Betrieb des Batteriesimulators zur späteren Realisierung reproduzierbarer Prüfstandsläufe des Gesamtsystems und innerhalb des Energiemanagementsystems (EMS) benötigt wurden.

### Modellbasierte Funktionsentwicklung, adaptives Energiemanagement (AP 5):

Damit die im Hybridantrieb vorhandenen Freiheitsgrade optimal genutzt werden können, muss die gesamte Wirkungsgradkette berücksichtigt werden. Hierzu ist ein modellprädiktives und generisches Energiemanagementsystem nötig, dass in diesem Arbeitspaket entwickelt wurde. Zwei wesentliche

Bestandteile waren hierbei die kaskadierte Regelung und die Methodenentwicklung zur Prädiktion von zyklischen als auch kurzfristigen Lastanforderungen.

### Applikation Hybrid-Antrieb, Validierung Gesamtsystem (AP 6):

Abschließend erfolgte eine Konzeptabsicherung durch den Aufbau des gesamten diesel-elektrischen Hybridantriebs an einem Prüfstand.

Das innerhalb dieses Forschungsvorhabens entwickelte und optimierte Gesamtkonzept kann in einem Folgeprojekt in einem Zielgerät angewendet werden, sodass ein Funktionsträger für weitere Untersuchungen zur Verfügung steht.

## **4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

### AP 2:

Die Untersuchungen am Einzylindermotor lassen erkennen, dass der Einsatz eines Dieselmotors, der mit einem alternativen Dieselmotoren betrieben wird, in einem diesel-elektrischen Hybridantrieb unter Betrachtung der verbleibenden notwendigen Lastabdeckung und der Forderung nach Energieeffizienz überhaupt nicht erfolgversprechend ist. Durch homogene Dieselmotoren können entweder die notwendigen Lastbereiche nicht dargestellt werden, um ihre reduzierten Rohemissionen auch auf einen Abgasgesetzgebungszyklus zu übertragen oder es ergibt sich ein erheblicher Kraftstoffmeherverbrauch. Der Einsatz dieser Brennvorgänge am vollständigen Antriebsstrang ist nicht sinnvoll.

Anstelle dessen wurde für die Analyse der konventionellen Dieselmotoren eine Spritzlochmatrix für die Dieselinjektoren entworfen. Diese wurde in Kombination mit Hoch-, Nieder- und Null-AGR(Abgasrückführung)-Brennvorgängen bewertet. Somit konnten fundierte Analysen zum Thema Gemischbildung und Verbrennung realisiert werden. Es wurde ein Null-AGR-Brennvorgang gewählt, da ein Kostenvorteil für den Endkunden und eine für den Non-Road-Einsatz sehr wichtige erhöhte Motordynamik erwartet wird, sowie die erforderliche Reduktion der Stickoxidemissionen technisch realisierbar ist. Insgesamt zeigt sich hier ein NO<sub>x</sub>-Reduktionspotential von ca. 1 g/kWh, bei einer gesamten Rohemission von 9 g/kWh, durch die Verwendung unterschiedlicher Spritzlochgeometrien an verschiedenen Lastpunkten.

### AP 3:

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgten von den beteiligten Liebherr-Werken Felddatenerfassungen – an mit jeweils konventionellem Dieselmotor betriebenen mobilen Arbeitsmaschinen – bei Kundeneinsätzen, Analysen der Messsignale, Auswahl von typischen Zyklen und Aufbereitung der Daten zum Einsatz in Simulationen und Prüfstandstests. Seitens LBH wurden dafür Feldmessdaten mit Radladern der neuen Gerätegeneration erhoben, die mit einem reduzierten Drehzahlniveau des Dieselmotors betrieben werden, um diese Auswirkungen auf das Betriebsverhalten bei der Entwicklung des Hybridantriebs mit berücksichtigen zu können.

Des Weiteren wurden mit den erhobenen Messdaten Potentialabschätzungen durchgeführt, um das Kraftstoff-Einsparungspotential eines Hybrid-Antriebsstrangs bei entsprechend darauf optimierter Betriebsführung gegenüber einem konventionellen Antrieb bewerten zu können.

