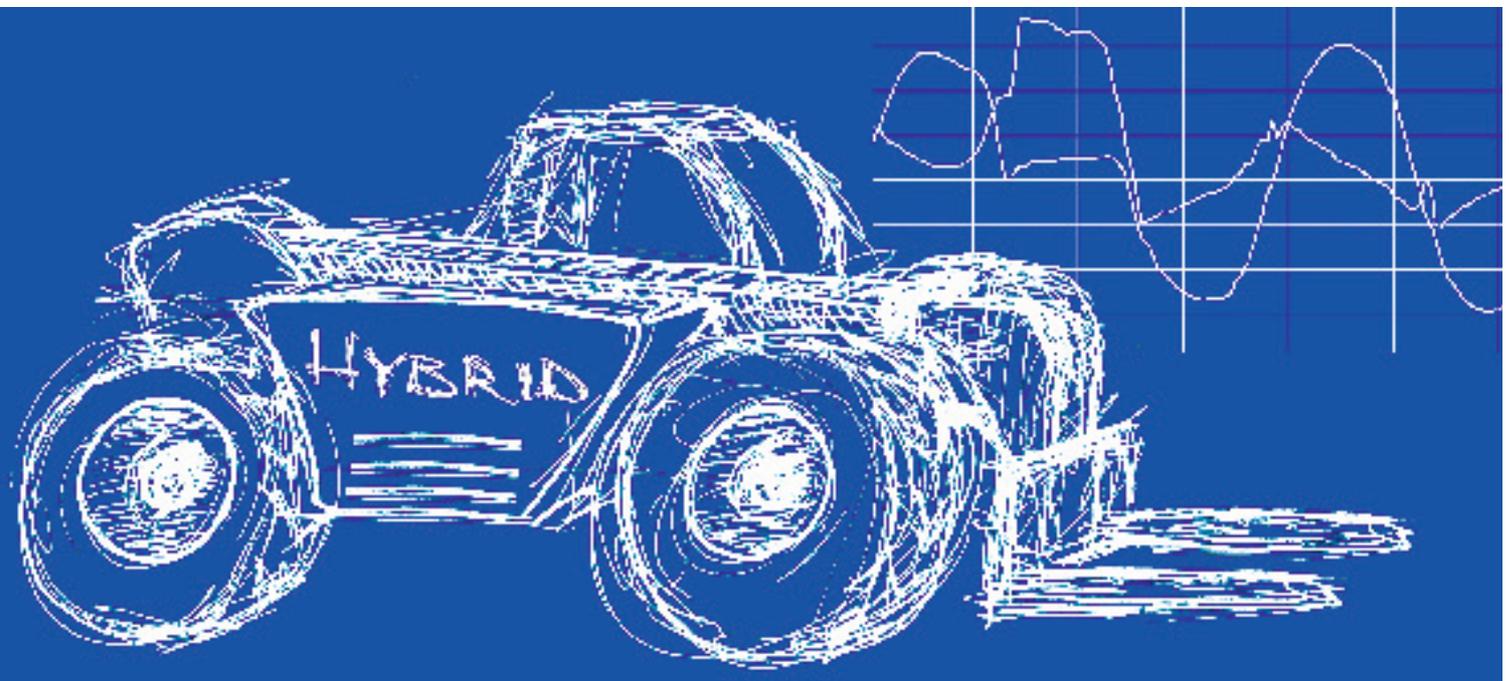


Potenziale von Hybridantrieben

Hydrostatische und elektrische Hybridantriebe abseits der Straße –
 methodisches Vorgehen zur Bestimmung von Effizienzsteigerungspotenzialen



Phillip Thiebes, Dr. Marcus Geimer

Am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen der Universität Karlsruhe (TH) werden Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen systematisch untersucht. Zur Ermittlung von Einsparpotenzialen werden Methoden erarbeitet, um den Entwicklungsprozess zu systematisieren. Zur Unterstützung und Überprüfung der Methodenentwicklung werden Simulationen mit den Programmen MATLAB Simulink und AMESim durchgeführt. Der Aufbau eines Versuchsträgers ist geplant. Über grundlegende Zusammenhänge und Erkenntnisse wird berichtet.

