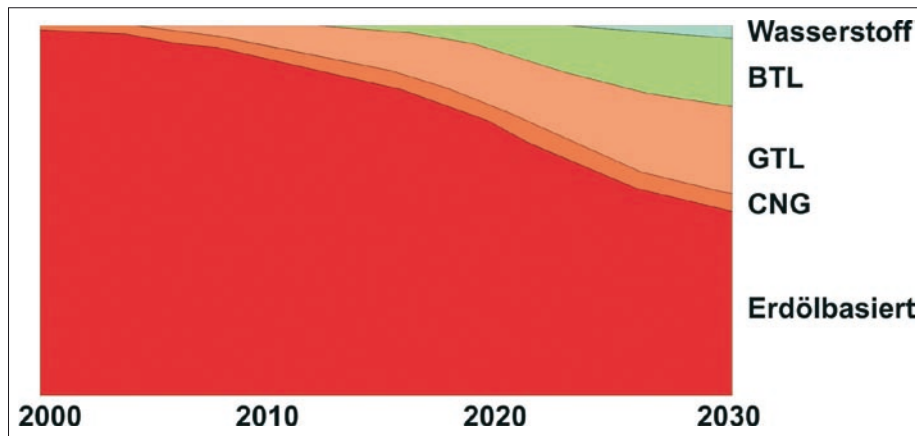


Hybridantriebe für Mobile Arbeitsmaschinen

Entwicklung unter Berücksichtigung der Betriebsstrategie



1: Prognose der Marktanteile verschiedener Kraftstoffe [1]

Phillip Thiebes, Marcus Geimer

Wachsendes Umweltbewusstsein und steigende Kraftstoffpreise haben das Thema Energieeffizienz in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. Immer öfter ist die Rede von Hybridantrieben. Gemeint sind meist Pkw mit einem Ottomotor und (mindestens) einem Elektromotor vereint in einem Antriebsstrang. Bei mobilen Arbeitsmaschinen gibt es diese Technologie noch nicht in Serie. Dabei ist das Energieeinsparpotential bei Radladern, Gabelstaplern und anderen mobilen Arbeitsmaschinen etwa zehnmal so groß wie beim Pkw.

Motivation

Beim Einsatz von Hybridantrieben bieten Mobile Arbeitsmaschinen ein zehnfaches Kraftstoffeinsparpotential als Pkw. Um dieses Potential möglichst ausschöpfend zu erschließen, bedarf es einerseits eines entsprechenden Antriebsstrangs, andererseits müssen die vielen Freiheitsgrade, die ein solcher Hybridantriebsstrang hat, sinnvoll kontrolliert werden. Dies wird über die Betriebsstrategie getan. Um dieses Thema zu erforschen, läuft am Institut für Fahrzeugtechnik und Mobile Arbeitsmaschinen (IFFMA) der Universität Karlsruhe (TH) ein Projekt. Die Motivation, Grundlagen und gewählte Vorgehensweise sind Themen dieses Fachbeitrages.

Mobile Arbeitsmaschinen werden überwiegend von Dieselmotoren angetrieben. Die enorme Energie- und Leistungsdichte von Dieselmotoren und Dieselmotoren machen diese Antriebsart bislang unersetzlich. Auch die Infrastruktur für diese Technik (Tankstellen, Werkstätten, Ersatzteile, Know-how) ist sehr gut ausgebaut. Die viel gepriesene Brennstoffzelle mit Wasserstoff als Energieträger kann in keinem dieser Punkte heute mithalten und auch andere Systeme können bislang nur in Nischenanwendungen einen Ersatz für den Dieselmotor darstellen.

An dieser Situation wird sich voraussichtlich mittelfristig nichts ändern.

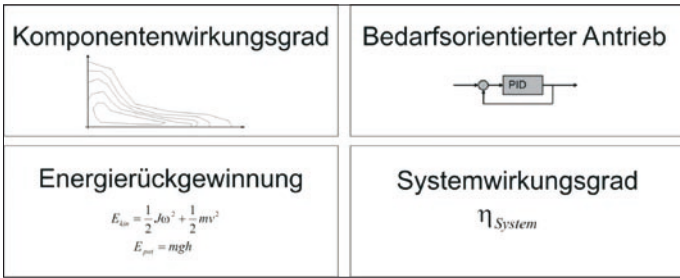
Auf der anderen Seite stehen die Klimaschädigung durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, sowie die Endlichkeit des Erdöls. Es muss folglich ein Ersatz gefunden werden. Großes Potential wird synthetischen Kraftstoffen zugesprochen, die aus Biomasse (BTL) gewonnen werden können. Wegen der relativ großen Erdgasvorräte können auch erdgasbasierte flüssige Kraftstoffe (GTL) als Ersatz für erdölbasierte dienen. Die CO₂-Problematik bleibt bei diesen immer noch fossilen Kraftstoffen jedoch bestehen (Bild 1) [1].

