

Mike Geißler, Wolfgang Aumer, Mirko Lindner und Thomas Herlitzius

Elektrifizierte Einzelradantriebe in mobilen Landmaschinen

An der TU Dresden wird seit mehreren Jahren an der Elektrifizierung des Antriebsstranges für mobile Landmaschinen, insbesondere Traktoren, geforscht. Zahlreiche Forschungsprojekte haben das Potenzial elektrischer Antriebe gegenüber bestehenden Konzepten nachgewiesen. Im Bereich der Fahrtriebe erzeugt der elektrische Einzelradantrieb einen großen Zuwachs an Funktionalität bei einem vertretbaren Mehraufwand. Der nachfolgende Beitrag zeigt die Besonderheiten des elektrifizierten Einzelradantriebes in mobilen Landmaschinen und gibt einen Überblick über die gegenwärtigen Entwicklungsarbeiten.

Schlüsselwörter

Elektrische Antriebstechnik, Einzelradantrieb

Keywords

Electric propulsion technology, single wheel drive

Abstract

Geißler, Mike; Aumer, Wolfgang; Lindner, Mirko and Herlitzius, Thomas

Electric single wheel drive for mobile agricultural machinery

Landtechnik 65 (2010), no. 5, pp. 368-371, 3 figures, 1 table, 7 references

At the TU Dresden, research has been done on the driveline electrification of mobile agricultural machines, especially for tractors, for many years. Numerous projects have proven the potential of electric drives compared to conventional concepts. Electric motors offer a growth in functionality at justifiable expenses for traction drives. The following article discusses electric single wheel drives for mobile agricultural machinery and gives an overview of the current research work.

gehören die stufenlosen leistungsverzweigten Getriebe, die Anhebung der Endgeschwindigkeit, die Erhöhung von Zug-, Zapfwellen- und Hydraulikleistung sowie Multiachskonzepte und das Reifendesign.

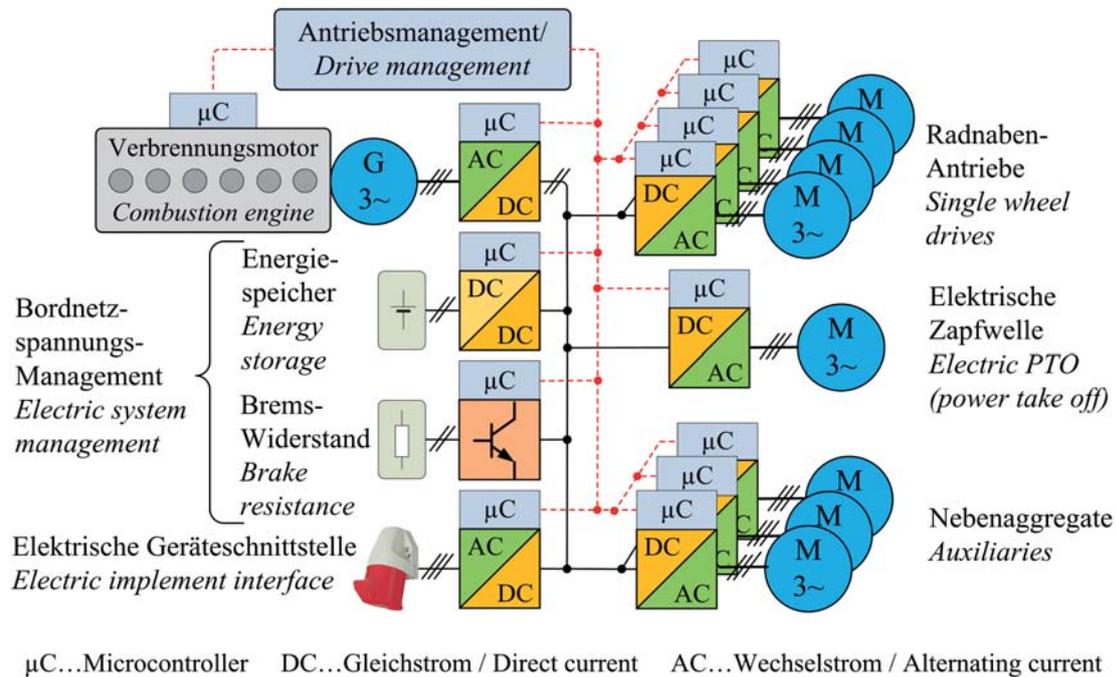
Wichtige Entwicklungsschwerpunkte neuer Antriebslösungen sind Energieeffizienzsteigerung, Kostenreduktion und Funktionalitätserweiterungen [3]. Ein wesentliches Merkmal ist die Regelbarkeit bzw. sind Regelmöglichkeiten dieser neuen Systeme, die derzeit vorwiegend als hydraulische Antriebe ausgeführt sind. Elektrische Antriebe eignen sich als Alternative, weil ihre Steuer- und Regelbarkeit die Hydraulik übertreffen, ihr Wirkungsgrad gut ist und sie eine effizientere Bauraumausnutzung ermöglichen [4]. Auch vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen in der Automobil- und Nutzfahrzeugbranche ist mit einer Akzeptanz elektrischer Antriebe bei Landmaschinen zu rechnen. Studien zeigen, dass eine Massenproduktion der elektromechanischen und leistungselektronischen Komponenten eine große Kostendegression ermöglichen würden [5].

