

Hybridantriebe abseits der Straße – Methodisches Vorgehen zur Bestimmung von Effizienzsteigerungspotentialen

Dipl.-Ing. Phillip Thiebes
Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Cand.-Ing. Gregor Jansen

Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen
Universität Karlsruhe (TH)
Gotthard-Franz-Str. 8
76131 Karlsruhe
e-mail: phillip.thiebes@ima.uni-karlsruhe.de

Abstract

In mobilen Arbeitsmaschinen haben sich Hybridantriebe heute noch nicht durchgesetzt. Definitionen und Begriffe werden zudem nicht einheitlich verwendet. Ein systematisches Vorgehen beim Entwicklungsprozess, das speziell auf die Hybridisierung von mobilen Arbeitsmaschinen eingeht, ist ebenfalls noch nicht allgemein bekannt.

Im vorliegenden Beitrag werden wichtige Definitionen gegeben und einschlägige Begriffe erläutert. Weiterhin wird eine methodische Herangehensweise vorgestellt, die den Entwicklungsprozess bei der Hybridisierung von mobilen Arbeitsmaschinen vereinfachen soll.

Schlüsselwörter: Hybridantrieb, Grundlagen, Methodik, Systematik, Effekte, Wirkungsweisen, Bewertungskriterien, Entwicklungsprozess.

1 Einleitung

Der Begriff Hybridantrieb wird heute in der Öffentlichkeit häufig verwendet. Bei Herstellern mobiler Arbeitsmaschinen ist ein wachsendes Interesse an hybriden Antriebssträngen zu erkennen, da durch Einsatz dieser Technologie nennenswerte Kraftstoffeinsparungen erwartet werden. Dem allgemeinen Interesse und der positiven Grundeinstellung stehen jedoch Hemmnisse im Wege:

- Es besteht keine Einigkeit bei den verwendeten Begrifflichkeiten,
- grundlegende Zusammenhänge und Optionen sind nicht allgemein bekannt und
- es fällt schwer, Kosten und Nutzen solcher Systeme bzw. Aufwand und Potential zu ermitteln.

In diesem Artikel sollen daher Grundlagen der Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen dargestellt werden (Kapitel 2). Weiterhin sollen Herangehensweisen zur Ermittlung von Potentialen vorgeschlagen und verglichen werden (Kapitel 3).

2 Definition und Systematik

Am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) der Universität Karlsruhe (TH) wird eine Definition für Hybridantriebe verwendet, bei der drei Kriterien zu erfüllen sind:

1. Nutzung mindestens zweier unterschiedlicher Energiequellen
2. Rückspeisbarkeit von Energie in mindestens eine der Quellen
3. Entkopplung der Drehzahl des primären Antriebs von der Abtriebsdrehzahl (Stufenloses Getriebe)

Diese Definition lässt eine Vielzahl von Antriebsstrangvarianten zu. Eine Systematik über die möglichen Varianten ist für das weitere Verständnis hilfreich und wird im Folgenden dargestellt.

Im Bereich der Pkw sind diverse Arbeiten über Hybridantriebe verfügbar. Die Systematik der Antriebsstrangvarianten ist in fast allen verfügbaren Veröffentlichungen gleich. Beispielhaft wird hier die Systematik in Anlehnung an /G1/ gezeigt ([Abbildung 2.1](#)). Diese Systematik ist für den Pkw-Bereich entwickelt worden und lässt sich auch sinnvoll auf Lkw und Busse anwenden. Für mobile Arbeitsmaschinen ist sie je doch nur bedingt anwendbar, da nur der Fahrtrieb, nicht jedoch die Arbeitsantriebe berücksichtigt werden. Gerade die Arbeitsfunktionen zeichnen jedoch die mobilen Arbeitsmaschinen aus. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, wurde eine andere Systematik entwickelt, die einerseits Arbeits-

antriebe mit einbezieht, andererseits auch die unterschiedlichen Energiequellen und Antriebsformen darstellt. In **Abbildung 2.2** ist diese Systematik in Form eines geordneten morphologischen Kastens visualisiert, drei Beispiele sind ebenfalls dargestellt.