Ein Ziel muss es daher sein, die Effizienz einer Maschine zu verbessern. Eine effizientere Maschine hat bei gleicher geleisteter Arbeit einen geringeren Kraftstoffverbrauch und somit geringere CO₂-Emissionen und geringere Betriebskosten. Dieser Zusammenhang gilt selbstverständlich für alle Fahrzeuge und Maschinen. Allerdings ist die Steigerung der Effizienz einer Maschine stets mit Aufwand verbunden. Ob sich dieser lohnt, hängt von den erreichbaren Einsparungen ab. In Tabelle 1 ist beispielhaft dargestellt, was eine Kraftstoffeinsparung von 10% je für einen Pkw und für eine mobile Arbeitsmaschine bedeutet. Es wird angenommen, dass der Pkw zehn Euro Kraftstoffkosten für 100 km Fahrt verursacht. Als mobile Arbeitsmaschine wird ein Radlader mit einem Kraftstoffverbrauch von 20 Euro/h gewählt. Es zeigt sich, dass das Einsparpotential über der Lebensdauer eines Fahrzeugs bei gleicher Verbrauchsminderung um den Faktor zehn auseinander geht. Diesen Einsparungen stehen entsprechende Mehrkosten für die Effizienzsteigerung gegenüber. Es ist klar zu erkennen, dass nur ein sehr kleiner finanzieller Spielraum für die Aufrüstung des Pkw zum Hybridantrieb besteht. Beim Radlader hingegen besteht

Tabelle 1: Beispielrechnung Einsparpotential

	Pkw	Radlader
Lebensdauer/Amortisationszeitraum	200.000 km	10.000 h
Kraftstoffverbrauch (spezifisch)	10 €/100 km	20 €/h
Kraftstoffverbrauch (absolut)	20.000 €	200.000 €
Ersparnis bei 10% Verbrauchsminderung	2.000 €	20.000 €

Autoren: Dipl.-Ing. Phillip Thiebes ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (MOBIMA) der Universität Karlsruhe (TH). Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer ist Leiter des Lehrstuhls



2: Möglichkeiten der Energieeinsparung

weitaus größere Freiheit. Der um den Faktor zehn größere Handlungsspielraum wird durch Berechnungen in [2] gestützt.

Im vorangegangenen Rechenbeispiel wurde von einer Einsparung von 10 % ausgegangen. Dieser Wert ist für Pkw durchaus realistisch, wie Fahrzeughersteller behaupten. Bei ausgewählten mobilen Arbeitsmaschinen ist abzusehen, dass das Einsparpotenzial jedoch weit über diesem Wert liegen wird.

Um diese Behauptung zu untermauern, soll zunächst betrachtet werden, wo Energie eingespart werden kann. Die Möglichkeiten der Energieeinsparung lassen sich in vier verschiedene Kategorien unterteilen (**Bild 2**). Der Komponentenwirkungsgrad steht seit jeher im Fokus der Entwickler: Permanent werden Komponenten und Baugruppen energetisch verbessert und optimiert. In diesem Bereich sind weitere Steigerungen möglich, große Sprünge sind aber nicht zu erwarten.

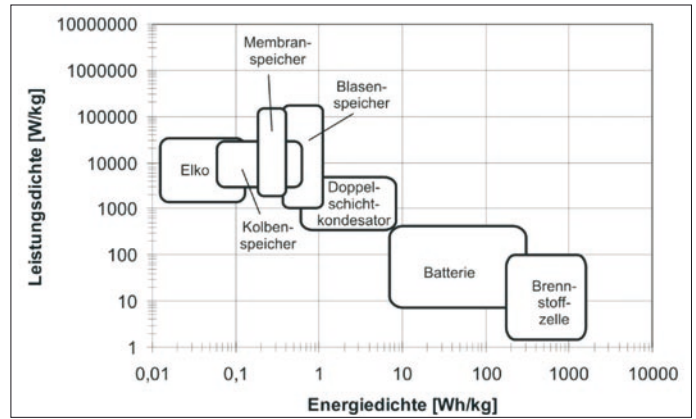
Nahe liegend ist auch der bedarfsorientierte Antrieb: Ein Aggregat oder eine Maschine, die gerade nicht benötigt wird, wird abgestellt. Dieses Prinzip lässt sich zum Beispiel auf Nebenantriebe (Kühlwasserpumpe, Lüfter etc.) anwenden, aber auch auf die Gesamtmaschine (Start-Stopp-Automatik). Maßnahmen dieser Art können relevante Kraftstoffeinsparungen bewirken.

Im Rahmen dieses Fachbeitrages sollen jedoch die beiden Themen „Energierückgewinnung“ und „Systemwirkungsgrad“ näher betrachtet werden, die auch Forschungsschwerpunkte im Projekt „Hybridgetriebene Mobile Arbeitsmaschinen“ der Universität Karlsruhe (TH) sind. Neben der Hybridisierung können auch andere Ansätze deutliche Verbrauchseinsparungen bewirken. Im Bereich der Arbeitshydraulik ist hier beispielhaft das elektrohydraulische Flow-Matching zu nennen [3].

Energierückgewinnung

Bei der Energierückgewinnung kann prinzipiell zwischen kinetischer und potentieller Energie unterschieden werden. Kinetische Energie lässt sich besonders dann sinnvoll zurückgewinnen, wenn eine Maschine häufig reversiert, was zum Beispiel bei Radladern, Teleskopladern und Gabelstaplern

3: Ragone-Diagramm



der Fall ist. Beim konventionellen Bremsen wird die kinetische Energie in Wärme umgewandelt und ist somit technisch nicht nutzbar. Ersetzt man eine solche konventionelle Bremse jedoch durch eine Hydropumpe oder einen Generator, lässt sich die kinetische in hydraulische bzw. elektrische Energie wandeln und wieder technisch nutzen. Man spricht hierbei von Rekuperation.

