



Effizienz treibt uns an.

Entwicklung von Technologien für energiesparende
Antriebe mobiler Arbeitsmaschinen





IMPRESSUM

Technische Universität Dresden
01062 Dresden
Tel.: [++ 49] (0) 351 463-0
Fax: [++ 49] (0) 351 463-37168

Die Technische Universität Dresden ist eine Körperschaft öffentlichen Rechts. Sie wird durch den Rektor gesetzlich vertreten.

Die Adresse des Rektors ist
Technische Universität Dresden
Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. Hans Müller-Steinhagen
01062 Dresden
rektor@rek.tu-dresden.de

Die zuständige Aufsichtsbehörde ist das
**Sächsisches Staatsministerium
für Wissenschaft und Kunst**
Wigardstraße 17
01097 Dresden

*Die Umsatzsteueridentifikationsnummer der
Technischen Universität Dresden lautet*
USt.-IdNr. DE 18 83 69 99 1

Verantwortlich für Inhalt
**Fakultät Maschinenwesen, Institut für Fluidtechnik
Professur für Fluid-Mechatronische Systemtechnik**
Prof. Dr.-Ing. J. Weber
Helmholtzstr. 7a
01062 Dresden
mailbox@ifd.mw.tu-dresden.de

Projektträger
Projektträger Karlsruhe
Produktion und Fertigungstechnologien (PTKA-PFT)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Jürgen Schelisch
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
juergen.schelisch@kit.edu
www.produktionsforschung.de

Konzeption, Gestaltung und Realisierung
3D Infotainment Technologies UG (haftungsbeschränkt)
Geschäftsführer: Ingolf Seifert, Henry Wojcik
Bayreuther Str. 32
01187 Dresden
www.3dit.de

Bildnachweis
Die Urheberrechte der verwendeten Bilder liegen, so nicht anders gekennzeichnet, bei den jeweiligen Verfassern der Artikel und ihrer Partner.

Titelmotiv
3D:it, Dresden

Technologischen Vorsprung behaupten

Das Industrieland Deutschland nimmt unter den Industrienationen eine herausragende Stellung ein. Während in vielen bedeutenden Industrieländern der Wertschöpfungsanteil der Industrie seit Jahren zurückgeht, nimmt er in Deutschland seit 2002 wieder zu. Die weltweite Technologieführerschaft des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus sichert Wertschöpfung und Arbeitsplätze in Deutschland. Wichtigste Grundlage dieser Spitzenstellung sind Forschung und Entwicklung. Dies gilt auch für den Bereich Mobiler Maschinen.

Mobile Maschinen, auch Off Road Maschinen genannt, werden täglich in den Branchen Bau- und Baustoffmaschinen, Land- und Forstwirtschaft, Fördertechnik, Kommunal- und Spezialfahrzeugen eingesetzt und sind unverzichtbare Hilfsmittel, beispielsweise in der Landwirtschaft, auf Baustellen und in der Fördertechnik. Alleine die deutschen Baumaschinenhersteller haben einen Welthandelsanteil von 13 % bzw. die Landtechnikhersteller von 19 %. Des Weiteren ist Deutschland technologisch der Weltmarktführer auf den Gebieten der Antriebs- und der Fluidtechnik, als wichtigste Zulieferbranche für mobile Arbeitsmaschinen.

Bei der Weiterentwicklung der Mobilen Maschinen steht heute neben der Steigerung von Produktivität und Bedienerkomfort vor allem die Verbesserung der Energieeffizienz im Fokus. Ansatzpunkte sind hier das optimale Zusammenspiel aller Komponenten, die Optimierung der Arbeitsprozesse, die Steigerung der Effizienz im Betrieb, auch durch den Einsatz alternativer Antriebe. Die Entwicklung von energieeffizienten und emissionsarmen Antrieben für mobile Arbeitsmaschinen bedeutet eine immense Herausforderung, da gleichzeitig Aspekte wie Wirtschaftlichkeit, Leistungsfähigkeit, Lebensdauer und Sicherheit berücksichtigt werden müssen. Dieser anspruchsvolle Transformationsprozess ist notwendig, um den technologischen Vorsprung auf dem Weltmarkt, und damit die Produktion in Deutschland zu halten.

Die Steigerung der Energieeffizienz bedingt ein intelligentes Zusammenspiel in branchenübergreifenden Netzwerken. Im Verbundprojekt TEAM arbeiten Maschinenhersteller, Zulieferer und Hochschulinstitute zusammen und entwickeln die notwendigen Konzepte, Methoden und Lösungen.

Inhalt

6 Effiziente Antriebe entwickeln.

Das Projekt *Wie können die Hersteller mobiler Arbeitsmaschinen zur Zielstellung der Europäischen Union beitragen, den CO₂-Ausstoß bis 2020 um 20 Prozent zu senken?*

8 Wieviel Energie ist wenig Energie?

Energieeffizienzbewertung mobiler Arbeitsmaschinen *Wie lässt sich die Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen ganzheitlich beurteilen?*

10 Wieviel Energie kann Berge versetzen?

Berechnung der Interaktion Maschine / Prozess *Lässt sich die komplexe Wechselwirkung von Maschine und Erdstoff im Arbeitsprozess am Computer simulieren?*

12 Mehr Motor mit weniger Diesel?

Optimierter Verbrennungsmotor für Hybridantriebe *Wie müssen komplexe Systeme, insbesondere für die Abgasnachbehandlung, aufgebaut sein, um einer verschärften Abgasgesetzgebung gerecht zu werden und die Forderung nach geringerem Kraftstoffverbrauch zu erfüllen?*

14 Die Formel Eins für Land- und Baumaschinen?

Schnelldrehende elektrische Antriebe *Welche Möglichkeiten ergeben sich für den Einsatz elektrischer Antriebstechnik in mobilen Arbeitsmaschinen, wenn die Hersteller die Maximaldrehzahl von Elektromotoren erhöhen – und damit verbunden – die Leistungsdichte im Vergleich zum Normmotor um den Faktor 7 steigern?*

16 Schaffen wir den »Grünen Radlader«?

Technologieträger »Grüner Radlader« *Der »grüne Radlader« als Prüfstein für die Verknüpfung und praktische Erprobung innovativer, energieeffizienter Konzepte und Antriebslösungen.*

18 Projektpartner

Partnerunternehmen und Forschungseinrichtungen, die am TEAM-Projekt mitarbeiten



Effiziente Antriebe entwickeln.

Die Europäische Union fordert bis 2020 allgemein eine Senkung des CO₂-Ausstoßes um 20 Prozent. Die Hersteller mobiler Arbeitsmaschinen können einen wesentlichen Beitrag dazu leisten.