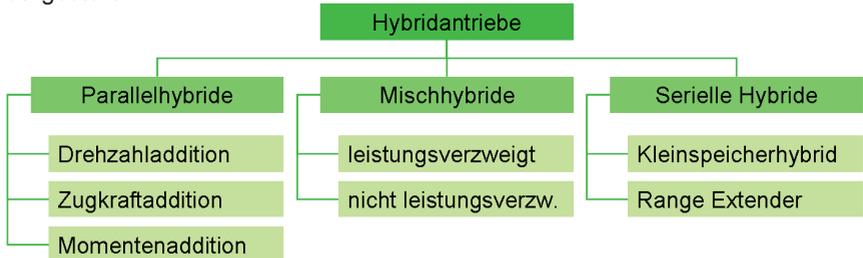


Abbildung 2.1: Systematik der Hybridantriebe für Pkw /T1/

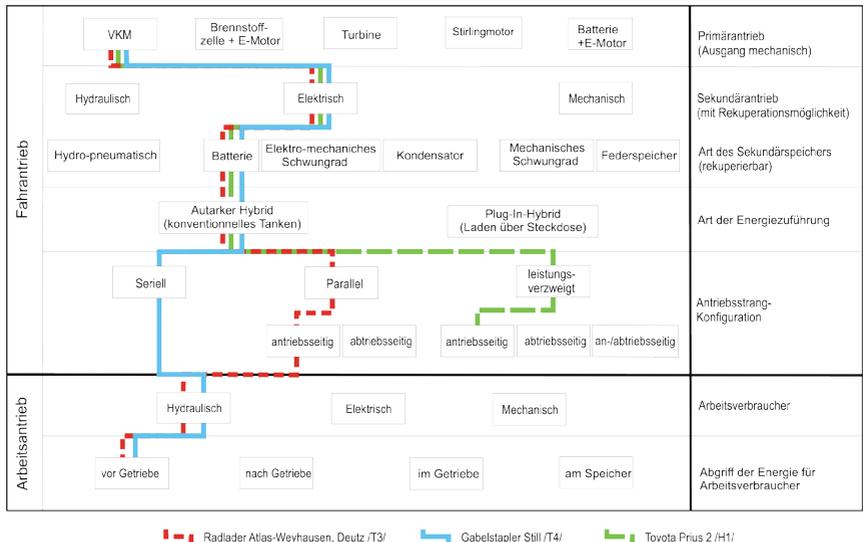


Abbildung 2.2: Systematik der Hybridantriebe mit Beispielen

3 Methodik

Wenn ein Maschinenhersteller in Erwägung zieht, eine Maschine mit Hybridantrieb zu entwickeln, lassen sich im Wesentlichen zwei unterschiedliche Ausgangssituationen unterscheiden:

1. Die zu hybridisierende Maschine ist noch nicht ausgewählt. Es soll ermittelt werden, ob und für welche Maschine sich die Hybridisierung lohnt. (Aus dem Maschinenpark soll(en) die Maschine(n) mit dem größten Potential ermittelt werden.)

2. Die zu hybridisierende Maschine ist bereits ausgewählt, es soll nun der optimale Antriebsstrang ausgewählt werden.

Beide Ausgangssituationen erfordern ein methodisches Vorgehen zur Zielfindung. Denn in dieser Situation eine Entscheidung aus dem Bauch heraus zu fällen, wäre leichtsinnig. Alle möglichen Varianten durchzuspielen ist auf Grund der Komplexität unmöglich. Folglich muss methodisch vorgegangen werden, um mit vertretbarem Aufwand zum Ziel zu gelangen. Ziel ist die Beantwortung der beiden oben umrissenen Fragen (Bei welcher Maschine ist der größte Nutzen durch eine Hybridisierung zu erreichen? Und wie sieht der beste Antriebsstrang für diese Maschine aus?).