Das gleiche Prinzip ist anwendbar auf die Rückgewinnung potentieller Energie. Senkt ein Bagger oder Gabelstapler eine Last ab, wird die potentielle Energie in Form von

Verbrauch von 20 L/h und einem großzügig angenommenen Verbrennungsmotorwirkungsgrad von 35 %, sowie angenommenen 50 % Wirkungsgrad beim Rekuperieren ergibt sich immer noch eine Einsparung von ca. 23 % des Kraftstoffs.

Ob diese Einsparung tatsächlich erreicht werden kann, muss sich in Versuchen zeigen. Potenzial ist in jedem Fall vorhanden und es sollte unbedingt erschlossen werden.

Um die Bremsenergie wieder zur Beschleunigung nutzen zu können, muss sie zwischengespeichert werden. Dabei stellt

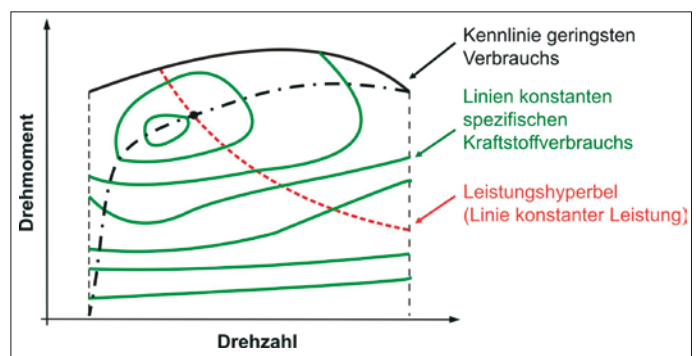
Mobile Arbeitsmaschinen bieten ein zehnmal größeres Einsparpotential als Pkw

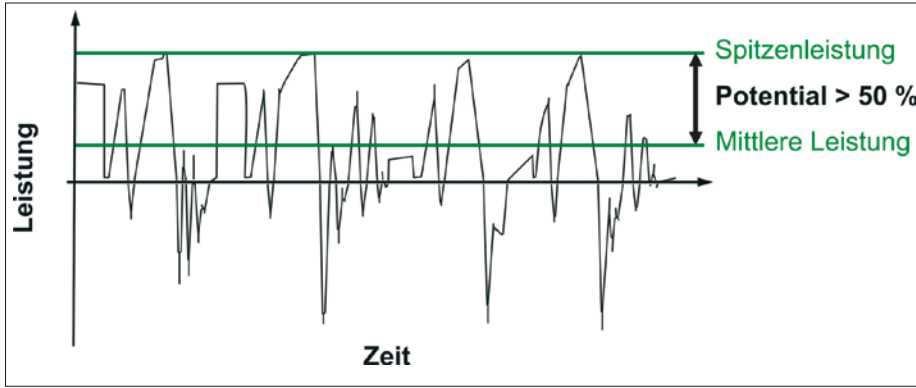
Wärme an die Umgebung abgegeben. Über einen Hydromotor oder einen Generator ließe sich wiederum die Energie technisch nutzbar machen. In den folgenden Ausführungen wird der Schwerpunkt auf die Rekuperation kinetischer Energie gelegt. Welches Potential in der Energierückgewinnung steckt, veranschaulicht **Tabelle 2**.

Geht man davon aus, dass ein 24 t schwerer Radlader mit einer Geschwindigkeit von 20 km/h fährt, so heißt das, dass 370 kJ kinetische Energie beim Abbremsen frei werden. In einem Y-Zyklus beschleunigt und bremst der Radlader je vier Mal, wobei beim Einstoßen in das Haufwerk keine Energie zurückgewonnen werden kann. Bei 100 Zyklen pro Stunde ergeben sich also 300 rekuperierbare Abbremsungen, was einer Energie von 110 MJ entspricht. Bei einem

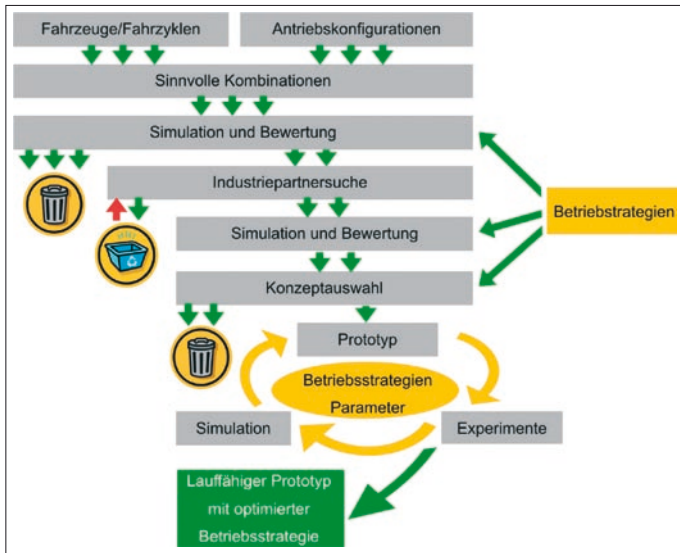
sich die Frage nach dem richtigen Speicherprinzip, deren Beantwortung durch das Ragone-Diagramm (**Bild 3**) erleichtert wird. In diesem Diagramm werden verschiedene Speicher bezüglich ihrer Energie- und Leistungsdichte eingeordnet. Speicher mit hoher Energiedichte sind zum Beispiel elektrische Batterien. Hydrospeicher hingegen haben besonders hohe Leistungsdichten. Für die Anwendung in Radladern, Teleskopladern und Staplern, die häufig verzögern und wieder beschleunigen, ist die Energiedichte von sekundärer Bedeutung. Wichtiger hingegen ist die Leistungsdichte. Berücksichtigt man des Weiteren die Tatsache, dass hydrostatisch angetriebene Maschinen stets eine hydraulische Anlage installiert haben, fällt die Entscheidung für einen hydrostatischen Hybridantrieb leicht. Würde