Dipl.-Ing. Phillip Thiebes, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer, Institutsleiter, beide Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (MOBIMA) der Universität Karlsruhe (TH)

Viele namhafte große Pkw-Hersteller und deren Zulieferer haben in den letzten Jahren große Investitionen getätigt, um die elektrischen Hybridantriebe marktreif zu machen. Dabei konzentrieren sich die Anstrengungen im Wesentlichen auf die Batterien, die Steuerungsstrategie und die elektrischen Maschinen. Bei den Pkw steht Hybridantrieb praktisch synonym für die Kombination aus Verbrennungsmotor und Elektromotor, ergänzt um eine Batterie.

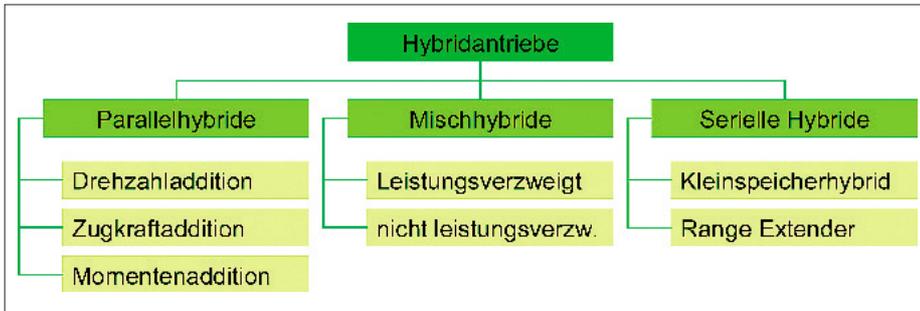
Dass nicht allein technische Gründe für die Verbreitung der oben beschriebenen Technologie verantwortlich sind, ist kein Geheimnis. Ein Hersteller, der in den letzten Jahren hybridgetriebene Pkw in sein Portfolio aufgenommen hat, konnte damit rechnen, dass gleichzeitig der Absatz an konventionellen Pkw derselben Marke deutlich steigt.

Aber mobile Arbeitsmaschinen sind bekanntlich keine Pkw und die Lösungen aus den Passagierfahrzeugen können nicht direkt übertragen werden. Folgende Unterschiede sind bei den mobilen Arbeitsmaschinen besonders zu beachten:

- Die Fahrzyklen selbst ähnlicher Maschinen können grundsätzlich unterschiedlich sein. Einen NEDC (New European Driving Cycle) für mobile Arbeitsmaschinen gibt es nicht.
- Neben dem Fahren müssen Arbeitsfunktionen ausgeführt werden.
- Die Kaufentscheidung ist weniger emotional beeinflusst, besonders wenn der Käufer nicht auch der Fahrer der Maschine ist. Dabei ist die Idee Hybridantriebe auch in mobilen Arbeitsmaschinen einzusetzen grundsätzlich richtig, die Frage ist jedoch: Welches Ziel soll damit erreicht werden? Denn Hybridantrieb heißt nicht nur Reku-

Antrieb (Energiewandler)	Speicher
Verbrennungsmotor (Primärer Antrieb)	Dieselloil Benzin Treibgas Wasserstoff
Elektromotor (Sekundärer Antrieb)	Batterie (Lithium, Nickel, Blei u. a.) Kondensator (Doppelschichtkondensator) Brennstoffzelle (Wasserstoff, Methan) Schwungrad (elektromotorisch)
Hydromotor (Sekundärer Antrieb)	Hydrospeicher (Kolben, Blase, Membran) Schwungrad (hydrostatisch)