Wie sieht das methodische Vorgehen aus? Zuerst ist zu klären, welche der in Kapitel 3.1 genannten Effekte genutzt werden sollen bzw. können. Als nächstes muss das Ziel differenziert formuliert werden. Dazu können Bewertungskriterien herangezogen werden, die in Kapitel 3.2 aufgelistet und beschrieben sind. Wenn die Effekte und die Ziele formuliert sind, sollten die Maschinen betrachtet werden; aus ihrem Betrieb und den Bewegungsabläufen lassen sich wichtige Rückschlüsse ziehen. Es ist hierbei zu unterscheiden, welche Datengrundlage dafür zur Verfügung steht. Als vierter Schritt ist zu empfehlen, dass die Schlüsselkomponente ‚Speicher‘ genauer betrachtet wird:

1. Welche Effekte sollen/können genutzt werden?
2. Welche Bewertungskriterien werden angelegt?
3. Analyse der Fahr- und Arbeitszyklen
4. Vorauswahl des Speichers
5. Vergleich konkurrierender Varianten mittels Simulationen

Wenn die ersten vier Schritte bearbeitet sind, kann das Schema aus Abbildung 2.2 herangezogen werden und entsprechend der ermittelten Erfordernisse eingeschränkt werden.

Im Folgenden werden die Schritte eins bis drei genauer beschrieben. Die Vorauswahl des Speichers wird nur ansatzweise behandelt, ebenso das weitere Vorgehen mittels Simulationen.

3.1 Effekte

Der bekannteste Effekt der mit einem Hybridantrieb zu erzielen ist, ist die Rekupe-ration kinetischer Energie, das sogenannte Nutzbremsen. Aber dies ist nicht der einzige Effekt, den ein Hybridantrieb bietet, auch ist es nicht immer der wichtigste. An dieser Stelle sollen alle relevanten Effekte aufgelistet und beschrieben werden:

Rekuperation (Nutzbremsen)

Unter Rekuperation versteht man die (teilweise) Rückgewinnung von Energie. Die rückgewinnbare Energie kann in kinetische und potentielle unterteilt werden. Wobei die kinetische wiederum in translatorische und rotatorische, und die potentielle Energie in solche der Gesamtmaschine und solche eines Teils der Maschine (z.B. Arbeitsausrüstung) aufgeteilt werden kann.

Während bei konventionellen Bremsen die kinetische Energie einer bewegten Masse in Wärme umgesetzt wird, wird sie bei der Bremsenergierückgewinnung in eine technisch nutzbare Energieform umgewandelt, wie zum Beispiel Volumenstrom und Druck oder Strom und Spannung. Sowohl translatorische kinetische Energie (fahrendes Fahrzeug) als auch rotatorische kinetische Energie (drehender Reifen, Baggeroberwagen) kann durch Nutzbremsen technisch nutzbar gemacht werden. Die potentielle Energie der Gesamtmaschine kann nicht unmittelbar genutzt werden, sie muss zuerst in kinetische Energie gewandelt werden (Bsp.: Bergabfahrt). Durch das Absenken einer Last mit einer Arbeitsausrüstung kann die potentielle Energie der Last und teilweise auch die der Ausrüstung rekuperiert werden. Beispiele rückgewinnbarer Energien sind in [Abbildung 3.1](#) visualisiert.