4: Motorverbrauchs-kennfeld (Muscheldiagramm)





5: Fahrzyklus eines Gabelstaplers [5]



6: Projektverlauf

man dennoch ein elektrisches System wählen, bieten sich Doppelschicht-Kondensatoren als Speicher an. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass der Einsatz von Hochvolt-Bordnetzen nötig ist, um die auftretenden Leistungen bereitstellen zu können. Einer solchen Technologie muss mit entsprechend geschultem Service- und Werkstattpersonal Rechnung getragen werden.

Zusätzlich gilt es zu beachten, dass Hydrospeicher eine bereits erprobte Technologie darstellen, die auch seriell verfügbar sind. Doppelschicht-Kondensatoren hingegen stellen eine junge Technologie dar; sie sind nur in begrenzten Stückzahlen und zu hohen Preisen erhältlich. Ein weiteres

Problem der Doppelschicht-Kondensatoren ist deren Temperaturabhängigkeit: Eine Temperaturerhöhung bewirkt einerseits die Verringerung der Lebensdauer, andererseits steigert sie den Selbstentladungsvorgang.

Systemwirkungsgrad

Entsprechend Bild 2 soll auch der Systemwirkungsgrad behandelt werden. Für Komponenten, wie Motoren, lässt sich der Wirkungsgrad meist in einem zweidimensionalen Diagramm als Funktion von Drehzahl und Drehmoment darstellen. Der Wirkungsgrad eines ganzen Systems hängt je-

doch von deutlich mehr Parametern ab. Das optimale System ergibt sich selten aus der Aneinanderreihung einzeln optimierter Komponenten. Ein komplexer Hybridantriebsstrang kann nur als Ganzes betrachtet und optimiert werden.

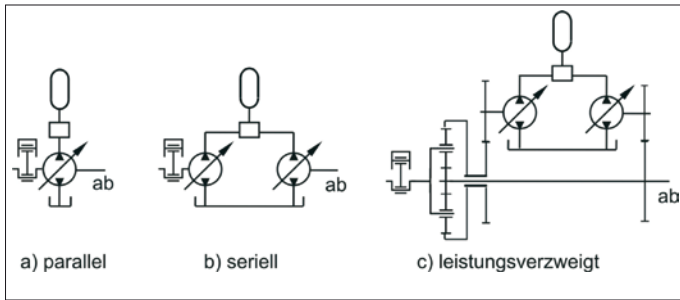
Der Systemwirkungsgrad gibt an, wie viel Kraftstoff für einen charakteristischen Fahrzyklus benötigt wird, wobei die zu Beginn und Ende des Zyklus im Speicher enthaltene Energie mit einbezogen werden muss.

Durch das Festlegen der physikalischen Struktur des Antriebsstrangs wird auch der maximale, theoretische Systemwirkungsgrad festgelegt. Daher muss diese Phase bei der Entwicklung besonders sorgfältig behandelt werden. Die Komplexität eines Hybridantriebsstrangs macht eine übergeordnete Steuerung notwendig, die die fahrzustandsabhängige Komponentenansteuerung übernimmt. Eingangsgrößen einer solchen Steuerung müssen Ist-Daten (Geschwindigkeit, Speicherzustand etc.) und Soll-Daten (Lenkradstellung, Gaspedalstellung etc.) sein. Die Ausgangsgrößen werden entweder direkt an die einzelnen Komponenten gegeben (Pumpenschwenkwinkel etc.) oder an entsprechende Komponentensteuergeräte übermittelt (Motorsteuergerät etc.). Das übergeordnete Hybridsteuergerät ist also verantwortlich für das bestmögliche Ausschöpfen des theoretischen Systemwirkungsgrads. Die im Steuergerät hinterlegte Entscheidungslogik wird als Betriebsstrategie bezeichnet.

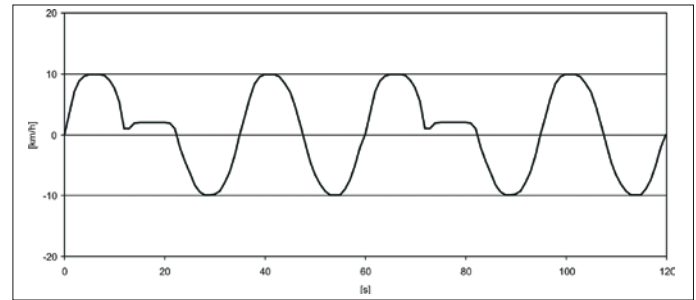
Eine gut durchdachte Betriebsstrategie macht es möglich, auch dort Energie einzusparen, wo augenscheinlich wenig Potenzial für eine Hybridisierung vorhanden ist. Als Beispiel sei hier der Traktor genannt. Diese Maschine zeichnet sich durch große Zeitannteile mit konstanter Leistungsanforderung aus (Bodenbearbeitung und Feldarbeit). Energierückgewinnung bietet in diesem Beispiel wenig Potenzial. Ist dennoch ein Speicher im Antriebsstrang vorhanden, so kann über eine gut gewählte Betriebsstrategie folgendermaßen Energie gespart werden: Normalerweise wird der Verbrennungsmotor nicht mit maximalem Moment belastet, um eventuelle Leistungsspitzen abfangen zu können. Diese treten beispielsweise beim Schwaden von Heu auf, wenn ein besonders fester Haufen bearbeitet wird oder wenn bei der Bodenbearbeitung eine Bodenverfestigung durchpflügt wird. Ist ein Speicher im Antriebsstrang vorhanden, kann dieser die Leistung bei Spitzenlast kurzfristig zur Verfügung stellen, der Verbrennungsmotor kann durchgehend mit maximalem Drehmoment belastet und somit generell kleiner dimensioniert werden. Der kleiner dimensionierte Verbrennungsmotor verbraucht weniger Kraftstoff. Ein geringer Leistungsanteil des Verbrennungsmotors kann kontinuierlich abgeführt werden, um den Speicher zu füllen. Eine andere Möglichkeit ist es, den Motor nicht klei-