Von LWN wurden ebenfalls Feldmessdatendaten von Reachstackern erhoben, um weitere typische Zyklen von einer anderen Anwendung für mobile Arbeitsmaschinen nutzen zu können.

### AP 4:

Als Modellstruktur konnte in AP 4 ein lokales Modellnetzwerk erarbeitet werden, welches sehr gute Übereinstimmung zum realen Verhalten der Batteriezellen liefert. Im ersten Projektabschnitt wurde gezeigt, dass eine hochdynamische Anregung der Zellen für die Identifizierung des Zellmodells notwendig ist. Folglich sind für die Messungen an Batteriezellen hohe Sampling-Raten erforderlich. Im zweiten Projektabschnitt wurde nachgewiesen, dass die entwickelte Methodik der Messung und Modellierung von Batteriezellen zu Modellen von Batteriesystemen mit sehr hoher Qualität führen. Das Modell kann ebenfalls für die Ladezustandsschätzung der Batterie verwendet werden.

### AP 5:

In AP 5 wird das in AP 3 erstellte Modell des diesel-elektrischen Parallel-Hybrid-Antriebsstrangs für das vorgesehene modellprädiktive Regelverfahren weiterverwendet. Alle Komponenten des Antriebs werden im Regelungskonzept berücksichtigt, indem ihr Systemverhalten inklusive der bestehenden Randbedingungen abgebildet werden, damit der Regelung die Stellgrößen derart vorgegeben werden, wie es für eine optimierte Betriebsführung erforderlich ist. Des Weiteren konnten neue Ansätze für die Zyklen- und Lastprädiktion erarbeitet werden, deren Einbeziehung eine bestmögliche Ausnutzung des Energiespeichers und eine robuste Kompensation von Störungen ermöglicht. Die Messungen am Prüfstand unter Nachbildung realer Einsatzbedingungen zeigten das Einsparungspotential des Kraftstoffverbrauchs sowie das Reduktionspotential bei Roh-Emissionen auf.

### AP 6

Unter AP 6 fallen sämtliche am Prüfstand durchgeführte Arbeiten. Auch die Arbeiten seitens der Prüfstandtechnik, sowie die Installationen und Inbetriebnahmen der neuen Prüfstands-Hardware sowie der Messtechnik. Zur Durchführung reproduzierbarer Prüfstandstests ist ein Betrieb des Hybridantriebs unter Nutzung eines Batteriesimulators erforderlich.

Zur Generierung der für die Erstellung des Längsdynamik-Simulationsmodells benötigten Messdaten wurden der Dieselmotor, der Startergenerator (ISG) inkl. Inverter wie auch die Batterie dafür einzeln am Prüfstand aufgebaut und mittels stationären wie auch dynamischen Tests vermessen. Des Weiteren erfolgte das Vermessen im konventionellen, rein dieselmotorischen Betrieb durch Beaufschlagung durch die in AP 3 erhobenen realen Radlader-Zyklen. Diese Ergebnisse stellten die Bewertungsreferenz dar. Inbetriebnahme und Bewertung des Hybridantriebs mittels dynamischer Messungen erfolgten in der letzten Projektphase. Für den Betrieb des gesamten Hybridantriebs war die Nutzung eines integrierten Rapid-Prototyping-Systems (RPS) in einer Hardware-in-the-Loop(HiL)-Prüfstands Umgebung erforderlich. Im Prüfbetrieb erfolgte die Regelung des Hybridantriebs über die im RPS hinterlegten, in AP 3 und in AP 5 entwickelten Energiemanagementsysteme (EMS\_TUG bzw. EMS\_TUW), die auf unterschiedlichen Ansätzen beruhen und verschiedene Betriebsstrategien beinhalten. Insgesamt wurden 20 verschiedene Zyklen mit unterschiedlichen Hybrid-Betriebsstrategien vermessen. Anhand der gewonnenen Ergebnisse aus realen Radlader-Zyklen sowie des transienten Gesetzgebungszyklus (NRTC) wurden die

unterschiedlichen Betriebsstrategien dann hinsichtlich Stabilität der Betriebsführung, Kraftstoffverbrauch sowie Emissionen bewertet.