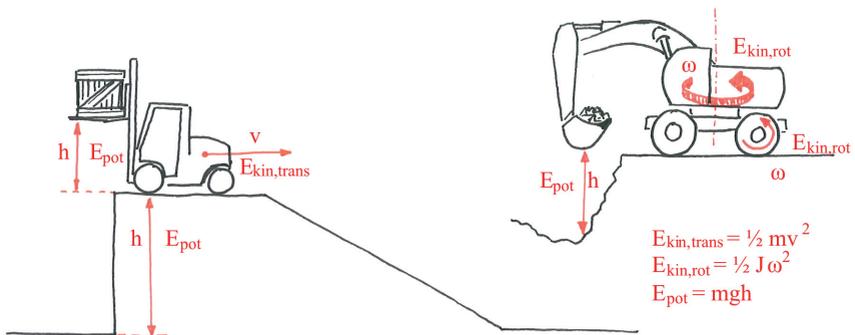


Abbildung 3.1: Kinetische und potentielle Energien

Leerlaufabschaltung / Start-Stopp-Funktion

Den schlechtesten Wirkungsgrad hat ein Verbrennungsmotor im Leerlauf. Er verbraucht Kraftstoff und gibt keine mechanische Leistung ab. Aus diesem Grund ist es naheliegend, in solchen Phasen den Motor vollständig abzuschalten. Zu beachten ist hierbei, dass stets genug Energie im sekundären Speicher vorhanden sein muss, um den Verbrennungsmotor erneut zu starten. Außerdem ist die Beeinflussung des Wärmehaushalts des Motors durch das häufige An- und Abschalten zu berücksichtigen.

Betriebspunktverschiebung

In einem konventionellen Antriebsstrang mit Stufengetriebe, wird die Verbrennungsmotordrehzahl durch die Geschwindigkeit des Abtriebs, das Verbrennungsmotormoment durch die Last am Abtrieb, bestimmt. Nur durch das Ändern der Gangstufe des Getriebes lässt sich der Betriebspunkt des Verbrennungsmotors verschieben, allerdings nur in diskreten Schritten. Liegt ein stufenloses Getriebe vor, so ist die Verbrennungsmotordrehzahl von der Abtriebsdrehzahl entkoppelt. In diesem Fall kann der Betriebspunkt verschoben werden, und zwar entlang der Leistungshyperbel. Ist zusätzlich ein Speicher im Antriebsstrang vorhanden, kann der Betriebspunkt auch jenseits der Leistungshyperbel verschoben werden (Abbildung 3.2). Zum Beispiel hin zu einem Bereich mit gewünschten Eigenschaften, wie z.B. geringer Verbrauch oder geringe Emissionen (NO_x, Ruß, CO, HC, Lärm).

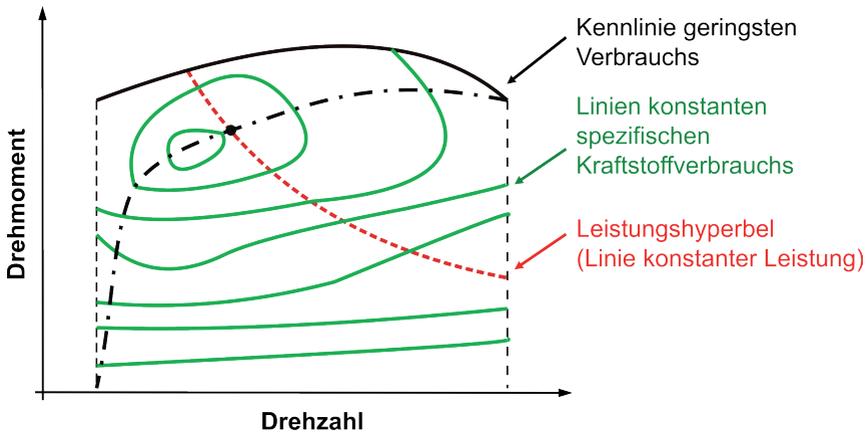


Abbildung 3.2: Motorfeld /T2/

Phlegmatisierung

Mit Phlegmatisierung ist der möglichst konstante Betrieb des Verbrennungsmotors gemeint, was sowohl auf Drehzahl als auch auf Drehmoment bezogen werden kann. Naheliegender ist es, den Motor möglichst konstant im Punkt des geringsten spezifischen Kraftstoffverbrauches zu betreiben. Lastspitzen und -senken werden über den sekundären Antrieb abgefangen.