Tabelle 2: Rekuperationspotential beim Radlader

Masse	$m_{\text{radlader}} = 24 \text{ t}$
Geschwindigkeit	$v_{\text{max}} = 20 \text{ km/h}$
Verbrauch	$m_{\text{diesel}} = 20 \text{ l/h}$
Heizwert Kraftstoff	$H_u = 35 \text{ MJ/l}$
Rekuperierbare Bremsungen	$n_{\text{brems}} = 300/\text{h}$
Wirkungsgrad Verbrennungsmotor	$\eta_{\text{vkm}} = 35\%$
Wirkungsgrad Rekuperation	$\eta_{\text{rekup}} = 50\%$
Kinetische Energie	$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{radlader}} \cdot v_{\text{max}}^2 \cdot n_{\text{brems}} = 110 \text{ MJ/h}$
Rekuperierbare Energie	$E_{\text{rekup}} = E_{\text{kin}} \cdot \eta_{\text{rekup}} = 55 \text{ MJ/h}$
Eingesparter Kraftstoff	$m_{\text{diesel,spar}} = E_{\text{rekup}} / (\eta_{\text{vkm}} \cdot H_u) = 4,5 \text{ l/h}$
Einsparung	$\alpha_{\text{spar}} = 23\%$



7: Antriebsstrangkonfigurationen



8: Synthetischer Fahrzyklus, kurzes Ladespiel eines Radladers

ner zu dimensionieren, um eine erhöhte Boost-Leistung bereitstellen zu können.

Leistungsverzweigte und serielle Hybridantriebe bieten weiterhin den Vorteil des stufenlosen Getriebes, die Fahrzeuggeschwindigkeit wird von der Verbrennungsmotordrehzahl entkoppelt. Aus der jeweiligen Fahrsituation ergibt sich eine aktuelle Leistungsanforderung an den Verbrennungsmotor. Unabhängig von der Drehzahl kann der verbrauchsoptimale Betriebs-

sichtigung der negativen Leistungsanteile liegt die mittlere Leistung unter 50 % der Spitzenleistung. Durch die Verwendung eines Speichers kann der Verbrennungsmotor um etwa die Hälfte der Leistung verkleinert werden. In den Phasen höheren Leistungsbedarfs wird der Speicher entleert, bei niedrigem Bedarf wird der Speicher gefüllt. Der Verbrennungsmotor läuft mit nahezu konstanter Leistung. Der um 50 % verkleinerte Verbrennungsmotor hat ei-

Dabei können drei Merkmale zur Klassifizierung herangezogen werden:

- Antriebsart (mechanisch, elektrisch, hydraulisch)
- Bauweise (parallel, seriell, leistungsverzweigt)
- Leistungsverhältnis (Mild-, Micro-, Full-Hybrid)

Wie oben beschrieben, eignet sich der Hybridantrieb zur Kraftstoffverbrauchs-

- milderung durch
- Rückgewinnung potentieller/kinetischer Energie
- Downsizing des Verbrennungsmotors
- Start-Stopp-Automatik
- Entkopplung der Nebenverbraucher (bedarfsorientierter elektrischer oder hydrostatischer Antrieb)

Weitere Vorteile ergeben sich aus

- Lärmreduzierung
- Abgasreduktion
- Nutzung als mobiles Kraftwerk

Das Potential eines Hybridantriebs kann nur durch eine gute Betriebsstrategie vollständig ausgeschöpft werden.

MOBIMA entwickelt den Prototypen einer hybridgetriebenen mobilen Arbeitsmaschine

punkt im Motorkennfeld gewählt werden, über das stufenlose Getriebe wird die korrekte Drehzahl am Abtrieb eingestellt. Verbindet man die Punkte minimalen Verbrauchs bei der Variation der Leistung im Motorkennfeld, ergibt sich eine Linie gemäß **Bild 4**. Dadurch lassen sich Motorzustände mit schlechtem spezifischem Kraftstoffverbrauch vermeiden [4].

Durch die oben beschriebenen Strategien, lässt sich einerseits Kraftstoff einsparen, andererseits wird der Verbrennungsmotor phlegmatisiert, was unter anderem auch eine deutliche Reduktion der Rohemissionen bewirkt.