## 5 Ausblick und Empfehlungen

### AP 2:

- Durch Änderung der Spritzlochgeometrie der Dieselinjektoren, innerhalb der Bandbreite von gegenwärtig in Serienproduktion herstellbaren Möglichkeiten kann eine Reduktion der Stickoxid-Rohemissionen erreicht werden.
- Sonderformen bei der Spritzlochgeometrie zeigen ein weiteres Reduktionspotential auf. Dieses ist zu gering, um den Mehraufwand bei den derzeitigen Herstellungsverfahren zu rechtfertigen.
- Homogene monovalente Brennverfahren mit Diesel sind für den Einsatz durch geringe darstellbare Last nicht sinnvoll.

### AP 3:

Nur durch Kenntnis der realen Betriebsbedingungen wurde es möglich die Anforderungen hinsichtlich Dynamik, die an einen Antrieb in mobilen Arbeitsmaschinen gestellt werden, zu ermitteln. Durch diese Kenntnis wurde es möglich bei der Entwicklung der Hybrid-Betriebsstrategie das gesamte Kraftstoffeinsparpotential auszuschöpfen und zwar bei geforderter gleichbleibender Betriebsstabilität seitens des Antriebs. Eine Offline-„Vorab“-Optimierung wurde mittels Simulationen in der dafür entwickelten echtzeitfähigen Software-in-the-Loop(SiL)-Umgebung durchzuführen. Die SiL-Umgebung inkl. Längsdynamik-Simulationsmodell soll in weiterer Folge noch mit den Ergebnissen der Prüfstands-Untersuchungen validiert werden, um zukünftig für weitere Topologie-Untersuchungen von Hybridantriebs-Konzepten genutzt werden zu können.

### AP4:

Die in AP4 entwickelte Methodik zeigt, dass echtzeitfähige Batteriemodelle möglich sind und weitere Anwendungen damit aufgebaut werden können. Als Beispiel kann die Alterungszustandsschätzung von Batterien genannt werden, die ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Nutzung von Traktionsbatterien in Hybrid- oder Elektrofahrzeugen, aber auch bei selbstfahrenden Transportsystemen, hat.

### AP5:

Das entwickelte modellprädiktive Regelungskonzept konnte am Prüfstand implementiert und getestet werden. Die dabei erzielten Ergebnisse, nämlich reduzierte Kraftstoffverbräuche und Roh-Emissionen (mit Ausnahme Stickoxide), versprechen eine gute Basis für die Weiterverwendung des Ansatzes. Speziell die Ansätze für die Zyklen- und Lastprädiktion können auch für bestehende/konventionelle, rein dieselmotorische Antriebe adaptiert werden, wodurch ein breites Verwendungsspektrum ermöglicht wird.

## AP 6:

Mit der geschaffenen und entsprechend der vorliegenden Anforderungen permanent angepassten Prüfstandsumgebung konnten bei allen Messreihen belastbare sowie reproduzierbare Ergebnisse generiert werden, mit welchen die abschließende Gesamtbewertung des diesel-elektrischen Parallel-Hybridantriebs ermöglicht wurde. Speziell die dynamischen Untersuchungen des unter Anwendung der unterschiedlichen Energiemanagementsysteme (EMS\_TUW und EMS\_TUG) betriebenen Hybridantriebs durch Beaufschlagung durch hochdynamische, reale aus den Feldversuchen stammenden Zyklen zeigten, dass die Betriebsstabilität gewährleistet werden kann, dass ein Kraftstoffeinsparungspotential vorhanden ist, und dass die gesetzlichen Emissionslimits auf jeden Fall eingehalten werden. Je nach Betriebsführung des diesel-elektrischen Hybridantriebs ist das Abgastemperaturniveau im Vergleich zum reinen Dieselmotorbetrieb höher. Ein höheres Temperaturniveau kann bei der Umsetzung der Schadstoffe im Abgas mittels Abgasnachbehandlung, speziell bei Zyklen mit niedrigem Lastkollektiv, Vorteile mit sich bringen. Dem nächsten Schritt, einer Verwendung des entwickelnden Gesamtsystems – des diesel-elektrischen Hybridantriebs – in einem Non-Road-Prototypen-Fahrzeug für weitere Untersuchungen steht damit aus technischer Sicht nichts im Wege.