Ein-Punkt-Betrieb (EPB)

Der EPB ist ein Spezialfall der Phlegmatisierung, bei der der Motor in exakt einem Betriebspunkt, nämlich im Punkt des geringsten spezifischen Kraftstoffverbrauches, betrieben wird.

Emissionsfreier Betrieb (lokal)

Da sich die gängige Literatur über Hybride meist nur auf Pkw bezieht, findet man in ihr meist auch nur den Begriff der emissionsfreien Fahrt. Da bei mobilen Arbeitsmaschinen nicht zwangsläufig die Fahrt im Vordergrund steht, sondern häufig die Arbeitsbewegung, wird vorgeschlagen, den Begriff des emissionsfreien Betriebs zu benutzen.

Ein emissionsfreier Betrieb lässt sich realisieren, indem die für den Betrieb benötigte Energie über den sekundären Antrieb aus dem Speicher entnommen wird. Die mögliche Dauer des emissionsfreien Betriebes hängt wesentlich von der Größe des Speichers, der Effizienz des Gesamtsystems und dem Einsatz der Maschine ab.

Downsizing

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 Wirkungsgrads. Um dies zu erreichen, wird der Motor mit höheren Mitteldrücken betrieben. Die höheren Mitteldrücke führen dazu, dass die Verluste durch Wandwärmeübergang, Ladungswechsel und die mechanischen Verluste verringert werden. Erreicht wird die Erhöhung des Mitteldrucks in der Regel durch die Vergrößerung des Verdichtungsverhältnisses und/oder Turboaufladung. Im Bereich der Hybridantriebe wird unter dem Begriff Downsizing häufig die absolute Verkleinerung der installierten Verbrennungsmotorleistung verstanden. Um die beiden unterschiedlichen Sachverhalte unterscheiden zu können, soll hier der Begriff Rightsizing mit unten stehender Bedeutung vorgeschlagen werden. Der Begriff Downsizing soll im Sinne der Verbrennungsmotorenentwicklung verwendet werden.

Rightsizing

Dieser Begriff ist nicht eindeutig definiert. Einerseits wird er als Euphemismus für Downsizing - also Verringerung des Hubraums bei gleichbleibender Leistung - verwendet. Andererseits kann unter dem Begriff aber auch eine absolute Verringerung der Verbrennungsmotorleistung verstanden werden. Zweitere Bedeutung soll hier verwendet werden. Die verringerte Verbrennungsmotorleistung kann durch Phlegmatisierung und Hybrid-Boost kompensiert werden, wodurch die Gesamtleistungsfähigkeit der Maschine nicht nötigerweise verringert, eventuell sogar gesteigert wird.

Entkopplung von Nebenverbrauchern

Neben der Kernaufgabe des Verbrennungsmotors - den Antriebsstrang mit Drehmoment zu versorgen - muss dieser diverse Nebenverbraucher, wie z. B. Klimakompressor, Lüfterrad, Lichtmaschine, etc. antreiben. Da diese Nebenver-

braucher in der Regel mechanisch an den Verbrennungsmotor gekoppelt sind, können sie nicht immer optimal betrieben werden; ihre Drehzahl ist im Allgemeinen festgelegt. Daher bietet es sich bei einem Hybridantrieb an, diese Nebenverbraucher vom Verbrennungsmotor zu entkoppeln, so dass sie unabhängig vom Verbrennungsmotor bedarfsgerecht angetrieben werden können.

Direkte Nutzung der rekuperierten Energie

Bei der Bremsenergierückgewinnung wird die rekuperierte Energie vorerst in einen Speicher geladen, um dann zu einem anderen Zeitpunkt bedarfsgerecht wieder entnommen werden zu können. Die direkte Nutzung der rekuperierten Energie vermeidet das häufige Wandeln der Energie, da keine Zwischenspeicherung notwendig ist. Stattdessen wird die gewonnene Energie zeitgleich von einem anderen Verbraucher genutzt. Durch das Vermeiden mehrerer Energiewandlungsschritte kann gegenüber der Nutzung mit Zwischenspeicherung ein besserer Wirkungsgrad erwartet werden. Auch werden die Speicher weniger belastet, was sich positiv auf deren Lebensdauer auswirkt.

