

# Hybridantriebe im Garten- und Landschaftsbau

PHILLIP THIEBES, MARCUS GEIMER

Energieeffizienz ist ein sogenanntes Megathema. In Industrie, Forschung und Gesetzgebung genauso wie in der breiten Öffentlichkeit wird darüber diskutiert, beraten, geforscht und entwickelt. Dabei lassen sich drei Treiber hinter dem Begriff ausmachen: Reduzierungsbemühungen bei CO<sub>2</sub>-Emissionen, steigende Energiekosten und der Wunsch nach stärkerer Rohstoffunabhängigkeit. Was bedeutet das für den GaLaBau?

**B**ei stationären (Strom)-Verbrauchern ist der Weg klar vorgezeichnet: Fossile Kraftwerke werden durch regenerative ersetzt. Auch für Gebäude- und Prozesswärme gibt es Wege: Kraft-Wärme-Kopplung, Geothermie oder Solarthermie. Aber wohin geht es mit den mobilen Verbrauchern? Die Öffentlichkeit konzentriert sich gern auf das emotionalisierte Thema Pkw. Hier wird das Elektrofahrzeug propagiert. Wann dieses nennenswerte Anteile am Pkw-Markt erobert hat, bleibt offen. Lassen sich die Pkw-Ideen auf Radlader, Traktoren und Co. übertragen? Ist ein batterie-elektrischer Mähdrescher die Lösung?

Ein erfolgversprechender Weg ist die Hybridisierung der Antriebsstränge dieser mobilen Arbeitsmaschinen. Die Kombination verschiedener Energiequellen in einem Antriebsstrang macht den Dieselmotorkraftstoff nicht gleich überflüssig, aber er kann die Ener-

gieeffizienz steigern und auch noch weitere Vorteile mit sich bringen.

In diesem Artikel soll geklärt werden, was ein Hybridantrieb eigentlich ist, welche Vorteile er bei Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen – speziell im Garten- und Landschaftsbau – bringen kann. Und es soll ein

trieb auf. Die Stufenlosigkeit ist jedoch kein notwendiges Kriterium, um von einem Hybridantrieb zu sprechen.

Was diese Definition offen lässt, ist, von welcher Art die (mindestens) zwei Speicher sind. Grundsätzlich stehen Speicher verschiedener physikalischer Prinzipien zur

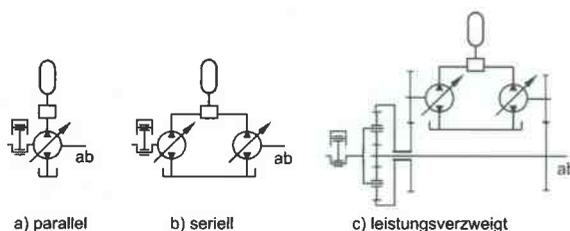


Abbildung 1: Antriebsstrangkongfigurationen

Überblick über den Stand der Technik gegeben werden. Der Speicher als Schlüsselkomponente soll besondere Beachtung finden.

## Definition Hybridantrieb

Wie definiert sich ein Hybridantrieb? Die UNECE<sup>1)</sup> definierte 2005 den Begriff Hybridfahrzeug wie folgt: Ein „Hybridfahrzeug“ bezeichnet ein Fahrzeug, in dem mindestens zwei Energieumwandler und zwei Energiespeichersysteme (im Fahrzeug eingebaut) vorhanden sind, um das Fahrzeug anzutreiben (UNE05). Am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wurde folgende Definition eines Hybridantriebs für mobile Arbeitsmaschinen erarbeitet. Ein Hybridantrieb zeichnet sich aus durch:

1. Mindestens zwei voneinander unabhängige Energiequellen
2. (Rück-)Speisbarkeit von Energie in mindestens einer dieser Quellen

Weiterhin treten manche Vorteile eines Hybridantriebs nur in Verbindung mit einem stufenlosen Getriebe bzw. bei Entkopplung des primären Antriebs vom Ab-

Verfügung. Von den diversen theoretisch möglichen Speichern lassen sich nach heutigem Wissen nur einige wenige als praxisrelevant bezeichnen. Dies sind Hydrospeicher, elektro-chemische Batterien, Doppelschichtkondensatoren sowie elektro-mechanische Schwungradspeicher. Auf den Speicher als Schlüsselkomponente eines Hybridantriebs wird weiter unten detailliert eingegangen.