Tabelle 1: Antriebe und Speicher



1: Klassifikation von Hybridantrieben

operation, also Bremsenergieerückgewinnung. Ein Hybridantrieb kann viele weitere Vorteile bieten^[5]:

- Start-Stop-Automatik
- Downsizing des Verbrennungsmotors
- Phlegmatisierung der Lastanforderung an den Verbrennungsmotor („Peak Shaving“)
- Entkopplung der Nebenverbraucher
- Reduzierung der Lärm- und Schadstoffemissionen
- Nutzung als mobiles Kraftwerk

Wenn ein Maschinenhersteller in Erwägung zieht, eines seiner Fahrzeuge zu hybridisieren, sollte er sich im Voraus überlegen, welche der genannten Effekte und Funktionen er nutzen möchte. Weiterhin sollte er sich die Fahr- und Arbeitszyklen des Fahrzeugs

fertig. Die „geringe“ spezifische Leistung elektrischer Maschinen darf ebenso wenig als Ausschlusskriterium angeführt werden wie die vermeintlich „geringen“ Spitzenwirkungsgrade hydraulischer Antriebe. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für Hybridantriebe notwendige Leistungsspeicher in der Hydraulik serienreif zur Verfügung stehen; elektrische Speicher befinden sich hingegen im Entwicklungsstadium.

Für eine Wirkungsgradbetrachtung reicht es nicht aus, sich mit Spitzenwirkungsgraden von Komponenten zu beschäftigen. Was letztendlich beurteilt werden muss, ist der Kraftstoffverbrauch des Gesamtsystems in einem repräsentativen Fahrzyklus. Aus diesem Verbrauch kann

Mobile Arbeitsmaschinen sind keine Pkw – Lösungen können nur bedingt übertragen werden

genau ansehen. Erst dann lässt sich ermitteln, ob – und wenn ja – welcher Hybridantrieb für diese Maschine geeignet ist.

An dieser Stelle lohnt es zu klären, was ein Hybridantrieb ist. Am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen der Universität Karlsruhe (TH) werden Hybridantriebe über folgende drei Punkte definiert:

- Mindestens zwei unabhängige Antriebe mit unterschiedlichen Energiespeichern
 - Stufenlos variable Getriebeübersetzung
 - Rückgewinnung von kinetischer und/oder potenzieller Energie
- Mögliche Antriebe mit je verschiedenen Speichern sind in **Tabelle 1** zusammengefasst.

Unter Berücksichtigung der drei genannten, definierenden Punkte lassen sich verschiedenste Hybridantriebsstränge konfigurieren. Zur besseren Übersichtlichkeit lassen sich die vielen möglichen Varianten nach [2] in die Struktur entsprechend **Bild 1** einteilen.

Sowohl die verschiedenen Antriebe als auch die zugehörigen Speicher haben charakteristische Eigenschaften, die sie für manche Anforderungen besser oder schlechter geeignet erscheinen lassen. Grundsätzlich sind aber alle Kombinationen denk- und machbar. Auf Grund einer vermeintlich „schlechten“ Eigenschaft eine ganze Kategorie von Antrieben oder Speichern abzuhaken und nicht weiterzuverfolgen ist leicht-

analog zur Fahrzeug-Energieeffizienzkennzahl nach [7] ein „Kraftstoff Wirkungsgrad“ für die Maschine bestimmt werden.

Vergleicht man den Verbrauch oder den Kraftstoff-Wirkungsgrad der hybridisierten Maschine mit dem einer vergleichbaren konventionellen Maschine, lässt sich beurteilen, ob sich der Hybridantrieb rentiert. Dieses Vorgehen ist nicht mehr anwendbar, wenn die hybridisierte Maschine zusätzliche Funktionen bietet, die einen Vergleich mit einer konventionellen Maschine nicht mehr zulassen, das heißt wenn die Fahr- und Arbeitszyklen nicht mehr vergleichbar sind.