Analysen zeigen, dass mit neuen Technologien ein Energie- und Schadstoffeinsparpotenzial in Höhe von 20 bis 40% zu erwarten ist. Diese Werte setzen jedoch die Kombination neuer Antriebstechnologien voraus. Teilweise existieren diese Antriebstechnologien für die Anwendung in mobilen Arbeitsmaschinen bereits als Funktionsmuster. Eine konsequente maschinenspezifische Zusammenführung dieser Technologien, die praktische Erprobung sowie eine vergleichende Bewertung stehen bislang aus. Vielpersprechend sind auch Entwicklungen aus dem Automotive-Bereich, beispielsweise schnelldrehende elektrische Antriebe oder aber auf einen eingeschränkten Betriebsbereich optimierte Verbrennungsmotoren. Aussagen zur Anwendbarkeit in mobilen Arbeitsmaschinen können bislang nicht getroffen werden.

Die Zusammenführung unterschiedlicher Technologien zu einem Antriebssystem erfordert bereits in der Entwurfsphase eine ganzheitliche Maschinenbetrachtung inklusive der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Antrieben sowie der prozessseitig bedingten Lasten. Die typischerweise verteilten Expertisen – meist beziehen die Maschinenhersteller die Subsysteme wie Fahrtrieb, Dieselmotor, Arbeitshydraulik oder Werkzeuge von Zulieferern – stehen einer ganzheitlichen Betrachtung der Maschine entgegen. Moderne Simulationswerkzeuge stellen eine gute Basis für eine domänenübergreifende Betrachtung dar. Entwicklungsbedarf besteht bei der Abbildung des maschinellen Prozesses. Mit gegenwärtigen Simulationsmodellen kann zwar das Maschinenverhalten, jedoch nicht der maschinelle Prozess und dessen Rückwirkungen auf die Maschine abgebildet werden. Somit ist auch eine realitätsnahe Prognose des Energieverbrauchs der Maschine nicht möglich. Zugleich existieren derzeit keine wissenschaftlich fundierten Rahmenbedingungen für eine objektive Ermittlung und Bewertung der Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen.

Ziele

Ziel des Verbundvorhabens ist die Entwicklung, Erprobung und Bewertung von innovativen Antriebstechnologien zur Steigerung der Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen. Ausgehend davon leiten sich folgende Teilziele ab:

- Analyse und Weiterentwicklung bestehender Systemlösungen unter Berücksichtigung aktueller Entwicklungen aus Industrie und Forschung
- Entwicklung von anwendungsspezifisch optimierten Antriebskomponenten
- Erarbeitung von Methoden und Werkzeugen zur ganzheitlichen Maschinenbetrachtung
- Schaffung einer Grundlage zur Effizienzbeurteilung in mobilen Arbeitsmaschinen.
- Erprobung und Bewertung der Antriebstechnologien anhand von Demonstratoren

Vorgehensweise

Im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsverbunds aus Industrie und Hochschulen sollen systematisch Lösungen zur Steigerung der Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen erarbeitet und weiterentwickelt werden. In koordinierter Form sollen dabei Einzellösungen vorangetrieben und zu Systemlösungen zusammengeführt werden. Zur Erreichung der Arbeitsziele bildet das Konsortium themenspezifische Arbeitsgruppen, die in enger Abstimmung die einander ergänzenden Arbeitspakete bearbeiten:

- Anforderungsanalyse und Anforderungspflege: Festlegung der konkreten Entwicklungsschwerpunkte und der Rahmenbedingungen, Erstellung der Lastenhefte
- Entwicklung von Methoden und Instrumenten zur energetischen Beurteilung von Antriebssystemen: Schaffung einer wissen-

TEAM

schaftlich belastbaren Grundlage zur Effizienzbeurteilung mobiler Arbeitsmaschinen, Durchführung umfangreicher Feldmessungen an konkreten Anwendungsbeispielen

- Entwicklung parametrierbarer Referenzmodelle zur Bestimmung des Prozesseinflusses: Erarbeitung von Modellen zur Beschreibung der Interaktion Erdstoff / Maschine: Prognose des prozessseitigen Energiebedarfs bereits im Entwurfsprozess, prozessbezogene optimierte Auslegung
- Technologieentwicklung und -vernetzung: Untersuchung und Weiterentwicklung von neuen Antriebstechnologien und deren Komponenten: verdrängergesteuerte Systeme der Arbeitshydraulik, leistungsverzweigte Getriebe, Hybridantrieb, Punktmotor, schnelldrehende elektrische Antriebe
- Systemintegration und praktische Erprobung: Zusammenführung neuer Antriebstechnologien, Konzeption und Konstruktion der Demonstratormaschinen, Erarbeitung geeigneter Steuerungsstrategien für das Gesamtsystem, Integration der neuen Antriebstechnologien, experimentelle Untersuchungen unter Praxisbedingungen, Validierung der theoretischen Betrachtungen

Aus der Vielzahl der mobilen Arbeitsmaschinen werden im Rahmen des Vorhabens einige exemplarisch herausgegriffen. Die erarbeiteten Methoden und Technologien lassen sich prinzipiell aber auf andere Maschinen übertragen. Die für die Entwurfsphase zu erarbeitenden Simulationswerkzeuge erlauben die Visualisierung der Wechselwirkungen zwischen den Komponenten und Systemen unter maschinen- und anwendungsspezifischen Einsatzbedingungen. Dies bietet sowohl den Maschinenherstellern, den Systemlieferanten und auch den Forschungsinstituten die Möglichkeit einer zielgerichteten Entwicklung neuer über das Verbundvorhaben hinausgehender Systemlösungen. Die gesammelten Erkenntnisse finden bei den beteiligten Hochschulinstituten unmittelbaren Eingang in die Lehre und Weiterbildung.

Die Antriebe mobiler Arbeitsmaschinen müssen vergleichsweise hohe Anforderungen hinsichtlich Bedienbarkeit und Robustheit erfüllen. Unter diesem Gesichtspunkt stellen insbesondere die Ergebnisse der praktischen Erprobung eine wertvolle Basis für weiterführende Arbeiten dar.

Ergebnisse & Anwendungspotenzial

Das Projekt »TEAM – Entwicklung von Technologien für energieeffiziente Antriebe mobiler Arbeitsmaschinen« wird zu einer wesentlichen Verbesserung des Verständnisses der Wechselwirkungen innerhalb der Antriebssysteme mobiler Arbeitsmaschinen führen. Die Entwicklung neuer Technologien und die zugehörigen theoretischen und experimentellen Untersuchungen liefern auch über das Vorhaben hinaus neue Entwicklungsschwerpunkte und stellen so den Ausgangspunkt für weiterführende Aktivitäten dar.





Wieviel Energie ist wenig Energie?

Vor dem Hintergrund einer geforderten weiteren Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen seitens der Europäischen Union ist zukünftig ein Konzept zur ganzheitlichen Beurteilung der Energieeffizienz dieser Maschinen erforderlich.