Emissionsminderung (akustisch, stofflich)

Schadstoffemissionen des Verbrennungsmotors treten verstärkt in transienten Fahrzuständen auf. Die gängigen Emissionen bei einem Verbrennungsmotor sind: CO_x, NO_x, Partikel, Aldehyde und Lärm. Durch die Phlegmatisierung des Verbrennungsmotors werden transiente Zustände verringert, beim Ein-Punkt-Betrieb sogar vollständig vermieden. Die Rohemissionen können dadurch reduziert werden, eine aufwendige Abgasnachbehandlung kann gegebenenfalls entfallen.

Hybrid-Boost

Unter einem Hybrid-Boost versteht man die Addition von Primär- und Sekundärleistung um somit eine höhere Gesamtleistung als nur durch einen Antrieb (den Primärtrieb) zu bekommen. Dieser Boost steht solange zur Verfügung, wie der sekundäre Speicher Energie bereitstellt¹.

Mobiles Kraftwerk

Durch den Einsatz von Hybridtechnik wird die Verwendung von mobilen Arbeitsmaschinen als mobile Kraftwerke interessant. Bereits realisierte Beispiele für solch ein Kraftwerk auf Rädern sind Traktoren. Die Abgabe von Leistung für Anbaugeräte mittels Zapfwelle und Hydraulikanschlüssen ist hier schon lange Standard. Bei elektrischen Hybriden ist es mit geringem Aufwand möglich, auch elektrische Leistung an externe Verbraucher abzugeben. Wobei nicht nur elektri-

¹Der Hybrid-Boost ist nicht mit dem sogenannten Turbo-Boost oder Turbo-Overboost zu verwechseln. Hierbei wird eine kurzzeitige Ladedruckerhöhung erlaubt, um eine höhere Leistung des Verbrennungsmotors zu realisieren. Dies ist machbar, wenn dem Motor thermische Kapazitäten zur Verfügung stehen und die angeschlossenen Getriebekomponenten die erhöhte Last schadensfrei übertragen können.

fizierte Anbaugeräte, sondern auch Geräte, die klassischerweise an Stromgeneratoren betrieben werden, Verwendung finden können.

3.2 Bewertungskriterien

Beim Vergleichen verschiedener Optionen, mit dem Ziel, die „beste“ auszuwählen, muss klar sein, nach welchen Kriterien bewertet wird. Beim Vergleich von Hybridantrieben bieten sich folgende Bewertungskriterien an, wobei die Gewichtung der Kriterien zueinander individuell erfolgen muss.

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

Die aufgelisteten Kriterien können zur Beurteilung für Komponenten, Teilsysteme oder das Gesamtsystem verwendet werden.

3.3 Analyse des Maschinenbetriebs/Datengrundlage

Um für eine oder mehrere Maschinen eine Aussage bezüglich ihres Potentials durch eine Hybridisierung machen zu können, sind Informationen über den zu erwartenden Betrieb notwendig. Diese Daten können von unterschiedlicher Detailliertheit sein. Folgend sind verschiedene Informationen, die über eine Maschine und deren Betrieb vorliegen können, kategorisiert und zwar in der Reihenfolge von einfacher Verfügbarkeit zu schlechter Verfügbarkeit:

- Qualitative (verbale) Beschreibung
- Einfache Messdaten: Informationen aus dem Tachometer und anderen Bordinstrumenten sowie Videoaufnahmen, Messungen mit Stoppuhren etc.
- Daten aus Steuergeräten. Beispiele für Daten aus Motorsteuergeräten in /T3/
- Simulationsergebnisse
- Messdaten von Versuchsfahrzeugen
- Normierte und standardisierte Zyklen. Beispiele in VDI 2198 und /D1/.