Bewertungskriterien

Eigenschaften, die bei einer Bewertung der Technologie unbedingt zu beachten sind:

- Gewicht
- Bauraum
- Wirkungsgrad
- Verfügbarkeit/Serienreife
- Kosten
- Unfallverhalten
- Akustische und stoffliche Emissionen
- Steuerbarkeit
- Servicefreundlichkeit
- Alterungsverhalten
- Zyklusfestigkeit

08

sensor technology

Made in Germany.

von elobau.



Armrest.

Fahrzeugkomponenten

kundenspezifische Entwicklung.

ergonomisches Design.

Kombination verschiedener

Steuerelemente.

Joysticks einachsrig und multiaxial.

spezifische Tastenausführungen mit

Symbolik.

berührungsglätt Schaltelemente.

„inhouse“ Fertigung.

elobau

Elektroteile

GmbH & Co. KG

Zappelinstr. 44

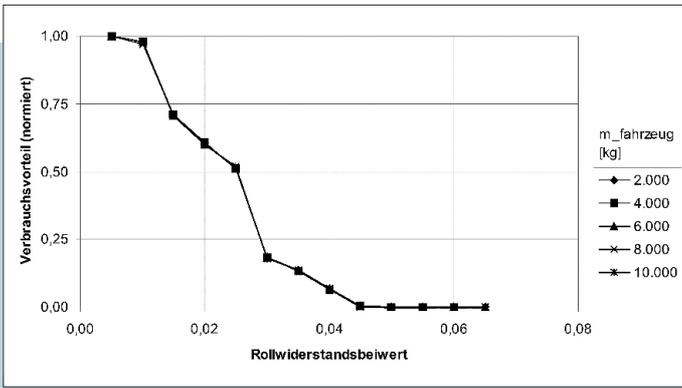
D-72299 Lautkirch

T +49 | (0) 71 61 97 08

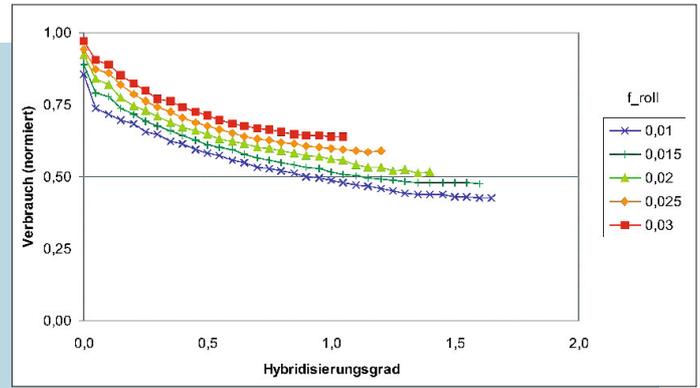
F +49 | (0) 71 61 97 01 00

www.elobau.com

info@elobau.de



2: Einfluss des Rollwiderstandsbeiwerts und der Fahrzeugmasse bei Hybridisierungsgrad $\alpha_{\text{hybrid}} = 1$



3: Verbrauch in Abhängigkeit des Hybridisierungsgrads und des Rollwiderstandsbeiwerts

Um zu beurteilen, ob sich die Hybridisierung einer Maschine lohnt, ist es in einem ersten Schritt nicht zwingend notwendig, einen Prototypen zu bauen. Stattdessen kann die Eignung über Simulationsmodelle abgeschätzt werden. Hierzu sollte eine konventionelle Maschine als Simulationsmodell abgebildet werden. Dieses Modell kann

Die Rekuperation von Bremsenergie ist nur bis 3 % Rollwiderstandsbeiwert sinnvoll

anschließend über Messungen an einer Serienmaschine verifiziert und validiert werden. Ausgehend vom validierten Modell können Veränderungen im Antriebsstrang – wie zum Beispiel eine Hybridisierung – vorgenommen werden. Das erweiterte Modell kann nicht mit realen Messungen verglichen werden; da es jedoch auf einem validierten Modell aufbaut, ist die Aussagekraft relativ hoch und zum Beurteilen von Trends und Tendenzen ausreichend. Es sollte darauf geachtet werden, wenn nicht das ganze Modell verifiziert werden kann, dass die Komponenten und Teilsysteme nach Möglichkeit verifiziert sind.