Weiterhin ist es sinnvoll, hybride Antriebsstränge nach den drei Grundtypen – parallel, seriell und leistungsverzweigt – zu unterscheiden. Für hydrostatische Hybridantriebe sind diese drei Typen in Abbildung 1 dargestellt. Von den Grundtypen parallel, seriell und leistungsverzweigt gibt es verschiedene Ausprägungen und Mischformen. Besonders, wenn auch Arbeitsantriebe einbezogen werden, trifft diese simple Einteilung auf ihre Grenzen.

Um weiterhin verschiedene Konzepte miteinander vergleichen zu können, empfiehlt sich eine systematische Gliederung unter Einführung des Hybridisierungsgrades  $\alpha_{\text{hybrid}}$ . Dieser ist definiert als das Verhältnis der Leistung des sekundären Antriebs zu der des primären. In Abbildung 2 sind verschiedene mobile Arbeitsmaschinen mit hybriden Antrieben nach der systematischen Gliederung dargestellt.

<sup>1)</sup> UNECE: United Nations Economic Commission for Europe

## Stand der Technik

Hybride Antriebe sind in mobilen Arbeitsmaschinen und Fahrzeugen keine neue Idee. Bereits in den 1970er Jahren wurden solche Antriebe untersucht und entwickelt. Auslöser waren die drastischen Ölpreiserhöhungen in dieser Zeit. Mit den wenig später wieder sinkenden Ölpreisen verschwanden die Konzepte jedoch in den Schubladen. Der Durchbruch dieser Technik gelang 1997 im Pkw mit dem Toyota Prius. Seitdem werden in kürzeren Abständen von (fast) allen Pkw-Herstellern immer wieder neue Hybrid-Modelle vorgestellt. Dies ist neben technischen Erwägungen jedoch vor allem auch Marketinggründen geschuldet.

Bei den mobilen Arbeitsmaschinen hat der Trend zur Hybridisierung mit etwas Verzögerung eingesetzt. Mittlerweile existieren einige wenige Serien- und seriennahe Maschinen sowie diverse Demonstratoren und Prototypen. Eine repräsentative Übersicht darüber gibt Abbildung 3 ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Aus dieser Abbildung wird ersichtlich, dass es mehr elektrische als hydraulische Systeme gibt. Auch ist zu erkennen, dass der angekündigte Serienstart häufig nicht eingehalten werden konnte. Auf viele der Demonstratoren ist auch nach Jahren keine Serienmaschine gefolgt.

## Effekte eines Hybridantriebs

Hybridantriebe bieten die Möglichkeit, verschiedene Effekte zu nutzen. Am bekanntesten dürfte die Rekuperation (Bremsenergie rückgewinnung) sein: Bewegungsenergie, die beim konventionellen Bremsen über Brems Scheiben oder Hydraulikventile in Wärme umgesetzt wird – und damit im Fahrzeug technisch nicht weiter verwendbar ist – kann mit einem Hybridantrieb zurückgewonnen und zwischengespeichert werden. Damit steht die Energie für weitere Beschleunigungsvorgänge erneut zur Verfügung. Regeneration bezeichnet einen sehr ähnlichen Vorgang – die Nutzbarmachung ansonsten verlorener Bremsenergie, allerdings zur direkten Nutzung ohne Zwischenspeicherung. So kann beispielsweise die Bremsenergie des Fahrtriebs eines Radladers direkt Verwendung finden im Anheben des Hubwerks. Sowohl bei der Rekuperation als auch bei der Regeneration werden die konventionellen Bremsen nicht verwendet – es findet folglich auch kein Verschleiß an Brems Scheiben und Bremsklötzen statt. Dadurch verringern sich die Feinstaubemissionen und die Wartungsintervalle verlängern sich. Neben der kinetischen Energie des Fahrtriebs kann auch kinetische Rotations-

energie oder potentielle Energie verwendet werden (Siehe Abbildung 4).