Dieses Konzept zur ganzheitlichen Beurteilung der Energieeffizienz soll den speziellen Einsatzbedingungen der Maschinen im Feldeinsatz Rechnung tragen. In der Automobilindustrie gibt es hierzu heute beispielsweise standardisierte Fahrzyklen, die eine Vergleichsbasis für den Energieaufwand bei identischen Arbeitsaufgaben darstellen. Mobile Arbeitsmaschinen

Abb. 1 Prozess Kelly-Bohren

verfügen im Gegensatz zu PKW und NKW jedoch meist über mehrere parallel betriebene Verbraucher. Daher ist es bisher aufgrund der Vielfalt der Verfahren und der im Arbeitseinsatz durchgeführten Prozesse und Arbeitsaufgaben nur schwer möglich, eine objektive und umfassende Bewertung der Energieeffizienz einer mobilen Arbeitsmaschine durchzuführen. Die hierfür zu entwickelnde Bewertungsmethodik soll zukünftig eine zuverlässige Beurteilung der Energieeffizienz ermöglichen.

Ziele

Das Ziel des Themenschwerpunkts »Ermittlung der Energieeffizienz« ist die Schaffung einer Grundlage zur Effizienzbeurteilung in mobilen Arbeitsmaschinen. Basierend auf der allgemeinen Beschreibung von Leistungsflüssen und durch Auswertung von Messdaten, die in den Verfahrenszyklen ausgewählter Demonstratormaschinen ermittelt wurden, sollen Methoden und Instrumente zur umfassenden Bewertung der Energieeffizienz einer mobilen Arbeitsmaschine entwickelt werden. Die Möglichkeit der Beurteilung soll dabei unabhängig vom Typ der Maschine gegeben sein.

Vorgehensweise

In enger Zusammenarbeit von Herstellern mobiler Arbeitsmaschinen, Komponentenherstellern und Zulieferern sowie einem wissenschaftlichen Partner wurde ein systematisches Vorgehen zur Erreichung der folgenden Zwischenziele definiert:

- Identifikation von Referenzzyklen: Analyse der Verfahrenszyklen; Prozesse und Arbeitsaufgaben unterschiedlicher mobiler Arbeitsmaschinen (siehe Abb. 1); Ableitung maschinen-spezifischer Referenzzyklen; Entwicklung von Sensor-konzepten und Auswerteverfahren.



- Aufzeichnung leistungsrelevanter Daten im Referenzzyklus: Messtechnische Ausrüstung der Versuchsmaschinen, Feldversuche, Auswertung der Messdaten.
- Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit: Analyse des Bedienerinflusses auf die Energieeffizienz; Erstellung einer Bedienervorschrift, um den Einfluss des Fahrers auf die Maschinenführung zu minimieren.
- Parametervariation & Sensitivitätsanalyse: Analyse des Einflusses unterschiedlicher Maschinen- und Prozessparameter auf die Energieeffizienz.

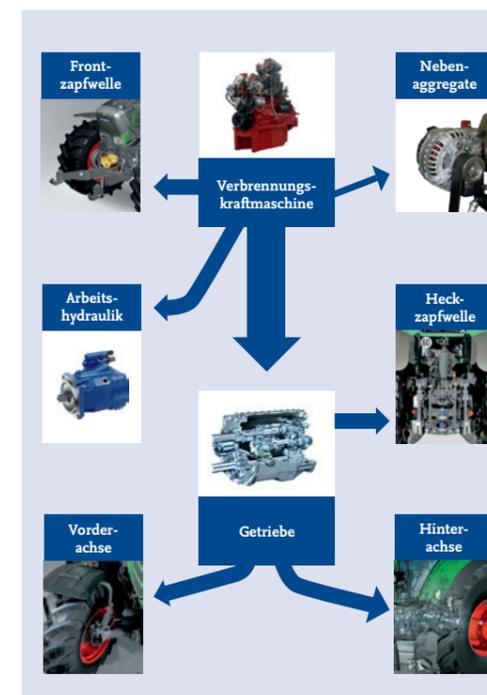
- Methodik zur Bewertung der Energieeffizienz: Beschreibung von Leistungsflüssen (siehe Abb. 2); Definition von Kennzahlen; Entwicklung einer umfassenden Bewertungsmethodik.

Ergebnisse & Anwendungspotenzial

Die im Forschungsverbund zu ermittelnden Ergebnisse sollen die Einflüsse der Umwelt-, Prozess- und Maschinenparameter auf die Energieeffizienz umfassend abbilden. Hierzu zählen neben den durch die Antriebs- und Steuerungsarchitektur bedingten Einflüssen auch Effekte, die sich durch das verwendete Verfahren, den Maschinenbediener und Umwelteinflüsse auf das gewünschte Arbeitsergebnis auswirken.

Abb. 2 Leistungsfluss im Traktor

Quellen: (Bosch Rexroth, AGCO Fendt, Deutz)



Die Projektergebnisse werden folglich sowohl für Maschinenhersteller als auch für System und Komponentenentwickler zur Bewertung von Gesamt- oder Teilsystemen von Bedeutung sein. Des Weiteren besteht für weitere Nutzer, wie beispielsweise Produktkäufer, die Möglichkeit ihre Kaufentscheidung in Zukunft auf einer objektiven und belastbaren Grundlage zu fällen. Die Untersuchungen hinsichtlich der Sensitivität der Energieeffizienz werden gegebenenfalls weitere Potenziale oder Entwicklungsbedarfe aufzeigen, welche in der Forschung weiter verfolgt werden. Zum Ergebnistransfer werden die Resultate auf Tagungen und Konferenzen veröffentlicht. Des Weiteren werden die daraus gewonnenen Erkenntnisse direkt in die Lehre und somit in die Ausbildung des ingenieurwissenschaftlichen Nachwuchses einfließen. ■

KONTAKT

Karlsruher Institut für Technologie, FAST
Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen
Dipl.-Ing. Philipp Scherer
Tel.: +49 (0) 721 608 48613
philipp.scherer@kit.edu
www.fast.kit.edu/mobima



Wieviel Energie kann Berge versetzen?

Der Arbeitsprozess ist Aufgabe und wesentliche Einflussgröße der mobilen Arbeitsmaschine und daher bei der Bewertung sowie dem Vergleich neuer Lösungen hinsichtlich der Energiebilanz der Maschine von hoher Bedeutung.

Die Belastungen und somit auch der Energieverbrauch von Arbeitsmaschinen hängen in viel stärkerem Maße als beim PKW von der Wechselwirkung zwischen Maschine und Arbeitsmedium, wie z.B. Erdstoffen, ab. Für die Ermittlung der Energiebilanz einer Maschine während der Ausführung eines bestimmten Arbeitsprozesses, müssen derzeit Prototypen realisiert und mit Messtechnik ausgestattet werden.