Dieses Vorgehen setzt voraus, dass nur eine oder wenige Varianten betrachtet werden, also die Hybrid-Antriebsstrang-Struktur im Wesentlichen schon feststeht. Steht

die Struktur jedoch noch nicht fest, stößt ein solches Vorgehen an seine Grenzen, da der Modellierungsaufwand für jedes einzelne Modell groß ist. Zur Findung der am besten geeigneten Antriebsstrangarchitektur sollten daher andere Methoden benutzt werden.

Eine klassische Methode ist die Verwendung des Morphologischen Kastens [3]. Hierdurch kann die Lösungsvielfalt eingeschränkt werden, indem oben genannte Eigenschaften wie z. B. Bauraumbedarf und Verfügbarkeit von Komponenten für unterschiedliche Antriebsstrangstrukturen beurteilt werden. Auf der anderen Seite steht in der Regel der Fahr- und Arbeitszyklus der Maschine zur Beurteilung zur Verfügung.

Viele mobile Arbeitsmaschinen haben charakteristische Fahrzyklen. Musterbeispiele hierfür sind der Y-Zyklus des Radladers [1] und das Gabelstapler-Arbeitsspiel [6]. Universalmaschinen, wie Traktoren, haben keinen einzelnen charakteristischen Fahrzyklus. Vielmehr kann für Traktoren ein gewisses Spektrum von Zyklen angegeben werden [4]. Diese Zyklen geben Hinweise auf das Einsparpotenzial durch Hybridisierung: Wechselnde Lastanforderungen, hohe Spitzenleistungen im Vergleich zur mittleren Leistung, Reversier- und Bremsvorgänge sowie Leerlaufzeiten; lassen sich diese Eigenschaften in einem Fahrzyklus identifizieren, ist Einsparpotenzial durch eine Hybridisierung vorhanden:

■ Wechselnde Lastvorgänge können über den sekundären Speicher und den zugehö-

rigen Wandler abgefangen werden. Der Verbrennungsmotor wird phlegmatisiert.

■ P_{max} ist deutlich größer als P_{mittel} – Der Verbrennungsmotor kann downgesized werden, Leistungsspitzen werden aus dem sekundären Speicher bedient. Während der Leistungssenken wird der Speicher geladen. Der Verbrennungsmotor wird häufig im Bestpunkt betrieben.

■ An der Leistungsgrenze des primären Antriebs kann mit dem sekundären Antrieb eine Boostfunktion realisiert werden.

■ Bei Reversier- und Bremsvorgängen kann kinetische Energie, beim Absenken von Lasten und bei Bergabfahrt kann potenzielle Energie zurückgewonnen und gespeichert werden.

■ In Leerlaufphasen wird Kraftstoff verbrannt, dessen Energie vollständig in Verlustwärme umgesetzt wird. Ein Abschalten des Verbrennungsmotors unterbindet diese Verluste. Zum erneuten Starten des Motors wird der sekundäre Antrieb benutzt.