Eine Liste weiterer Effekte zeigt Tabelle 1. Ausgewählte Einträge werden an dieser Stelle erläutert.

Unter Betriebspunktverschiebung ist die Veränderung von Drehmoment- und Drehzahlanforderung des Verbrennungsmotors gemeint, in der Regel hin zu Bereichen besserer Verbrennung; wobei „besser“ in Bezug auf spezifischen Verbrauch (Kraftstoffmasse pro erzeugter mechanischer Energie) oder auch Emissionen (Ruß, NO<sub>x</sub>, CO, HC bzw. Geräusch) bezogen werden kann. Verdeutlicht ist die Betriebspunktverschiebung in Abbildung 5. Eine Verschiebung

auf einer Leistungshyperbel wird durch Veränderung der Getriebeübersetzung erreicht, ein Hybridantrieb ist dazu nicht notwendig. Eine Verschiebung des Betriebspunktes hin zu einer anderen Leistungshyperbel wird durch Energieentnahme oder Speicherung im Speicher des Hybridantriebs ermöglicht. Betrachtet man die Betriebspunktverschiebung nicht im Motorkennfeld, sondern auf einer Zeitachse, also die Veränderung der Leistung des Verbrennungsmotors als Funktion der Zeit, lässt sich der Effekt der Phlegmatisierung (Beruhigung) anschaulich darstellen (Abbildung 6). Eine gezielte Glättung dieses Verlaufs hat die Verminderung von stofflichen und akusti-

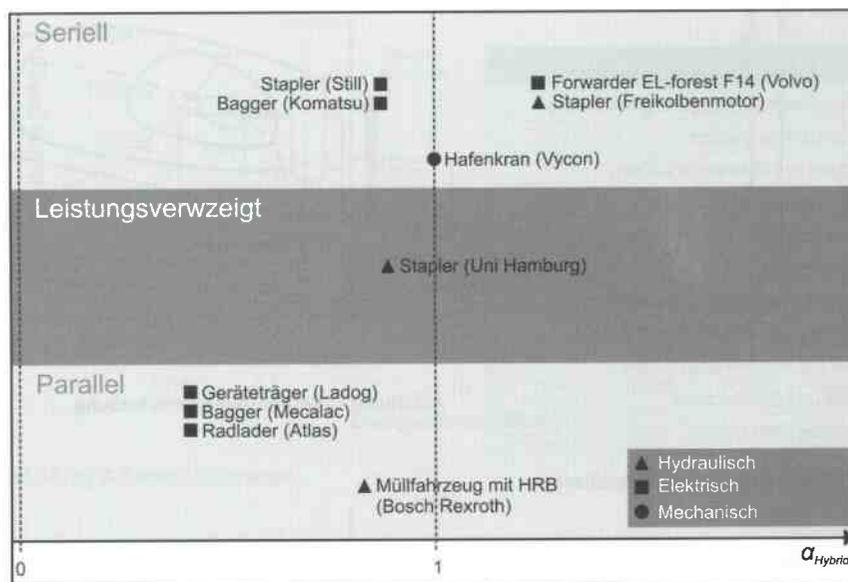


Abbildung 2: Ausführungsvarianten von Hybridantrieben in mobilen Arbeitsmaschinen.