Downsizing

Neben dem Radlader ist auch der Gabelstapler eine Maschine, die ein besonders großes Kraftstoffeinsparpotential bei der Hybridisierung verspricht. Ähnlich dem Radlader arbeiten auch diese Maschinen im permanenten Reversierbetrieb. Der Fahrzyklus ist gekennzeichnet durch Brems- und Beschleunigungsvorgänge. Wie oben beschrieben eignen sich solche Maschinen für die Energierückgewinnung. Aber auch ohne das technisch aufwendige Rekuperieren der Bremsenergie ist hier viel Potenzial vorhanden.

Betrachtet man den Leistungsverlauf eines Gabelstaplers (**Bild 5**) fällt der besonders zerküftete Verlauf mit den hohen Leistungsspitzen auf [5]. Zeichnet man sich in den Leistungsverlauf die Spitzenleistung und die mittlere Leistung auf, so wird das Potential sichtbar. Auch ohne die Berücksichtigung

geringeren Verbrauch als das Ausgangsmodell, er ist preiswerter in der Anschaffung und durch die geringeren Leistungsschwankungen (Phlegmatisierung) entstehen weniger Rohemissionen. Außerdem kann die Maschine durch den Einsatz eines kleineren Motors häufig in eine günstigere Abgasgrenzwertklasse gebracht werden.

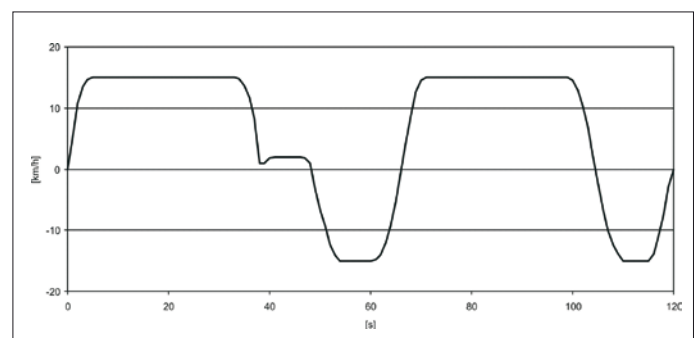
Hybridantrieb

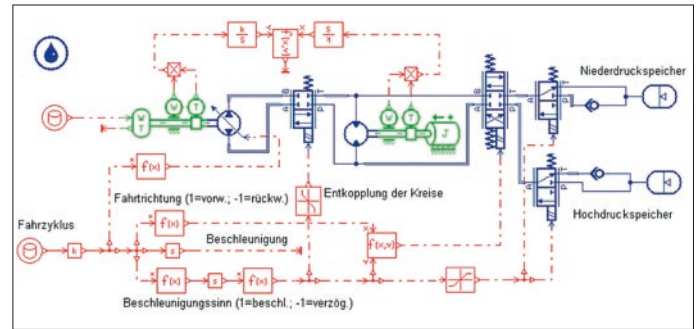
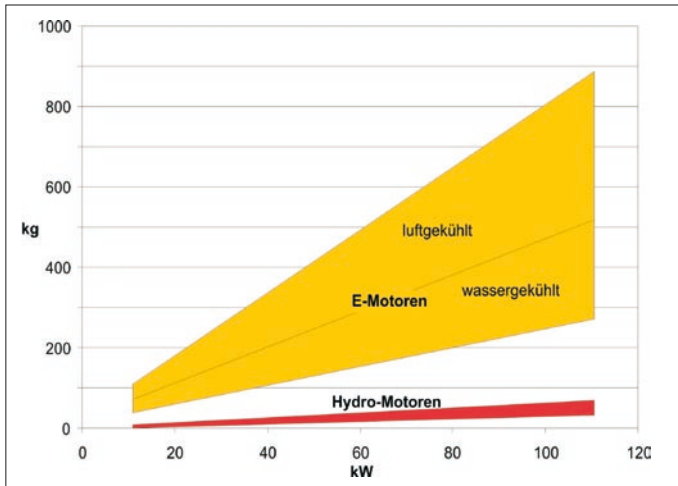
An dieser Stelle ist es sinnvoll zusammenzufassen, was einen Hybridantrieb auszeichnet bzw. was unter diesem Begriff am IFFMA verstanden wird.

Definierende Eigenschaften des Hybridantriebs sind:

- Vereinigung von zwei oder mehr Antrieben in einem Antriebsstrang, mit den dazugehörigen Energiespeichern
- Stufenlose Übersetzung und damit mögliche Betriebspunktverschiebung
- Pufferung von Energie zur Phlegmatisierung und/oder Rekuperation

9: Synthetischer Fahrzyklus, langes Ladespiel eines Radladers





11: Simulationsmodell eines seriellen hydrostatischen Hybridantriebes

10: Gewicht und Leistung verschiedener Motoren

Simulationen unterstützt, wobei parallel zur Entwicklung des physikalischen Antriebsstrangs die Entwicklung der Betriebsstrategie(n) verläuft. Der geplante Projektverlauf ist in **Bild 6** dargestellt.

Erste Schritte der Bearbeitung

Im Rahmen erster Untersuchungen werden derzeit diesel-hydraulische Antriebsstrangvarianten in einer Simulationsumgebung abgebildet und untersucht. Abgebildet wurden bereits ein serieller, ein paralleler und ein leistungsverzweigter Antriebsstrang (**Bild 7**). Der hydraulische Zweig wurde jeweils als offenes System entworfen. Als Eingangswerte für die Simulationsläufe dienen vorerst synthetische Fahrzyklen.