Wirtschaftlicher und ressourcenschonender kann dieses Problem mit Hilfe der Simulation als Werkzeug im Entwicklungsprozess gelöst werden. Damit sind Untersuchungen an virtuellen Prototypen in virtuellen Umgebungen durchführbar. Heute ermöglicht mathematisch-technische Software eine Beschreibung vom physikalischen Verhalten einer Maschine und von Erdstoffen in abstrakter Form. Die Aufgabe, die komplexen Wechselwirkungen von Maschine und Erdstoff im Prozess zu berechnen, um Aussagen über die wirkenden Arbeitswiderstände zu treffen, wird

jedoch von keiner verfügbaren kommerziellen Simulationsanwendung erfüllt. Somit können Simulationen noch nicht dafür eingesetzt werden, die aufgebrachte Energiebilanz einer Maschine während der Ausführung eines bestimmten Arbeitsprozesses vorzuberechnen.

Der Themenschwerpunkt »Prognosewerkzeug zur Bestimmung des Prozesseinflusses« befasst sich aus diesem Grund mit der Simulation der Wechselwirkung zwischen mobiler Arbeitsmaschine und Erdstoff während des Arbeitsprozesses.

Ziele

Ziel des Vorhabens ist die Schaffung eines Simulationssystems zur Vorausberechnung der zu erwartenden dynamischen Widerstände, welche bei der Ausführung einer Arbeitsaufgabe, entstehen. Das Simulationssystem soll in Verbindung mit geeigneten Maschinen- und Erdstoffmodellen als Prognosewerkzeug zur Bestimmung und

Abb. Simulation der Wechselwirkung zwischen mobiler Arbeitsmaschine und Erdstoff während des Arbeitsprozesses



Beeinflussung der Energiebilanz der Maschinen dienen und einen effizienten Produktentwicklungsprozess im Unternehmen gewährleisten.

Vorgehensweise

Die Wechselwirkungen, die sowohl aus der Maschinendynamik als auch aus dem sich stetig verändernden Erdstoffverhalten resultieren, sind nur durch die Kopplung von Simulationsverfahren zur Maschinen- und Erdstoffsimulation berechenbar.

Die Beschreibung von Modellen zur numerischen Berechnung des Erdstoffverhaltens basiert hier auf der Diskreten Elemente Methode. Die Beschreibung der Maschinenmodelle erfolgt als 3-dimensionales Mehrkörpersystem mit einer domänenübergreifenden Erweiterung um Modelle für die Hydraulik, Antriebs-, Regelungs- und Steuerungstechnik unter Nutzung des Sprachstandards Modelica. Die dynamischen Prozesswiderstände ergeben sich aus einer gekoppelten Simulation von Erdstoff- und Maschinenmodell unter Verwendung des »Functional Mock-up Interface« (FMI). Für die Umsetzung der Lösung werden die folgenden Aufgaben bearbeitet:

- Maschinen, Erdstoffe sowie typische Arbeitsprozesse (Einsatzmuster) sind zu klassifizieren, um ein geeignetes Referenzszenario als Basis weiterer Arbeiten abzuleiten.
- Es werden die für die Berechnung des Arbeitsprozessverhaltens erforderlichen Maschinen- und Erdstoffmodelle erstellt.
- Die in den Modellen enthaltenen Parameter werden bezogen auf das relevante Referenzszenario kalibriert. Dies erfolgt nach der Methode der inversen Parameterwertbestimmung.

- Es wird ein praxistaugliches Prognosewerkzeug umgesetzt. Dieses beinhaltet die Kopplung der Maschinen- und Erdstoffsimulation basierend auf dem Schnittstellenstandard unter Verwendung der erarbeiteten Modelle.

- Der Funktionsnachweis für die Systemimplementierung erfolgt anhand des gewählten Referenzszenarios. Es werden die Ergebnisse der gekoppelten Simulation mit denen von Messungen an der Referenzmaschine verglichen.

Ergebnisse & Anwendungspotenzial

Das Ergebnis der Arbeiten soll ein Simulationssystem sein, welches die Funktionalität der gekoppelten Maschinen- und Erdstoff-Simulation umfasst. Mit Hilfe des Simulationssystems werden Maschinenhersteller in die Lage versetzt, multiphysikalische Prozesssimulationen durchzuführen, diese für die Maschinenauslegung zu nutzen, prozessangepasste Maschinensysteme zu entwickeln und zu testen und somit die Energieeffizienz der Maschinen wesentlich zu erhöhen. Die Maschinen- und Komponentenhersteller erlangen somit Vorteile, wenn vor dem ersten realen Einsatz der Maschinen und Werkzeuge Aussagen zur Funktionalität im Arbeitsprozess und zum damit verbundenen Energieverbrauch getroffen werden können. ■

KONTAKT

TU Dresden, IVMA
 Professur für Baumaschinen- und Fördertechnik
 Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Kunze
 Tel.: +49 351 463 37698
 Fax: +49 351 463 37731
 guenter.kunze@tu-dresden.de
 tu-dresden.de/bft
 baumaschine.de



Mehr Motor mit weniger Diesel?

Der überwiegende Teil mobiler Arbeitsmaschinen wird durch Verbrennungsmotoren angetrieben. Typischerweise kommen Diesel-, aber auch Gasmotoren zum Einsatz. Begründet wird dies unter anderem mit der hohen Energiedichte und der einfachen Verfügbarkeit der zum größten Teil immer noch fossilen Kraftstoffe.

Auch aus ökonomischer Sicht hat der Kraftstoffverbrauch einen wesentlichen Einfluss auf die Betriebskosten der Arbeitsmaschine. Im Allgemeinen führt dies zu konstruktiv aufwändigeren Motoren und erhöht somit die notwendigen Investitionskosten. Zusätzlich muss die Abgasgesetzgebung berücksichtigt werden, da die zukünftige Verschärfung der Schadstoffgrenzwerte zu immer komplexeren und teureren Systemen für die Abgasnachbehandlung führt. Durch die Kombination mit einem Hybrid-System ergeben sich für den Verbrennungsmotor eine Vielzahl neuer Möglichkeiten für eine gezielte Optimierung.

Ein möglicher Lösungsansatz ist die Auslegung des Verbrennungsmotors als Punktmotor auf einen eingeschränkten Betriebsbereich (s. Abb. 1).

Durch die Konzentration auf den wirkungsgradoptimalen Betriebsbereich bietet dies nicht nur Potenzial den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren, sondern auch die Schadstoffemissionen weiter zu verbessern. Zusätzlich bestehen vielfältige Möglichkeiten, durch Vereinfachungen den Bauaufwand und damit die Kosten sowohl für den Motor als auch bei der Abgasnachbehandlung zu reduzieren und alle Anforderungen zu erfüllen.

Ziele

Ziel im Themenschwerpunkt »Punktmotor« ist es, das gesamte Verbesserungspotenzial eines solchen Antriebskonzepts einschließlich der Abgasnachbehandlung zu bestimmen.