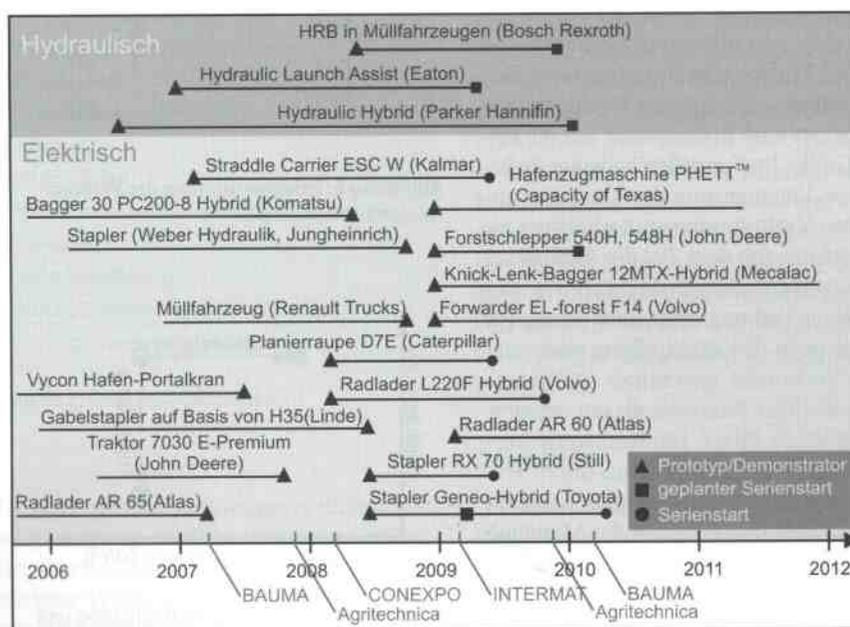


Abbildung 3: Serien- und seriennahe Maschinen und Demonstratoren hybrid getriebener Arbeitsmaschinen.

schen Emissionen des Verbrennungsmotors zum Erfolg, da die kritischen transienten Zustände des Motors verringert werden. Auch der Kraftstoffverbrauch wird dadurch positiv beeinflusst.

Hilfreich ist es, an dieser Stelle die Begriffe Downsizing und Rightsizing zu erläutern und gegeneinander abzugrenzen. Der Begriff des Downsizings kommt aus der Verbrennungsmotorenentwicklung und beschreibt das Bestreben, gleiche Leistung mit weniger Hubvolumen zu erreichen. Dies geht einher mit einer Verbesserung des Wirkungsgrades. Um dies zu erreichen, wird der Motor mit höheren Mitteldrücken betrieben. Die höheren Mitteldrücke führen dazu, dass die Verluste durch Wand-

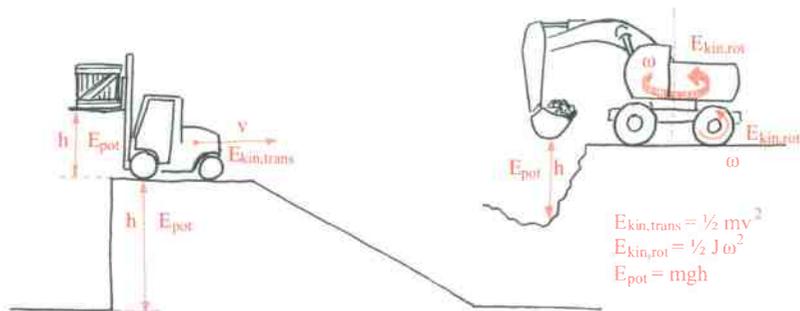


Abbildung 4: Rekuperierbare Energieformen.

Effekte
Betriebspunktverschiebung/Phlegmatisierung
Rekuperation/Regeneration
Entkopplung von Nebenverbrauchern
Verschleißfreies Bremsen
Emissionsminderung (akustisch, stofflich)
Downsizing/Rightsizing
Leerlaufabschaltung / Start-Stopp-Betrieb
Unterstützung von Schaltvorgängen
Beruhigen des Verbrennungsmotors
Reichweite und Aktionsradius
Emissionsfreie Fahrt (lokal)