Die Modelle wurden mit geringem Detaillierungsgrad abgebildet. Ziel ist es, die drei Systeme bezüglich des vorhandenen Potentials zu vergleichen. Untersucht werden die Wirkungsgradsteigerungen beim Betrieb mit zugeschaltetem Speicher, bezogen auf den Betrieb mit abgeschaltetem Speicher. Dabei werden zunächst zwei abstrahierte, synthetische Radladerfahrzyklen als Eingangsgrößen benutzt: Y-Zyklus mit kurzem und mit langem Transportweg (Bilder 8 und 9).

Neben den diesel-hydraulischen Varianten des Hybridantriebes besteht auch die Möglichkeit, ein diesel-elektrisches System zu verwenden. Prinzipiell bieten sich hierbei ebenso die drei Varianten entsprechend Bild 7 an: Parallel, seriell, leistungsverzweigt, wobei die hydraulischen Einheiten durch elektrische ersetzt werden und an Stelle des Hydrospeichers Ultracaps (oder Batterien) verwendet werden. Gegenüber der Hydraulik hat die Elektrotechnik jedoch den Nachteil der geringen Leistungsdichte der Maschinen. Ein diesel-elektrisch-serieller Antrieb müsste die gesamte Antriebsenergie elektrisch übertragen. Wie man an heute am Markt befindlichen Traktoren sieht, gilt das gleiche für die leistungsverzweigte Konfiguration, da hier in bestimmten Betriebspunkten ebenfalls die gesamte Antriebsenergie (auf Grund von Blindleis-

tung teilweise sogar mehr) elektrisch übertragen werden muss. Das Verhältnis von Gewicht zu Leistung für verschiedene E-Motoren ist in **Bild 10** dargestellt.

Im unteren Bereich des Feldes finden sich flüssigkeitsgekühlte, im oberen Bereich luftgekühlte E-Motoren, zum Vergleich sind auch Werte von hydrostatischen Motoren eingetragen. Sicherlich sind in den nächsten Jahren positive Entwicklungen beim Leistungsgewicht zu erwarten, nicht zuletzt getrieben durch die Entwicklung elektrischer Hybridantriebe im Pkw-Bereich. Im Rahmen des Hybridprojekts soll jedoch keine Komponentenentwicklung stattfinden. Das Interesse liegt bei der Forschung am System, es soll auf Serienkomponenten zurückgegriffen werden.

Die großen Massen der elektrischen Maschinen, die für eine serielle oder leistungsverzweigte Antriebsstrangkonfiguration notwendig wären, sind das Ausschlusskriterium für diese beiden Antriebsstrangvarianten. Von den diesel-elektrischen Varianten wird folglich nur die parallele Bauweise weiterverfolgt, da hier nicht die gesamte Antriebsenergie elektrisch übertragen werden muss.

Die Auswahl der Maschine, die das größte Potential für eine Hybridisierung bietet, wird in drei Stufen vorgenommen (Bild 6), wobei die ersten beiden bereits abgeschlossen sind.

Stufe 1

In der ersten Stufe wurden aus der Gesamtheit der Mobilien Arbeitsmaschinen jene ausgewählt, deren Bewegungsabläufe vorwiegend instationär also durch viele Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge gekennzeichnet sind. Bei diesen Maschinen ist die Energierückgewinnung prinzipiell möglich. Diese Auswahl wurde in Gesprächen mit Fachleuten aus Forschung und Industrie vervollständigt (**Tabelle 3**). An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass das Hauptaugenmerk auf der Rekuperation von Energie aus dem Fahrentrieb liegt.

Stufe 2

In der zweiten Stufe wurden aus den in Tabelle 3 aufgelisteten Maschinen jene ausgewählt, die einerseits das größte Energieeinsparungspotential bieten und die sich andererseits an den Einrichtungen der Universität untersuchen lassen. Das letztere Kriterium führte aufgrund ihrer Größe zum Ausschluss des Portalhubwagens und des Entsorgungsfahrzeugs. Im Weiteren wurde versucht, den Verdichtungsvorgang der Liste durch die Ergebnisse einfacher Simulationen der Fahrentriebsstränge mit den Softwarepaketen AMESim und Matlab-Simulink fort zu führen. Beispielhaft ist in **Bild 11** das Modell eines seriellen hydrostatischen Hybridantriebes dargestellt. Als Eingangsdaten dienen hierbei synthetische Fahrzyklen entsprechend der Bilder 8 und 9.

Auf Grund der hohen Variantenvielfalt (sechs Maschinengattungen mit je vier Antriebsstrangkonfigurationen) konnten die Varianten in der Simulation, mit vertretbarem Aufwand, nicht detailliert abgebildet werden. Stattdessen wurde ein geringerer Detaillierungsgrad gewählt. Die Ergebnisse der Simulation zeigten jedoch nur geringe Unterschiede des Energieeinsparpotentials. Die Belastbarkeit der Ergebnisse war, durch die geringe Detaillierungstiefe der Modelle, folglich nicht ausreichend, um darauf aufbauend eine Auswahl für eine Maschine mit einer Antriebsstrangkonfiguration zu treffen. Es wurden stattdessen nach dem Ausschlussprinzip weitere Maschinen aus der Liste aus Tabelle 3 ausgeschlossen: Der innerbetrieblich genutzte Schlepper muss über längere Strecken emissionsfrei fahren können, da er häufig in geschlossenen Räumen arbeitet. Die hydraulischen Antriebsstrangvarianten fallen hierbei als Möglichkeiten weg, da Hydrospeicher eine zu geringe Energiedichte aufweisen. Die hohe Energiedichte elektrischer Speicher legt ein diesel-elektrisches System nahe. Dies kann im Schlepper jedoch nur genutzt werden, wenn gewährleistet ist, dass das Fahrzeug genügend Einsatzzeit im Freien hat, wo der Betrieb des Verbrennungsmotors möglich

ist, um den Speicher zu laden. Da dies nicht dem Standardeinsatz eines innerbetrieblich genutzten Schleppers entspricht, wird diese Maschine für die weiteren Untersuchungen nicht weiter verfolgt.