Anschließend soll dies unter Berücksichtigung des Fahrzeugkonzeptes sowohl hinsichtlich der Schadstoff- und CO₂-Minderung als auch der Kosten bewertet werden. Daraus ergibt sich schließlich das ökologisch und ökonomisch sinnvollste Antriebskonzept für zukünftige mobile Arbeitsmaschinen.

Vorgehensweise

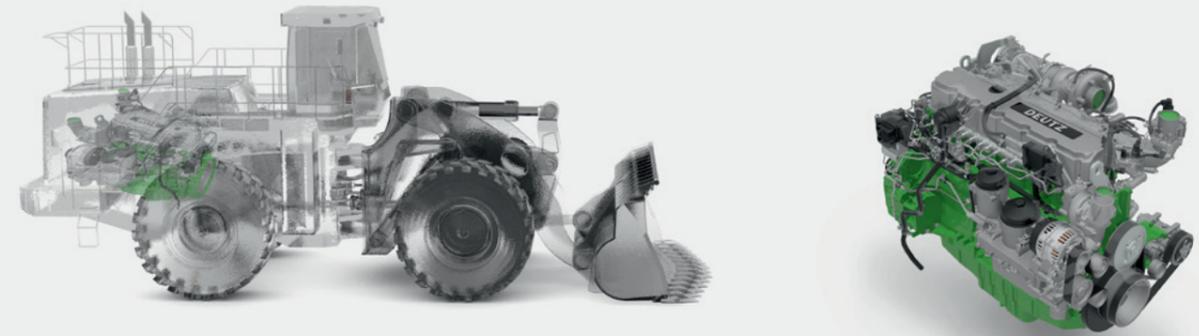
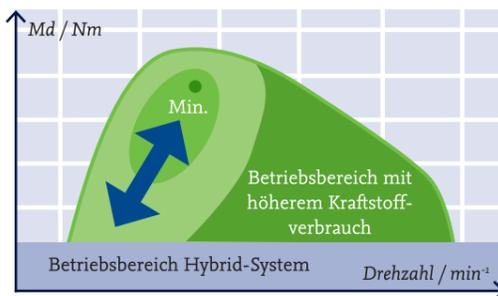
Um die Ziele zu erreichen, liegt der Schwerpunkt auf folgenden Arbeitsschritten:

- Spezifikation des Versuchsträgers
- Konzepterstellung für den Dieselmotor
- Optimierung des Verbrennungsmotors für einen eingeschränkten Betriebsbereich durch Simulationsverfahren
- Validierungen des optimierten Motors mit der Abgasnachbehandlung durch Simulation
- Versuchsaufbau und experimentelle Prüfstands-Untersuchung des Dieselmotors
- Vorbereitung des Technologieträgers zum Betrieb im Demonstrator »Grüner Radlader«
- Abschließend werden die Ergebnisse bewertet und das Potenzial eines Punktmotor Konzepts aufgezeigt

Ergebnisse & Anwendungspotenzial

Die Entwicklung von Industriemotoren wird vom Zielkonflikt niedriger Kraftstoffverbrauch bei Erfüllung der Schadstoffgrenzwerte und niedrige Kosten bei großer Zahl von Varianten getrieben. Erste Erfahrungen mit Hybrid-Systemen versprechen deutliche Vorteile beim

Abb. 1 Auslegung als Punktmotor



Kraftstoffverbrauch und damit auch bei den CO₂-Emissionen, allerdings wird der gesamte Antrieb extrem verteuert. Die Grundidee beim »Punktmotor« ist, die Dynamik soweit möglich dem Hybridsystem zu überlassen und den Verbrennungsmotor mehr stationär in einem begrenzten Kennfeldbereich zu betreiben. Dadurch sollte es möglich sein, zum einen den Kraftstoffverbrauch des Antriebs weiter zu reduzieren und gleichzeitig den Aufwand beim Verbrennungsmotor und der Abgasnachbehandlung zu reduzieren, um dadurch den gesamten Antrieb nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch für den Markt interessant zu machen.

Abb. 2 Optimierungspotenziale

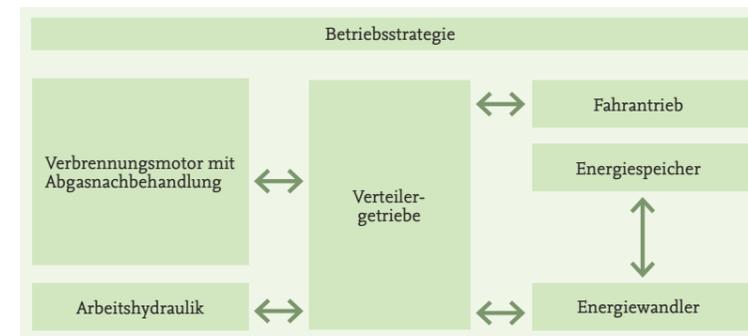
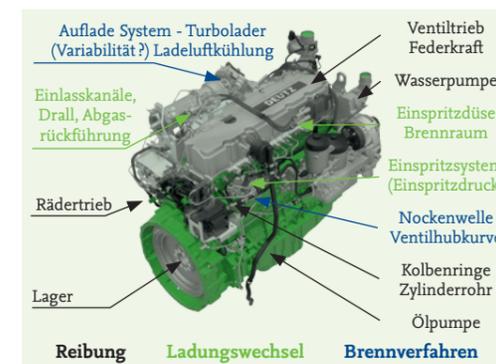


Abb. 3 Antriebskonzept in Verbindung mit hybriden Antriebslösungen aufgezeigt.

Die Ergebnisse werden sowohl den Herstellern von Industriemotoren als auch den Anbietern von mobilen Arbeitsmaschinen die Möglichkeit geben, das Potenzial eines solchen Antriebs zu beurteilen. Mit Hilfe des speziell auf die Anforderungen des Demonstrators »Grüner Radlader« abgestimmten Dieselmotors können der Fachwelt die Potenziale des Punktbetriebs demonstriert werden.

Prinzipiell sind die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt auf andere mobile Maschinen übertragbar. Ein Transfer auf weitere Anwendungsfelder sowohl im Bereich der mobilen Anwendung, als auch für stationäre Anwendungen ist zu erwarten. Die beteiligten Projektpartner erlangen durch das Forschungsvorhaben Informationen und Wissen über die Anforderungen an die spezifischen Bauteile und Baugruppen, die zur Weiterentwicklung bestehender und Entwicklung neuer Produkte genutzt werden können. Durch die Mitarbeit in einem interdisziplinären Forschungsteam und die Beteiligung der Universität wird ein erheblicher Wissenstransfer sichergestellt. ■

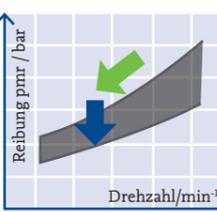


Abb. 4 Reduktion der Reibungsverluste durch Drehzahlab senkung »Down-speeding« und Optimierung

KONTAKT

RWTH Aachen, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen
 Dr.-Ing. Martin Nijjs
 Tel.: +49 (0)241 8095-370
 nijjs@vka.rwth-aachen.de
 www.vka.rwth-aachen.de



Die Formel Eins für Land- und Baumaschinen?