Tabelle 1: Durch Hybridisierung nutzbare Effekte

wärmeübergang, Ladungswechsel und die mechanischen Verluste verringert werden. Erreicht wird die Erhöhung des Mitteldrucks in der Regel durch die Vergrößerung des Verdichtungsverhältnisses und/oder Turbo- oder Kompressoraufladung. Rightsizing hingegen bezeichnet im Allgemeinen eine Reduzierung auf die optimale Größe. Im Speziellen bedeutet Rightsizing die Verringerung der absoluten installierten Verbrennungsmotorleistung einer Maschine, mit dem Ziel der Anpassung an den tatsächlichen Bedarf [Thi09]. Ein rightsizierter Verbrennungsmotor geringerer Leistung ist in der Anschaffung preiswerter, im Verbrauch sparsamer und beansprucht weniger Bauraum als ein entsprechend größerer Motor. Die verringerte Verbrennungsmotorleistung kann durch Hybridisierung kompensiert werden, wodurch die Gesamtleistungsfähigkeit der Maschine nicht nötigerweise verringert, eventuell sogar gesteigert wird (siehe Abbildung 8). Fälschlicherweise werden die Begriffe Rightsizing und Downsizing häufig verwechselt. Eine Verdeutlichung der Unterschiede der beiden Begriffe zeigt Abbildung 7.

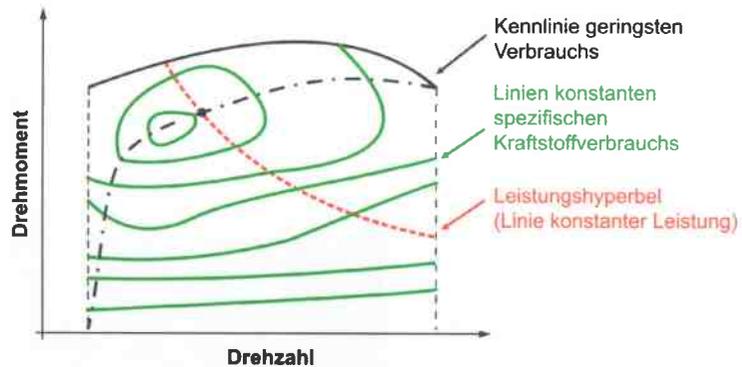


Abbildung 5: Betriebspunktverschiebung.

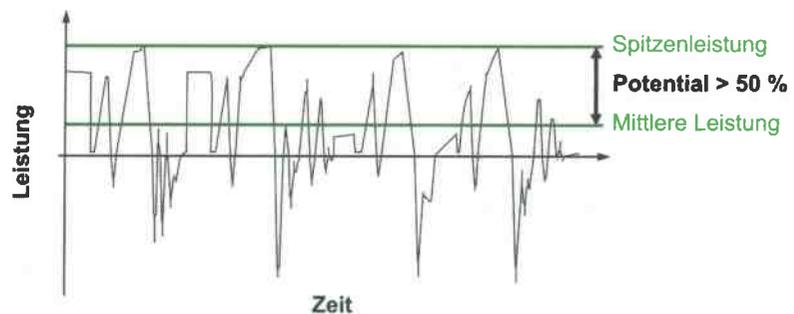


Abbildung 6: Phlegmatisierung der Verbrennungsmotorleistung.

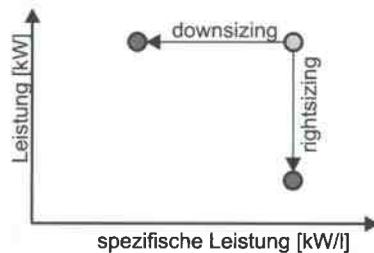


Abbildung 7: Unterscheidung Rightsizing und Downsizing.

### Schlüsselkomponente Speicher

Dem Speicher – präziser dem sekundären Speicher – kommt bei hybriden Antrieb spezielle Bedeutung zu. Die Eigenschaften des Speichers definieren maßgeblich die Eigenschaften des gesamten Antriebs. Eine aussagekräftige Kennzeichnung eines Speichers lässt sich über sein spezifisches Leistungsvermögen (in W/kg oder W/l) und seinen spezifischen Energiegehalt (in Wh/kg oder Wh/l) erreichen. Diese Größen lassen sich übersichtlich im so genannten Ragone-Diagramm darstellen [RAG68], siehe Abbildung 9. Zum Vergleich ist dort auch die spezifische Energie von Dieselöl und Wasserstoff dargestellt. Allerdings reichen diese



Abbildung 8: Leistungskompensation beim Rightsizing.