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen und Anforderungen wurde an der TU Dresden in mehrjährigen Arbeiten ein serieller diesel-elektrischer Antriebsstrang in einem Forschungsfahrzeug entwickelt (**Abbildung 1**).

Dabei wird die Antriebsleistung von einem Dieselmotor mit gekoppeltem Generator, auch Motor-Generator-Unit (MGU) genannt, bereitgestellt. Der Generator wandelt die mechanische in elektrische Energie um und stellt diese einem Hochvolt-Bordnetz mit 400-750 V zur Verfügung. Eine mechanische Verbindung zu den Antrieben entfällt. Der Energieerzeuger ist damit von den Verbrauchern entkoppelt. Die Drehzahlen der Endantriebe haben somit keinen Einfluss auf die Gestaltung des Drehzahlbandes des Dieselmotors. Die Anzahl der Betriebspunkte reduziert sich und die Betriebskennlinie ist bekannt. Eine Optimierung des Verbrauchskennfeldes und Emissionskennfeldes ist in Abhängigkeit der abzugebenden elektrischen Leistung möglich. Die MGU ist dabei stets als System zu verstehen.

Der zunehmende Bedarf an Biomasse und die Versorgung mit Nahrungsmitteln erfordern in Zukunft eine Steigerung der Produktivität und Effizienz von Landmaschinen [1]. Bei Traktoren erfolgten Produktivitätssteigerungen überwiegend durch Innovationen im Bereich des Antriebsstranges [2]. Dazu

Abb. 1



Dezentrales Antriebskonzept für einen diesel-elektrischen Traktor
 Fig. 1: Distributed drive concept for a diesel-electric tractor

Ein zentrales Antriebsmanagement steuert alle Verbraucher bedarfsgerecht, die dementsprechend Antriebsenergie aus dem Hochvolt-Bordnetz beziehen. Eine elektrische Geräteschnittstelle stellt Anbaugeräten elektrische Energie zur Verfügung. Wie bei der Zapfwelle ist die Bereitstellung der gesamten Dieselmotorleistung vorzusehen. Wahlweise kann für konventionelle Anbaugeräte eine elektromechanische Zapfwelle integriert werden, die variable Drehzahlen dieselmotorunabhängig realisiert. Ein Bordspannungsmanagement dient zur Begrenzung der Zwischenkreisspannung bei voll geladenem Speicher und zur Pufferung von Energiespitzen bei wechselnden Lasten. Die verminderte Dynamikanforderung an den Dieselmotor (Phlegmatisierung) wirkt sich positiv auf Kraftstoffverbrauch und Emissionsverhalten aus, wobei sinnvolle, an die Anwendung angepasste Speicherkapazitäten zu definieren sind.