Der Mobilbagger bietet grundsätzlich ein ähnliches Potential wie ein Radlader oder ein Teleskoplader. Jedoch sind die Fahrgeschwindigkeiten geringer und die Reversiervorgänge in der Regel seltener. Gegenüber dem Radlader und dem Teleskoplader bietet

der Mobilbagger also keinen Potentialvorteil, und wird folglich nicht weiter verfolgt.

Die Walze bietet ebenfalls nur ein geringeres Potential als Radlader, Teleskoplader und Gabelstapler, da einerseits die Fahrgeschwindigkeiten gering sind (in der Regel $v < 6\text{km/h}$) und andererseits keine Möglichkeit der Rekuperation aus Arbeitsantrieben ersichtlich ist.

Walze und Mobilbagger bieten sich zwar technisch durchaus für eine Hybridisierung an, das Potential bei Radladern, Teleskopladern und Gabelstaplern ist jedoch größer. Nur diese drei Maschinentypen werden daher weiterverfolgt.

den bisher verwendeten Modellen im Wesentlichen durch einen höheren Detaillierungsgrad unterscheiden. Über Ergebnisse wird berichtet werden.

Literaturhinweise

[1] Rabe, M.: BTL-Kraftstoffe aus Sicht von VW. Tagung: 2. Internationaler BtL-Kongress. Berlin 12.10.2006. Im Internet: ftp://fnr-server.de/pdf/literatur/pdf_247index.htm Stand: 23.08.2007
 [2] Kunze, G. und A. Winger: Möglichkeiten und Grenzen der Senkung des Energieaufwands bei Hybridantrieben. Tagung: Hybridantriebe für Mobile Arbeitsmaschinen. S. 157-165. Karlsruhe 22.02.2007
 [3] Djurovic, M.: Energiesparende Antriebssysteme für die Arbeitshydraulik Mobiler Arbeitsmaschinen „Elektrohydraulisches Flow-Matching“. Diss. TU Dresden 2007
 [4] Geimer, M.: Hybridantriebe in Mobilen Arbeitsmaschinen. In: Komponenten und Systeme für Mobile Arbeitsmaschinen. S. 8-10. VDMA, 2006
 [5] Tödter, J.: Hybride Antriebsstrukturen für verbrennungsmotorisch betriebene Gegengewichtstapler. Tagung: Hybridantriebe für Mobile Arbeitsmaschinen. S. 125-137. Karlsruhe 22.02.2007

Tabelle 3

Schlepper (innerbetrieblich)
Portalhubwagen
Teleskoplader
Entsorgungsfahrzeug
Gabelstapler
Radlader
Bagger (Materialumschlag)
Walze

Stufe 3

In der dritten, aktuell laufenden Stufe der Auswahl, wird aus den verbleibenden drei Maschinentypen und vier Antriebsstrangkonfigurationen die Kombination mit dem größten Potential ermittelt. Hierfür werden Simulationsmodelle aufgebaut, die sich von



Foto: Werner Rostan

Guatemala: Wieder Boden unter den Füßen

Guatemala ist ein gebeuteltes Land. Fast 40 Jahre Bürgerkrieg haben es gespalten, verschuldet, verwüstet. Um der Bevölkerung buchstäblich wieder Boden unter

den Füßen zu geben, treibt die lutherische Kirche ILUGUA im Osten des Landes vor allem die nachhaltige Landwirtschaft voran. Und sie arbeitet mit Menschenrechtsorganisationen zusammen, damit die Menschen

die psychischen Folgen der blutigen Massaker von Rebellen und Regierungstruppen verarbeiten können.

Helpen Sie uns, dieses Projekt zu unterstützen.



Postbank Köln
 Konto 500 500-500
 BLZ 370 100 50

ENGLER
 STEUER-, MESS- UND REGELTECHNIK

PAN – Temperatur- und Niveaumessung
 Neue Technik, die bewegt!

- Zwei Anzeigen für Temperatur und Niveau – individuell einstellbar
- Individuelle Sensorlängen mit hoher Auflösung
- Hohe Flexibilität in der Anwendung
- Schalt- und Analogausgänge
- Komfortable und einfache Bedienung
- und vieles mehr ...

Mehr Informationen unter:

Tel.: +49 (0) 73 89-90 92-0
 Fax: +49 (0) 73 89-90 92-40
 E-mail: info@engler-msr.de
www.engler-msr.de
 Lange Straße 151
 D-72535 Heroldstatt

www.hydropa.de

Wir machen es einfach!

HYDROPA – IHR PARTNER FÜR HYDRAULIK SEIT 1965

KOMPONENTEN ANTRIEBSTECHNIK AGGREGATE

Hydropa GmbH & Cie. KG
 Därmannsbusch 4
 58456 Witten
 Tel: 02302 - 70 12 0
 E-Mail: info@hydropa.de

HYDRAULISCHE ERZEUGNISSE GMBH & CIE. KG