Eigenschaften nicht aus, um einen Speicher vollständig zu beschreiben. Zusätzlich zu den im Ragone-Diagramm dargestellten Eigenschaften sind zum Beispiel die Zyklenfestigkeit, also die Zahl der Ladespiele, die der Speicher schadensfrei erträgt; ebenso die kalendarische Alterung, die den Speicher unabhängig von der Belastung im Laufe der Zeit schädigt und Themen der Platzierung in der Maschine – aus thermischen und geometrischen Gesichtspunkten – sowie Wartungs- und Kühlungsaspekte zu berücksichtigen. Eine Übersicht der wesentlichen Bewertungskriterien gibt Tabelle 2.

Derzeit werden für Hybrid-Pkw Li-Ion-Batterien bevorzugt. Diese bringen als Hauptvorteil eine hohe Energiedichte bei gleichzeitig befriedigender Leistungsdichte mit sich. Dem gegenüber stehen die extrem hohen Anschaffungskosten und die mangelhafte Lebensdauer. Die Kosten werden sich in den nächsten Jahren sowohl durch technologische Weiterentwicklung als auch durch Skaleneffekte verbessern – teuer werden diese Batterien aber auf absehbare Zeit dennoch bleiben. Die geringe Lebensdauer setzt sich aus zwei Effekten zusammen: die kalendarisch und die zyklische Alterung. Erstere geschieht unabhängig von der Nutzung der Batterie; durch langsam ablaufende chemische Prozesse verringern sich die Kapazität und der Innenwiderstand (kalendarische Alterung). Darüber hinaus altert die Batterie durch ihre Nutzung (zyklische Alterung). Um dem entgegenzuwirken werden Batterien daher so groß dimensioniert, dass nur ein geringer Anteil der gespeicherten Energie genutzt werden muss und die zyklische Alterung verringert wird. Beispiel: Wird tatsächlich eine Kilowattstunde benötigt, wird eine Batterie mit einer Nennkapazität von fünf Kilowattstunden eingebaut, diese dann aber nie unter 60 Prozent entladen und nie über 80 Prozent geladen. Dieser so erreichten längeren Haltbarkeit der Batterie stehen die Kosten (und das Gewicht sowie der Bauraum) für eine Batterie fünffacher Kapazität gegenüber.

## Besonderheiten beim Einsatz im GaLaBau

Aus dem Blickwinkel des Maschinenbaus unterscheiden sich mobile Arbeitsmaschinen für den Garten- und Landschaftsbau nicht grundsätzlich von solchen, die in der Landwirtschaft, der Forstwirtschaft, der Bauwirtschaft oder im Kommunalbereich eingesetzt werden. Arbeitsausrüstungen, Antriebsstränge, Fahrwerke, elektrische und elektronische Systeme etc. lassen sich in ähnlichen oder gleichen Ausprägungen in allen diesen Bereichen antreffen. Kennzeichnend ist jedoch, dass im Garten- und

lungsmerkmal, das entsprechende Vorteile für den Hersteller bietet. Zusätzlich ist zu bemerken, dass universell einsetzbare Maschinen – wie Radlader – häufig als Stand-By-Maschinen verwendet werden: Wenn beispielsweise Material per Radlader an seinen Bestimmungsort gebracht wird, dort aber lokal von Hand verteilt wird, läuft der Radlader in der Regel im Leerlauf weiter, obwohl keine Leistung abgefordert wird. Solche Leerlaufsituationen treten im GaLaBau bei verschiedenen Maschinen regelmäßig auf und bieten ein enormes Kraftstoffesparpotential durch eine Start-Stopp-