Einzelradantrieb mit aussichtsreichem Potenzial

Der Fahrtrieb des 90 kW Forschungstraktors wird gegenwärtig als Einzelradantrieb mit vier gleich großen Rädern realisiert. Der Umbau hat eine Reduktion der Teile im Antriebsstrang und damit der bewegten Teile zur Folge. Ebenso reduziert sich die Bauteilvielfalt bei einer Vergrößerung von Gleichteilen. Ein Masse- und Kostenvergleich zeigt keine nennenswerten Nachteile des elektrischen Traktors (**Tabelle 1**).

Ein Vorteil des Einzelradantriebes ist seine größere Funktionalität. Die exakte Steuerung der Raddrehmomente ermöglicht eine genaue Rad-Boden-Schlupfregelung. Auf Basis bekannter Raddrehzahlen, Raddrehmomente und der Fahrzeuggeschwin-

digkeit kann der optimale Schlupf pro Rad geregelt werden. Ebenso ermöglicht ein gezieltes Abbremsen oder Beschleunigen der Antriebsräder ein Eingreifen in die Fahrzeugdynamik (Active Yaw oder Torque Vectoring) zum gezielten Unterstützen oder Unterdrücken von Kurvenfahrten. Die Wirkung resultiert aus den Längskraftvektoren der Räder und nicht aus einer Änderung der Radstellung.

Die genaue Steuerung der Raddrehmomente erlaubt ebenso die Vorgabe definierter Drehmomentrampen und Drehmomentbegrenzungen, was aufgrund geringerer Stoßbelastungen und bekanntem Schwingungsverhalten zu einer optimierten Auslegung der Antriebsmechanik führt.

Eine Steigerung der Energieeffizienz ergibt sich aus den optimal ausgelegten Antriebskomponenten. Die Umwandlung der mechanischen Antriebsleistung erfolgt direkt am Dieselmotor und im Rad. Lange Übertragungswege mit verlustbehafteten Wandlungsstufen entfallen.

Vor allem weist der Einzelradantrieb Vorteile bei der konstruktiven Integration auf. Der konventionelle, zentrale Antriebsstrang, der derzeit im gesamten Fahrzeug verteilt ist, verlagert sich in den freien Bauraum der Felge. Die geschaffenen Freiräume können somit anderweitig aufgeteilt oder genutzt werden.

Größere Lenkwinkel ergeben sich durch den Wegfall der mechanischen Übertragungswellen und Kreuzgelenke in den Achsen und damit einer optimierten Lenkgeometrie. Die Reduzierung der Übertragungselemente und die einfachere Radbefestigung unterstützen ebenfalls die Entwicklung zugkraftoptimierter Fahrwerkskonzepte in Multiachsfahrzeugen.

Tab. 1

Zusammengefasster Masse- und Kostenvergleich eines 90 kW Traktors mit konventionellem Antriebsstrang und diesel-elektrischem Einzelradantrieb

Table 1: Summarised comparison of weight and cost for a 90 kW tractor with conventional driveline and diesel-electric single wheel drive

| Basistraktor Base tractor | | | | | |
|---|----------|----------|--|-------------------------|---|
| Fahrzeugrahmen, Kabine, Verbrennungsmotor, Kühlerpaket, Felgen, Reifen, Hubwerke, Tank, Kleinteile <i>Frame, cabin, combustion engine, cooling, rims, tyre, lifting units, tank, small parts</i> | | | 2 697 kg | 30 676 € | |
| Konventioneller Antriebsstrang Conventional drive train | | | Diesel-elektrischer Einzelradantrieb mit integrierten Radnabenmotoren Diesel-electric single wheel drive with integrated wheel-hubs | | |
| Zentral-/Verteilergetriebe, Achsen mit Radvorgelege, Gelenkwellen, Ölvorrat <i>Central and transfer gearbox, axes with final drive, transmission shafts, oil storage</i> | 1 141 kg | 16 800 € | Radmotoren, Generator, Radvorgelege, Leistungselektronik, Einzelradaufhängung <i>Wheel drives, generator, final drives, power electronics, independent suspension</i> | 12 114 kg ¹⁾ | 16 710 € ²⁾ (12 672 € ³⁾) |
| Gesamtfahrzeug <i>Entire vehicle</i> | 3 838 kg | 47 476 € | Gesamtfahrzeug <i>Entire vehicle</i> | 3 911 kg | 47 386 € |
| | | | Bilanz <i>Balance</i> | +73 kg | -90 € |