Die Rückgewinnung von Energie beim Bremsen und Reversieren wird häufig als der markanteste Vorteil von Hybridantrieben angesehen. Bei Fahruntergründen mit geringem Rollwiderstandsbeiwert ist tatsächlich ein nennenswerter Anteil der kinetischen Energie rekuperierbar. Steigt jedoch der Rollwiderstandsbeiwert an, sinkt die zurückgewinnbare Energie. Auf Basis eines abstrahierten Simulationsmodells wurde dieser Einfluss ermittelt. Abgebildet wurde in dem Modell ein Fahrzeug mit zwei unterschiedlichen Antrieben und den dazugehörigen Speichern und Getrieben. Dabei sind Wirkungsgrade in Kennfeldform berücksichtigt. Die Simulationen haben gezeigt, dass bereits bei 3 % bis 4 % Rollwiderstandsbeiwert die Einsparung durch Rekuperation gegen Null geht (Bild 2). Aus dieser Abbildung geht ebenfalls hervor, dass die Gesamtmasse des Fahrzeugs fast keinen Einfluss auf die relative Kraftstoffeinsparung hat.

Als eine repräsentative Kennzahl für Hybridantriebe soll hier der Hybridisierungsgrad vorgestellt werden:

$$\alpha_{\text{hybrid}} = \frac{P_{\text{Verbrenner}}}{P_{\text{EM}}}$$

Summary

At the Chair for Mobile Machines of the University Karlsruhe (TH) hybrid drivetrains for off-highway machines are being investigated. The energy saving potential is to be determined, therefore methodologies are developed. The chosen approach includes use of the simulation programs MATLAB Simulink and AMESim. An experimental vehicle is planned.

The engineering process towards a hybrid driven off-highway machine is closely connected to the analysis of the corresponding driving and work load cycle. Also it has to be determined which functionalities are to be implemented. Only then preselection on the drivetrain architecture, the drives and the accumulators can be made. Further screening can be done by means of criteria as needed space, availability of components ect. For a detailed design and further examination it is recommended to use simulation models.

P_{vkm} bezeichnet die maximale Leistung des Verbrennungsmotors, $P_{sekundär}$ bezeichnet die maximale Leistung des sekundären Antriebs (in der Regel eine elektrische Maschine oder eine hydrostatische Einheit). Zum Vergleich verschiedener Antriebsstränge kann der Hybridisierungsgrad variiert werden, bei gleichzeitiger Beibehaltung der gesamten installierten Leistung

$$P_{ges} = P_{vkm} + P_{sekundär} = konst.$$

Der Grad der Hybridisierung lässt sich auch verbal formulieren, wobei die Zahlen nur als ungefähre Richtwerte gelten:

- Micro-Hybrid: $0 < \alpha_{hybrid} < 0,2$
- Mild-Hybrid: $0,2 < \alpha_{hybrid} < 0,9$
- Full-Hybrid: $0,9 < \alpha_{hybrid} < 2$
- Rangeextender: $2 < \alpha_{hybrid}$

Der serielle Hybrid kann grundsätzlich nur bei $1 < \alpha_{hybrid}$ eingesetzt werden, da sonst die Leistung des Verbrennungsmotors nicht übertragen werden könnte. Micro-Hybrids werden hingegen sinnvollerweise prinzipiell als Parallelhybride aufgebaut, ein leistungsverzweigtes Getriebe ist mit der geringen Leistung des sekundären Antriebs nicht darstellbar. Der Einsatz des Rangeextenders, bei dem der Verbrennungsmotor die Funktion übernimmt, den sekundären Energiespeicher zu laden,

macht nur in serieller Bauweise Sinn. Außerdem ist ein Speicher mit großem Energiegehalt notwendig. Dieses System wird zum Beispiel eingesetzt, wenn lokal emissionsfreies Fahren über längere Strecken dargestellt werden soll.

Für den Y-Zyklus aus [1] ist in Bild 3 der Verbrauchsvorteil in Abhängigkeit des Hybridisierungsgrads und des Rollwiderstandsbeiwerts dargestellt. Die Daten wurden über das oben beschriebene Simulationsmodell ermittelt.