Gegenüber der hydraulischen Antriebstechnik weisen elektrische Antriebe in vielen Bereichen Vorteile auf. Insbesondere hinsichtlich des (temporär) emissionsfreien Betriebs, der Leerlaufverluste (Power On Demand), des Wirkungsgrads (insbesondere im Teillastbereich), der Regelstabilität und -güte, der Umweltverträglichkeit (kein Hydraulikfluid im Fahrtrieb) und der Geräuschkentwicklung.

Ackerschlepper
AGCO Fendt



Fahrtrieb
30 kW (Vorderrad)
60 kW (Hinterrad)

Straßenfräse
Wirtgen



Bandantrieb
22 kW

Abb. 1 Zielanwendungen

Bisher stellt die elektrische Antriebstechnik bei mobilen Arbeitsmaschinen, begründet durch die geringere Leistungsdichte und die höheren Kosten nur eine Nischenanwendung (beispielsweise Maschinen im Tagebau) dar. Aktuelle Motorentwicklungen für Automotive-Anwendungen könnten die bisherige Situation grundlegend verändern. Hier konnte durch die Anhebung der Drehzahl der Elektromotoren die Leistungsdichte im Vergleich zu einem Normmotor um den Faktor Sieben angehoben werden. Selbst gegenüber besonders kompakten Motoren mit Wasserkühlung ergibt sich immer noch eine Steigerung der Leistungsdichte um das Vierfache. Um das Potenzial dieser E-Motoren nutzbar zu machen, sind einerseits an die Anforderungen mobiler Arbeitsmaschinen angepasste Elektromotoren erforderlich und des Weiteren Getriebe, die eine Transformation der Motordrehzahl auf das geforderte Niveau realisieren. Aufgrund der hohen Umfangsgeschwindigkeiten der Getriebe werden hier besondere technische Lösungsansätze hinsichtlich Verzahnung, Lagerung, Dichtungstechnik und Schmierung notwendig, um den Anforderungen bezüglich der Lebensdauer, der Akustik, des Wirkungsgrades und des Wärme-managements gerecht zu werden.

Ziele

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Möglichkeiten und Potenziale beim Einsatz elektrischer High Speed Antriebe in mobilen Arbeitsmaschinen aufzuzeigen und durch Prüfstands- und

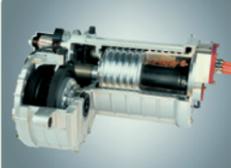
Feldversuche nachzuweisen. Die hohe Leistungsdichte neuartiger, schnelldrehender E-Motoren aus dem Automotive-Bereich soll mit Hilfe geeigneter Getriebekonzepte in einem Radnabenantrieb für einen Ackerschlepper und im Antrieb des Förderbandes einer Straßenfräse genutzt werden.

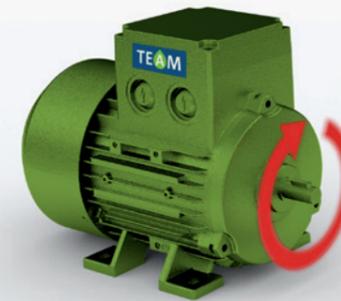
Die Antriebskonzepte sollen abschließend mit den heute zum Einsatz kommenden Antriebslösungen im Hinblick auf Kosten und technische Vorteilhaftigkeit vergleichend bewertet werden. Die anhand des Schlepperfahrtriebs und des Bandantriebs gewonnenen Ergebnisse können auf eine Vielzahl von Anwendungsfällen im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen übertragen werden, so zum Beispiel als Fahrtrieb von Baggern, Telehandlern oder Radladern, in elektrisch leistungsverzweigten Getrieben, beispielsweise in Telehandlern oder auch dem elektrischen Antrieb der Arbeitshydraulik.

Vorgehensweise

Um den Einsatz schnelldrehender Elektromotoren im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen zu ermöglichen, müssen die richtigen

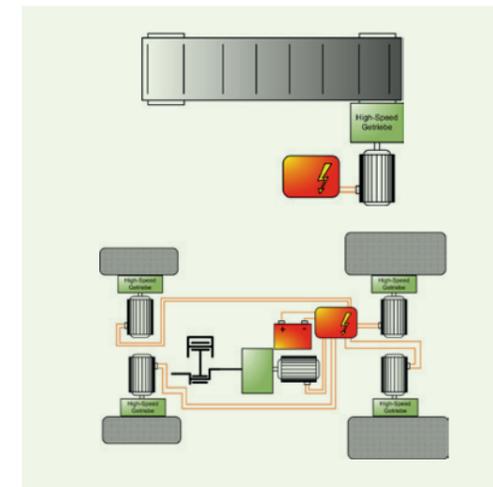
Abb. 2 Vergleich Normmotor / High Speed Motor
(Quelle: GETRAG)

| 22 kW Normmotor | 22 kW HighSpeed Motor GETRAG |
|--|---|
|  |  |
| $n_{max} = 2.940 \text{ min}^{-1}$ | $n_{max} = 22.500 \text{ min}^{-1}$ |
| $M_{max} = 71 \text{ Nm}$ | $M_{max} = 10 \text{ Nm}$ |
| $m = 180 \text{ kg}$ | $m = 48 \text{ kg}$ |



Getriebestrukturen und die grundsätzlichen Lösungsansätze (für Verzahnung, Lagerung, Dichtungen, Schmierung, etc.) für schnelldrehende Getriebe entsprechend den Anforderungen der jeweiligen Anwendung kombiniert werden. Aber auch die Elektromotoren müssen für den Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen angepasst werden.

Abb. 3 Antriebsstrangkonzeppte



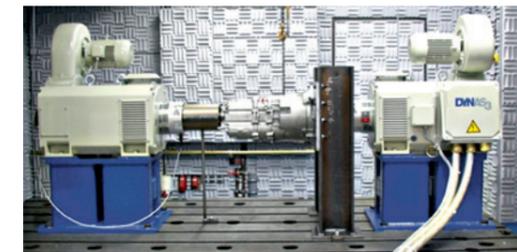
Der Themenschwerpunkt »High Speed Antriebe« gliedert sich in die folgenden Arbeitspakete, welche teilweise parallel bearbeitet werden:

- Voruntersuchung
- Antriebskomponentenentwicklung: Konzeption und Berechnung
- Erprobung der Maschinenelemente
- Antriebstechnologie: Konzeption und Berechnung
- Aufbau der Prototypengetriebe und -antriebe
- Erprobung der Getriebe und Antriebe: Prüfstands- und Feldversuche

Ergebnisse & Anwendungspotenzial

Im Rahmen dieses Teilprojekts werden die Möglichkeiten und Potenziale von elektrischen High Speed Antrieben in mobilen Arbeitsmaschinen aufgezeigt. Die Betrachtung von zwei unterschiedlichen Anwendungsfällen im Rahmen des Teilprojekts gewährleistet eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Anwendungen. Es entstehen zwei Demonstratoren, ein Bandantrieb für eine Straßenfräse, welcher in Feldversuchen erprobt wird und ein Radnabenantrieb für einen Ackerschlepper, der als Modul auf dem Prüfstand erprobt wird.