¹⁾ Optimale Gestaltung der Antriebskomponenten / *Optimal designed drive components.*

²⁾ Eigene Prognose / *Own prediction.*

³⁾ Studie des VDE zur möglichen Kostenentwicklung [5] / *VDE study to suspected cost trends [5].*

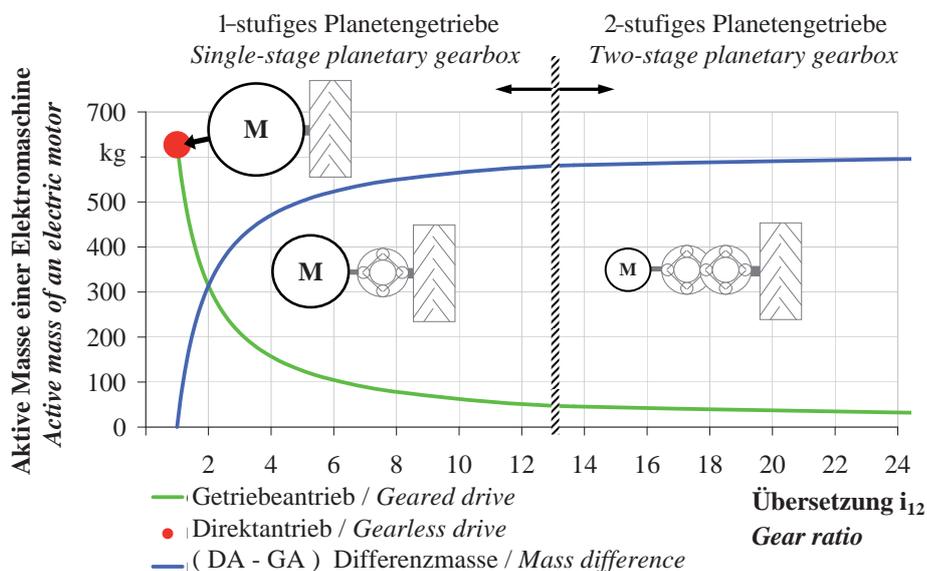
Aufgrund der mechanischen Entkoppelung der Drehbewegung der Räder schwindet das feste Verhältnis der Reifendurchmesser zwischen Vorder- und Hinterachse, was zu einem geringeren Reifenverschleiß führt.

Den zahlreichen positiven Eigenschaften steht allerdings ein entsprechender Optimierungsaufwand gegenüber. Elektrifizierte Einzelradantriebe sind gegenüber konventionellen Antrieben wettbewerbsfähig, wenn durch eine Integration der

Antriebskomponenten hohe Leistungsdichten und damit eine geringe Gesamtmasse erzielt werden. Bei einer Realisierung mit Standardkomponenten verliert der elektrifizierte Einzelradantrieb aufgrund der Gewichtsnachteile und den hohen ungedeferten Massen an Bedeutung.