Für den Entscheidungsfindungsprozess zur Hybridisierung einer Maschine lässt sich zusammenfassend sagen, dass die charakteristischen Fahrzyklen aus dem Einsatzspektrum der Maschine ermittelt und betrachtet werden müssen sowie der Untergrund, auf dem die Maschine fährt. Es muss festgelegt werden, welche Funktionalitäten durch den Hybridantrieb erfüllt werden sollen. Erst dann kann eine Vorauswahl bezüglich der Antriebsstrangarchitektur, der Primär- und Sekundärtriebe und der Speicher getroffen werden. Eine grundsätzliche Entscheidung für einen elektrischen oder hydraulischen Hybrid muss an dieser Stelle noch nicht getroffen werden. Eine weitere Einschränkung der Lösungsvielfalt kann über die weichen Faktoren (Bauraumbedarf, Verfügbarkeit etc.) erfolgen. Zur detail-

lierten Auslegung ist die Untersuchung am Simulationsmodell sinnvoll.

MOBIMA
3095830

WWW
www.vfv1.de/#3095830

Literaturquellen

[1] Thiebes, P. und M. Geimer: Hybridantriebe für Mobile Arbeitsmaschinen.
O+P Zeitschrift für Fluidtechnik - Aktorik, Steuerelektronik und Sensorik, Band 51 (2007), Nr. 11-12, S. 630-635

[2] Graaf, R.: Simulation hybrider Antriebskonzepte mit Kurzzeitspeicher für Kraftfahrzeuge. Diss. RWTH Aachen (2002)

[3] Wiedemann, J., W. Mayer und J. Arning: Die Fahrzeug-Energieeffizienzkennzahl - Der „Wirkungsgrad“ des Fahrzeugs, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Band 109 (2006), Nr. 05, S. 430-437

[4] Pahl, G. und W. Beitz: Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung. Springer Verlag. 3. Aufl. 1993

[5] Deiters, H.: Verifikation eines Softwaretools zur Simulation und Effizienzbewertung von Antriebsstrangkonzepten. Vortrag am 20. Juli 2007 im MDA-Forum auf der Hannovermesse 2007, www.wood.vdma.org/wps/wcm/resources/file/ebf5e024115045/MDA_Forum_2007_Energie_Verifikation_Deiters_TUBS.pdf

[6] VDI Richtlinie 2 198: Typenblätter für Flurförderzeuge. August 2002

[7] Renius, K. Th.: Trends in Tractor Design with Particular Reference to Europe. Journal of Agricultural Engineering Research, 57 (1994) Nr. 1, S. 3-22

2. Fachtagung: Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen

Informieren Sie sich auf der Tagung über neueste technologische Trends und nutzen Sie die Expertise vor Ort zum Gedankenaustausch und Wissenstransfer. Reservieren Sie diesen Termin schon jetzt in Ihrem Kalender.



16. Februar 2009 in Karlsruhe

SCHWERPUNKTE DER VERANSTALTUNG

- Elektrische Antriebe versus hydrostatische Antriebe: Widerspruch oder Ergänzung?
- Möglichkeiten und Potenziale von Energierückgewinnungsmaßnahmen
- Energiespeichermöglichkeiten
- Auswirkungen der Abgasgesetzgebung auf Hybridantriebe

Veranstalter:

Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) der Universität Karlsruhe (TH)

VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.

WVMA – Wissenschaftlicher Verein für Mobile Arbeitsmaschinen e.V.



Kontakte:

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik und Mobile Arbeitsmaschinen
Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen
Universität Karlsruhe (TH)
Gottfried-Franz-Str. 8, 76131 Karlsruhe
Tel.: 0721-608-8601, Fax: 0721-608-8606
eMail: hybridtagung@ires.uni-karlsruhe.de
Internet: www.mobima.uni-karlsruhe.de/hybridtagung.php

Dipl.-Ing. Peter-Michael Synak
VDMA
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt/Main
Tel.: 069-6903-1813
Fax: 069-6903-2813
eMail: Peter.Synak@vdma.org
Internet: www.vdma.org