Leider korreliert die Verfügbarkeit der Daten meist umgekehrt mit deren Qualität und Detailliertheit. Allerdings lassen sich auch auf Basis der leicht verfügbaren Daten bereits qualitative Aussagen machen, erste Abschätzungen bezüglich des Potentials sind möglich.

3.4 Vorauswahl des Speichers

Der Speicher stellt zweifelsfrei eine Schlüsselkomponente in einem hybriden Antriebsstrang dar. In Abbildung 2.2 sind verschiedene mögliche Speicher aufgezählt. Als erste Kenngrößen können die spezifischen gravimetrischen und volumetrischen Energie- und Leistungsdichten zum Vergleich verschiedener Speichersysteme herangezogen werden. Diese sind anschaulich im Ragone-Plot darstellbar [72]. Allerdings sind diese Werte keineswegs aussagekräftig genug, um allein darauf eine Speicherauswahl zu begründen. Viele der in Kapitel 3.2 genannten Bewertungskriterien lassen sich auch auf Speicher anwenden. Besonders interessant sind bei dieser Komponente die Themen Zyklusfestigkeit, Gewicht und Bauraum. Aber auch die Verfügbarkeit ist bei den verschiedenen Speichern sehr unterschiedlich. Ist die Speicherauswahl erfolgt, ergibt sich daraus meist die Auswahl des sekundären Antriebs, was die Anzahl der möglichen Varianten entsprechend Abbildung 2.2 signifikant einschränkt.

3.5 Einsatz von Simulationssoftware

Durch die vorangegangenen Schritte wurde eine Lösungsmenge definiert, die die angelegten Kriterien erfüllt. Eine quantitative Abschätzung von Kraftstoffverbräuchen könnte nun über den Bau von Prototypen erfolgen. Allerdings ist der Aufwand für eine Simulation deutlich geringer. Es empfiehlt sich daher, ausgewählte Antriebsstrangvarianten in ausgewählten Maschinen per Simulationsmodell abzubilden und die Simulationsergebnisse zu analysieren.

4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Artikel wurden wichtige Begriffe geklärt sowie Vorgehen beschrieben, die die Potentialabschätzung und Entwicklung von Hybridantrieben für mobile Arbeitsmaschinen unterstützen sollen. Die dargestellten Ergebnisse und Ansätze wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) der Universität Karlsruhe (TH) entwickelt. Im weiteren Verlauf des Projekts sollen die Methoden an einem Prototypenfahrzeug verifiziert werden.

5 Literatur

- /D1/ • Deiters, H.: Standardisierung von Lastzyklen zur Beurteilung der Effizienz mobiler Arbeitsmaschinen. Diss. TU Braunschweig, 2009. Noch nicht veröffentlicht.
- /G1/ • Graaf, R.: Simulation hybrider Antriebskonzepte mit Kurzzeitspeicher für Kraftfahrzeuge. Diss. RWTH Aachen, 2002.
- /H1/ Internetplattform für Hybridfahrzeuge: „Antriebsstrang des Toyota Prius“. Internet: http://www.hybrid-autos.info/Toyota_Prius_2_2003.html. Stand 15.01.2009.
- /T1/ Thiebes, P.; Geimer, M.: Potenziale von Hybridantrieben für mobilen Arbeitsmaschinen. In: Mobile Maschinen 4/2008, Vereinigte Fachverlage, Mainz, 2008, S.14-17.
- /T2/ Thiebes, P.; Geimer, M.: Hybridantriebe für mobile Arbeitmaschinen. In: O+P 11-12/2007, Vereinigte Fachverlage, Mainz, 2007, S. 630-635.
- /T3/ van der Tuuk, T.: Dieselhybridantriebe als alternative Antriebslösungen. In: Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Informationstagung des VDMA und der Universität Karlsruhe (TH) 22. Feb. 2007, S. 109-121.
- /T4/ Tödter, J.: Hybride Antriebsstrukturen für verbrennungsmotorisch betriebene Gegengewichtsstapler. In: Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Informationstagung des VDMA und der Universität Karlsruhe (TH) 22. Feb. 2007, S. 125-137.