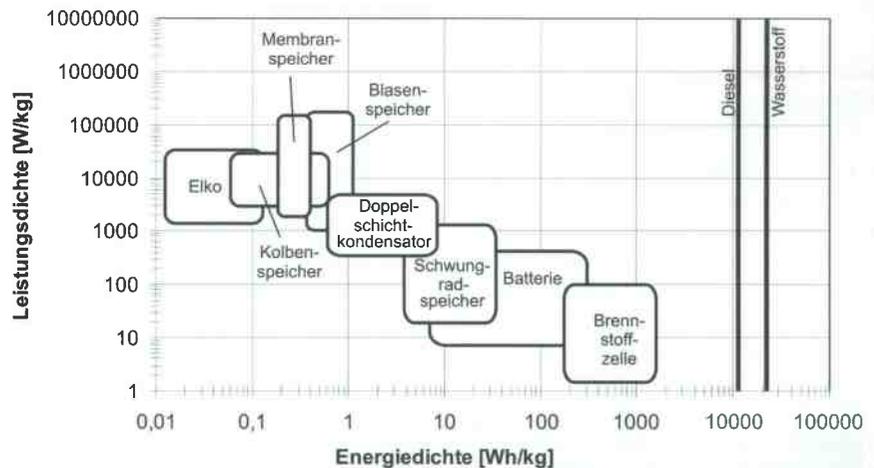


Abbildung 9: Ragone-Diagramm.

### Bewertungskriterien

Gewicht
Bauraum
Freiheit der Platzierung
Geometrische Gestaltungsfreiheit
Energetisches Potential/Zeitgewinn
Wirkungsgrad
Verfügbarkeit/Serienreife
Kosten
Unfallverhalten
Emissionen (stofflich/akustisch)
Steuerbarkeit
Servicefreundlichkeit
Alterungsverhalten (kalendarisch/zyklisch)
Recycling/Lebenszyklusbetrachtung

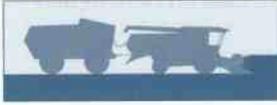
Tabelle 2: Bewertungskriterien

Landschaftsbau überwiegend kleine Maschinen bis ca. 5000 kg eingesetzt werden. Bei diesen Maschinenklassen ist ein generell härterer Wettbewerb am Markt festzustellen, was einerseits als Hürde für die Einführung eines mit Mehrkosten verbundenen Hybridantriebs zu sehen ist. Andererseits ist ein solcher Antrieb ein Alleinstel-

lungsmittel. Außerdem treten auch Maschinenzustände geringer Auslastung relativ häufig auf, so zum Beispiel bei leichten Planier-, Positionier- und Rangierarbeiten. Die geringe Auslastung bietet das Potenzial, durch Rightsizing einen nennenswerten Einspareffekt zu erzielen. Allerdings ist zu bemerken, dass kleine Firmen nicht die Kapazität haben, um selbst Hybridantriebe zu entwickeln. Der Zukauf des Systems ist mangels entsprechender Anbieter derzeit kaum möglich. Alternativ bietet sich die Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen an, um einen maßgeschneiderten Antrieb zu entwickeln. Dies wird derzeit auch von Mobima am KIT angeboten und mit verschiedenen Maschinenherstellern durchgeführt.

## Ausblick

Wasserstofftechnologie – noch vor wenigen Jahren war das Zauberwort für die Mobilität von morgen. Mittlerweile heißt das Zauberwort Elektromobilität, der Brennstoffzellenantrieb ist vorerst in weite Ferne gerückt. Aber auch batterie-elektrische Fahrzeuge dürften noch auf absehbare Zeit eine Nischenerscheinung bleiben. Die mo-

Speichergröße für einen elektrisch angetriebenen Mähdrescher	
Dieselmotorisch	Elektrisch
Verbrauch	500 l/Tag
Tankgewicht und -größe	<0,5 t; 0,5 m <sup>3</sup>
Energiedichte Diesel	35 MJ/l; 42,7 MJ/kg
Energiegehalt Diesel	17,5 GJ
angenommener Wirkungsgrad VKM	35 %
notwendige mechanische Energie	6,125 GJ
angenommener Wirkungsgrad E-Antrieb	90 %
Energiegehalt elektrisch	6,8 GJ = 1,89 MWh
Energiedichte Li-Ion High Energy (Saft VL 6 A)	64,7 Wh/kg; 137 Wh/l
Speichergewicht und -größe (@ 100 % xyz-SOC)	29,2 t; 13,8 m <sup>3</sup>
Die benötigte Batterie wäre in Gewicht und Volumen vergleichbar mit der ursprünglichen Maschine	