Abb. 4 Erprobung der Demonstratoren auf dem Prüfstand und im Feld



KONTAKT

RWTH Aachen, Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung
Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs
Tel.: +49 (0)241 80-95635
jacobs@ime.rwth-aachen.de
www.ime.rwth-aachen.de



Schaffen wir den »Grünen Radlader«?

Mobile Arbeitsmaschinen sind unverzichtbare Hilfsmittel in der Landwirtschaft, auf Baustellen und in der Fördertechnik. Sie verursachen einen erheblichen Anteil des Gesamtkraftstoffverbrauchs sowie der durch Fahrzeuge bedingten Abgasemissionen. Die Steigerung der Energieeffizienz ist aufgrund der verschärften Emissionsgesetzgebung in Europa und Nordamerika und der steigenden Betriebskosten eines der Leitthemen für die Weiter- und Neuentwicklung von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen.

Die Rückgewinnung von Energie bietet für mobile Arbeitsmaschinen ein hohes Potenzial zur Effizienzsteigerung, erfordert jedoch eine Anpassung des gesamten Antriebssystems. Die Antriebe der einzelnen Verbraucher müssen in der Lage sein, die frei werdende Bremsenergie dem Antriebssystem energieeffizient zuzuführen (Regeneration) und gegebenenfalls zwischenspeichern (Rekuperation). Für die einzelnen Teilsysteme der Maschine wie Verbrennungsmotor, Fahrtrieb, Antrieb der Arbeitsausrüstung und Energiespeicher stehen dem Anwender eine Vielzahl möglicher Antriebslösungen zur Verfügung. Neben der kontinuierlichen Verbesserung konventioneller Systeme wurden in den letzten Jahren neue, energieeffiziente Antriebskonzepte entwickelt. Diese konnten ihre Leistungsfähigkeit bereits in praxisnahen Applikationen unter Beweis stellen.

Eine wesentliche Steigerung der Energieeffizienz der Gesamtmaschine kann jedoch nur durch eine geschickte steuerungstechnische Verknüpfung der Teilsysteme zu applikationsspezifischen Gesamtantriebssystemen erreicht werden. Das Potenzial solcher Lösungen ist bislang nur unzureichend bekannt. Insbesondere die komplexen

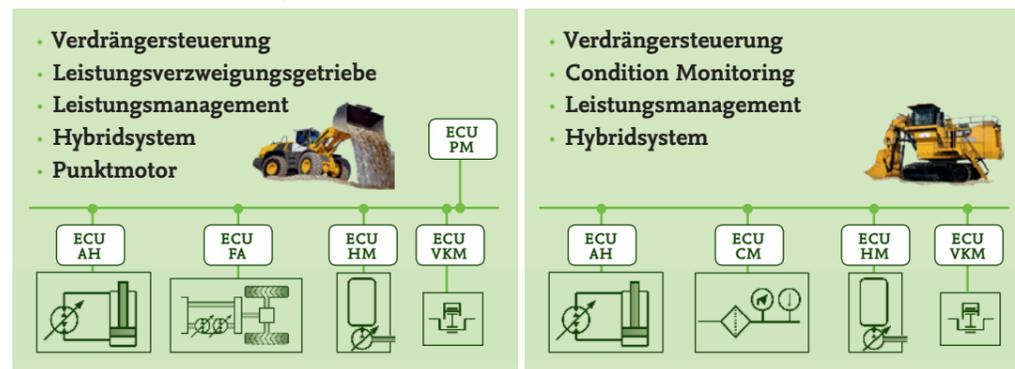
Wechselwirkungen zwischen den Subsystemen des Gesamtantriebs setzen ein hohes Maß an branchenübergreifendem Know-how voraus und erschweren so eine belastbare Bewertung und die gezielte Weiterentwicklung neuer Antriebslösungen.

Ziele

Das Ziel des Teilvorhabens »Grüner Radlader« ist die Entwicklung, Bewertung und Erprobung neuer energiesparender Antriebstechnologien für mobile Arbeitsmaschinen. Funktionalität und Bedienerfreundlichkeit der Maschinen sollen dabei mindestens ein mit Serienlösungen vergleichbares Niveau erreichen.

Unter Berücksichtigung aktueller Entwicklungen der Industrie werden am Beispiel eines Radladers und eines Tagebaubaggers neue Antriebslösungen für die Hauptverbraucher mobiler Arbeitsmaschinen konzipiert und bewertet. Für den Radlader werden die gefundenen Lösungen in einer Demonstratormaschine zusammengeführt und erprobt. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Analyse der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Subsystemen des Antriebssystems.

Abb. 1 Schwerpunkte der Antriebssystementwicklung

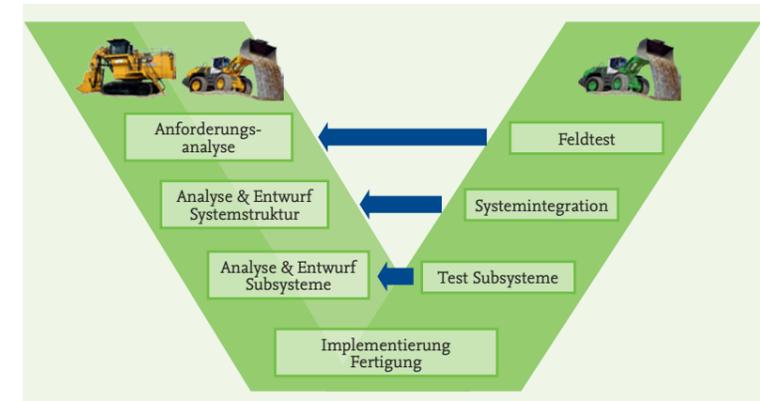


Vorgehensweise

Zur Erreichung der gesetzten Ziele liegt der Schwerpunkt auf folgenden Arbeiten:

- Anforderungsanalyse und Spezifikation des Lastenhefts für die Antriebssysteme
- Konzeption der Antriebs- und Steuerungsstruktur; Ermittlung der Lösungsmatrix und Auswahl von Vorzugsvarianten
- Entwicklung und Test von Steuerungsalgorithmen mittels geeigneter Simulationsmodelle
- Aufbau eines Hardware-in-the-Loop Prüfstandes für Algorithmen- und Softwaretests
- Erstellung von echtzeitfähigen Simulationsmodellen, Überführung der Steuerungsalgorithmen in Softwarecode
- Entwicklung, Fertigung und Erprobung der Subsystemlösungen »Fahrtrieb«, »Arbeitshydraulik« und »Hybridmodul«
- Experimentelle Untersuchungen des Antriebssystems: Versuchsaufbau auf Verspannungsprüfstand, Integration der Antriebslösungen in einen Demonstrator
- Experimenteller Nachweis der Funktions- und Leistungsfähigkeit der Antriebslösungen
- energetische Bewertung entsprechend der Rahmenbedingungen aus dem Themenschwerpunkt »Ermittlung der Energieeffizienz«

Der im Rahmen des Themenschwerpunkts »Punktmotor« entwickelte Dieselmotor wird als Antriebsaggregat des Demonstratorfahrzeuges eingesetzt. Durch intensive Vernetzung der beiden Teilprojekte wird die Definition der Anforderungen und Schnittstellen sichergestellt.



Ergebnisse & Anwendungspotenzial

Das Projekt bietet die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit neuer Antriebstechnologien für mobile Arbeitsmaschinen zu ermitteln und zu bewerten. Der im Rahmen des Vorhabens entstehende Demonstrator ermöglicht die Validierung der Ergebnisse sowie eine praktische Erprobung neuartiger Antriebslösungen.

Die erarbeiteten Erkenntnisse sind nicht maschinenspezifisch, sondern auf weitere Anwendungen übertragbar. Die zu entwickelnden Steuerungsalgorithmen werden häufig als Kern der Entwicklung angesehen und sind daher von besonderem Interesse. Basierend auf den experimentellen Untersuchungen am Versuchsstand und der praktischen Erprobung mithilfe des Demonstrators lassen sich zukünftige Entwicklungsziele für die beteiligten Projektpartner ableiten.

Im Ergebnis des Projektes werden neue methodische Ansätze entstehen, welche eine schnellere und präzisere Potenzialabschätzung neuer Systemlösungen und deren Auslegung ermöglichen. Diese Erkenntnisse können unmittelbar zur Entwicklung innovativer Antriebslösungen herangezogen werden. ■

Abb. 2 Systementwicklung anhand des V-Modells

KONTAKT

TU Dresden, Institut für Fluidtechnik
 Prof. Dr.-Ing. Jürgen Weber
 mailbox@ifd.mw.tu-dresden.de
 www.tu-dresden.de/mwifd



Projektpartner



AGCO GmbH (Fendt)
Bereitstellung und messtechnische Ausrüstung von Versuchsmaschinen (175 kW-Traktor), Durchführung und Auswertung von Messfahrten, Spezifikation schnelldrehende elektrische Radantriebe www.fendt.com



Argo-Hytos GmbH
Condition-Monitoring-Strategien für Miningbagger www.argo-hytos.com



BAUER Maschinen GmbH
Bereitstellung und messtechnische Ausrüstung von Versuchsmaschinen (Großdrehbohrgerät), Durchführung und Auswertung von Messungen, Konzeption alternativer Antriebslösungen www.bauer.de



Liebherr-Hydraulikbagger GmbH
Konzeption und Fertigung eines Demonstrators (Radlader), praktische Erprobung des Demonstrators, Entwicklung schnelldrehender elektrischer Radantrieb (60 kW) www.liebherr.com



LRT GmbH
Erstellung von Komponentenmodellen, experimentelle Untersuchungen zur Kalibrierung der Prozessmodelle www.lrtgmbh.de



MSR-Solutions
Aufbereitung des Prognosewerkzeugs zur Bestimmung der Prozessenergie www.msr-office.de



Bosch Rexroth AG
Entwicklung und Fertigung von leistungsverzweigten Getrieben, Ermittlung von Referenzzyklen www.boschrexroth.de



CAT Global Mining
Konzeption alternativer Antriebslösungen für Tagebaubagger mining.cat.com



Claas Industrietechnik GmbH
Bereitstellung und messtechnische Ausrüstung von Versuchsmaschinen (120 kW-Traktor), Durchführung und Auswertung von Messfahrten www.claas-cit.com



RWTH Aachen, IME
Entwicklung von Getrieben für schnell-drehende Antriebe; »Systemuntersuchung Technologieträger Grüner Radlader auf dem Prüfstand, Leistungsmanagement Fahrtrieb«
RWTH Aachen, VKA
Optimierung Dieselmotor für Hybridantriebe www.rwth-aachen.de



Sauer-Danfoss GmbH & Co. OHG
Konzeption und Fertigung einer verdrängergesteuerten Arbeitshydraulik www.sauer-danfoss.com



Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG
Entwicklung und Fertigung von Lagern und Dichtungen für schnell-drehende elektrische Antriebe www.schaeffler.de



DEUTZ AG
Entwicklung und Fertigung eines Punktmotors, Messtechnische Erfassung der Belastung von Dieselmotoren www.deutz.com



Heinzmann GmbH & Co. KG
Entwicklung und Fertigung von schnelldrehenden Elektromotoren (30 kW) www.heinzmann.com/de



Hydac International GmbH
Entwicklung und Fertigung eines Hybridmoduls www.hydac.com



TAKRAF GmbH
Erarbeitung von Methoden zur Stoffmodellierung, experimentelle Untersuchungen zur Validierung der Modelle www.takraf.com



TU Dresden, IVMA
Entwicklung von Prozessmodellen zur Beschreibung der Interaktion Maschine / Erdstoff
TU Dresden, IFD
Erarbeitung von Steuerungsstrategien für den Technologieträger Grüner Radlader www.tu-dresden.de



Universität Karlsruhe
Erarbeitung von Rahmenbedingungen und Methoden zur Ermittlung der Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen www.kit.edu



Hydrive Engineering GmbH
Softwareentwicklung & -test für den Technologieträger »Grüner Radlader« www.hydrive-engineering.de



IBAF GmbH
Entwicklung von Erdstoffmodellen (Kontaktmodelle), Kopplung von Erdstoffmodell und MKS www.iamt.de



Lehnhoff Hartstahl GmbH & Co. KG
Erstellung von Komponentenmodellen, experimentelle Untersuchungen zur Kalibrierung der Prozessmodelle www.lehnhoff.de



VDMA
Ergebnistransfer, Öffentlichkeitsarbeit www.vdma.org



VFI
Ergebnistransfer, Öffentlichkeitsarbeit www.vdma.org



Wirtgen GmbH
Konzeption und Fertigung eines Demonstrators (Bandantrieb Straßenfräse), praktische Erprobung schnell-drehender elektrischer Antriebe www.wirtgen.de



www.team-mobilemaschinen.de

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept »Forschung für die Produktion von morgen« gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.