## 6 Literaturverzeichnis

### Publikationen auf Konferenzen:

12<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Robotics, Control and Manufacturing Technology 2012:  
*Local model network based dynamic battery cell model identification*  
C. Hametner, J. Unger und S. Jakubek,

5. Fachtagung Baumaschinentechnik 2012 – Energie, Mechatronik, Simulation  
*Entwicklungsmethodik eines generischen Batterie-Simulationsmodells und dessen Einsatzmöglichkeiten*  
M. Quasthoff, J. Unger

IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railways, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS 2012 Edition)  
*Optimal Model Based Design of Experiments Applied to High Current Rate Battery Cells*  
J. Unger, C. Hametner, S. Jakubek und M. Quasthoff

WKM-Symposium 2014, RWTH Aachen University:  
*Entwicklung und Optimierung einer Betriebsstrategie für ein Parallel-Hybrid-Antriebskonzept für Non-Road-Anwendungen*  
W. Monschein

9. Tagung "Diesel- und Benzindirekteinspritzung" (03.–04.12.2014, Berlin)  
*Effekte von konventionellen und unkonventionellen Düsengeometrien auf die dieselmotorische Verbrennung*  
C. Hepp, J. Wasserbauer, H. Eichlseder, M. Quasthoff, A. Pfeifer und A. Preis

Antriebstechnisches Kolloquium (ATK) 2015, RWTH Aachen  
*Innovatives Energiemanagementsystem mit modellbasiertem Regler und Lastprädiktion für den Off-road-Einsatz*  
J. Unger, M. Quasthoff

## Journalpublikationen:

In Press: Journal of Power Sources (2014, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.07.025)

*A novel methodology for non-linear system identification of battery cells used in non-road HEV*

J. Unger, C. Hametner, S. Jakubek und M. Quasthoff

Eingereicht in: Control Engineering Practice (26. Juni 2014):

*Nonlinear model predictive energy management controller with load and cycle prediction for non-road HEV*

J. Unger, M. Kozek und S. Jakubek

## 7 Kontaktdaten

### **A: Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz (TUG)**

vertreten durch

Univ.-Prof. Dr. Helmut Eichlseder

Inffeldgasse 19, 8010 Graz

Tel. +43 316 873-30001

Fax +43 316 873-30002

eichlseder@ivt.tugraz.at

www.ivt.tugraz.at

### **Auflistung der weiteren Projekt- bzw. Kooperationspartner:**

#### **P1: Institut für Mechanik und Mechatronik, Arbeitsgruppe Regelungs-technik und Prozessautomatisierung, Technische Universität Wien (TUW)**

vertreten durch

Univ.-Prof. Dr. Stefan Jakubek

stefan.jakubek@tuwien.ac.at

01 / 58801-325510

Wiedner Hauptstrasse 8-10/E325

1040 Wien

#### **P2: LIEBHERR-Werk Bischofshofen GmbH (LBH)**

vertreten durch

Dr.-Ing. Herbert Pfab

herbert.pfab@liebherr.com

050 / 809-11444

Dr.-Hans-Liebherr-Straße 4

5500 Bischofshofen

## Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

### **P3: LIEBHERR-Werk Nenzing GmbH (LWN)**

vertreten durch

Dr. Klaus Schneider  
K.Schneider@liebherr.com  
050 / 809-41-0  
Dr. Hans Liebherr Straße 1  
6710 Nenzing

### **P4: Kristl, Seibt & Co GmbH (KS)**

vertreten durch

Dr. Wilfried Rossegger  
wilfried.rossegger@ksengineers.at  
0316 / 5995-1073  
Baierstr. 122a  
8052 Graz

### **P5: Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH (FVT)**

vertreten durch

Ao.Univ.-Prof. Dr. Peter Sturm  
sturm@ivt.tugraz.at  
0316 / 873-30004  
Inffeldgasse 21a  
8010 Graz

### **P6: LIEBHERR Machines Bulle S.A. (LMB)**

vertreten durch

Dr.-Ing. Marcus Quasthoff  
Marcus.Quasthoff@liebherr.com  
+41 26 / 9133-639  
45, rue de l'Industrie  
CH-1630 Bulle