**Tabelle 3: Rechenbeispiel Elektroantrieb**

mobile Energiebereitstellung – für straßengebundene Fahrzeuge ebenso wie für mobile Arbeitsmaschinen – wird in der Masse der Anwendungen mittelfristig nicht um die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen herumkommen. Hierzu ist in Tabelle 3 ein einfaches Rechenbeispiel gezeigt, aus dem hervorgeht, dass allein der elektrische Speicher die Dimensionen der Gesamtmaschine annehmen würde und das bei einem  $\Delta$ -SOC<sup>2)</sup> von 100 Prozent, was wiederum eine kurze Lebensdauer zur Folge hätte [JOS06].

Wie oben beschrieben, bieten Hybridantriebe die Möglichkeit, insgesamt weniger Kraftstoff zu verbrauchen, bei ansonsten unveränderten Randbedingungen. Sie können folglich einen Beitrag zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten. Um die CO<sub>2</sub>-Bilanz weiter zu verbessern, bieten sich die Verwendung biogener Kraftstoffe an. Lo-

kal, am Auspuff der Maschine, entsteht zwar bei der Verbrennung dieser Kraftstoffe ebenso viel CO<sub>2</sub> wie bei konventionellen Kraftstoffen, allerdings ist dieses CO<sub>2</sub> zuvor bei der Erzeugung der Atmosphäre entzogen worden. Da die Gesamtbilanz der Biokraftstoffe der ersten Generation (zum Beispiel Biodiesel aus Raps oder Ethanol aus Zuckerrohr) nicht so positiv ist wie erhofft, konzentriert sich die Forschung mittlerweile auf die Kraftstoffe der zweiten Generation. Bei diesen werden Ganzpflanzen oder organische Reststoffe in chemischen Prozessen zu Kohlenwasserstoffen synthetisiert (zum Beispiel nach dem Bio-Liq-Verfahren [DIN08]). Diese Biokraftstoffe der zweiten Generation weisen deutlich bessere CO<sub>2</sub>-Bilanzen auf und die verschiedenen Technologien entweichen derzeit dem Labor- und Pilotstadium.

<sup>2)</sup> SOC: State of Charge = Ladezustand; -SOC: Änderung des Ladezustands/Entnommene bzw. eingespeiste Ladung.

## Stiftungslehrstuhl Mobile Arbeitsmaschinen

Die Autoren arbeiten am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Dipl.-Ing. Phillip Thiebes ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima). Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer ist Leiter des Lehrstuhls für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) und des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST). Am Stiftungslehrstuhl werden seit seiner Gründung 2005 Hybridantriebe für Mobile Arbeitsmaschinen untersucht und entwickelt. Neben Grundlagenforschung zu diesem Thema, werden Entwicklungsprojekte in Industriekooperation durchgeführt. Weiterhin veranstaltet das Mobima seit 2007 die Fachtagung „Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen“. Mit mittlerweile über 300 Teilnehmern fand die Tagung im Februar 2011 bereits zum dritten Mal statt.

## LITERATUR

- [DIN08] Dinjus, E.; Stand des bioliq-Prozesses des Forschungszentrums Karlsruhe. 3. BTL-Kongress 2008, Berlin.
- [JOS06] Jossen, A. und W. Weydanz: Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen. Ubooks, 2006.
- [RAG68] Ragone, D. V.: Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles. SAE Mid-Year Meeting, (1968), SAE Paper Nr. 680453.
- [THI09] Thiebes, P., M. Geimer und G. Jansen: Hybridantriebe abseits der Straße – Methodisches Vorgehen zur Bestimmung von Effizienzsteigerungspotentialen. Tagungsband: „Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen“ 2009 Karlsruhe, S. 125–135.
- [UNE05] UNECE: „Concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these prescriptions“ (Revision 2), Regulation No. 8