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Leistungsdichte einer Elektromaschine ist die Anhebung der Rotordrehzahl durch Getriebestufen [6]. Exemplarisch ist in **Abbildung 2** ein

Abb. 2



Active Motormasse der Elektromaschine mit einem Luftspaltdurchmesser von 630 mm als Funktion der Getriebeübersetzung
Fig. 2: Active mass of an electric motor with an air gap diameter of 630 mm with respect to the gear ratio

Massevergleich zwischen Direkt- und Getriebeantrieb dargestellt. Beide Antriebe sind Synchronmaschinen mit einem Dreh Schub von 28 kN/m² und einem Luftspaltdurchmesser von 630 mm, die am Rad ein Drehmoment von 7 300 Nm erzeugen. Mit dem Vergrößern der Getriebeübersetzung verkleinert sich das erforderliche Drehmoment und somit die Eisenlänge des Stators. Bei einer Übersetzung von $i = 5$ reduziert sich die Masse des aktiven Teils auf 20 % im Vergleich zum Direktantrieb. Der Zusatzaufwand des Getriebes, bei Radantrieben oft in Form von Planetenstufen, ist ab einem Übersetzungsverhältnis größer drei gerechtfertigt. Konzeptvergleiche haben gezeigt, dass Getriebe bei Fahrzeugen mit hohen Drehmomentbeanspruchungen unumgänglich sind [7]. Ab einer bestimmten Getriebeübersetzung ist jedoch abzuwägen, inwiefern Nachteile, wie Wirkungsgradverluste, zu geringe Fertigungstoleranzen oder zu hoher Getriebeaufwand, das entsprechende Konzept beeinflussen.

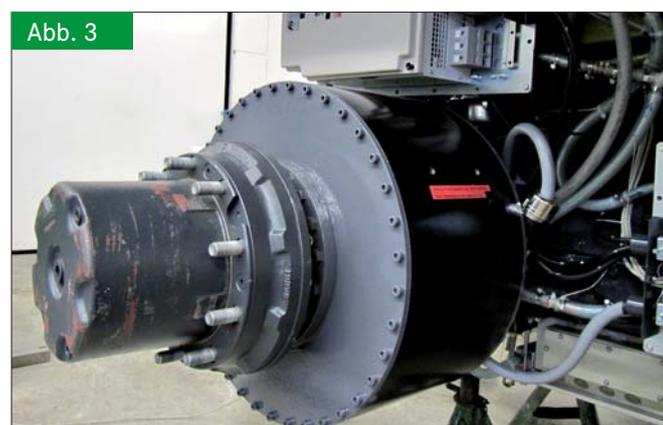
Weiterhin können die Leistungsdichten von Elektromaschinen durch verbesserte Magnetwerkstoffe, höhere Polpaarzahlen und effizientere Kühlmethode gesteigert werden.

Um gleiche Zugkräfte wie bei konventionellen Traktoren zu realisieren, sind die Radmotoren entsprechend zu dimensionieren. Dazu sind Kenntnisse zu Kraftverlauf und Lastkollektiven an den Rädern notwendig. Eine weitere technische Herausforderung ergibt sich aus den großen Raddrehmomenten bei kleinen Raddrehzahlen auf dem Feld und den hohen Transportgeschwindigkeiten. In vielen konventionellen Traktoren wird diese Spreizung mit Schaltstufen gelöst.

Ausrüstung eines Traktors mit Einzelradantrieben

Der Forschungstraktor besitzt in der ersten Entwicklungsphase zwei Radmotoren an der Hinterachse. Die beiden Einzelradantriebe sind in modularer Bauweise ausgeführt (**Abbildung 3**).

Der mit dem Getriebe verbundene Elektromotor, dessen Gehäuse tragend ausgeführt ist, ist am Fahrzeugrahmen befestigt. Um eine kostengünstige Versuchsbasis zu realisieren, wurden Standardkomponenten für die Leistungselektronik verwendet. Dennoch bietet das System alle Möglichkeiten, das stationäre



Einzelradantrieb mit modularen Komponenten. Foto: TU Dresden
Fig. 3: Wheel drive hub with modular components

und dynamische Systemverhalten des diesel-elektrischen Antriebes zu untersuchen. In einer weiteren Entwicklungsphase werden alle Antriebskomponenten (Elektromaschine mit Kühlung, Getriebe, Betriebs- und Feststellbremse) in die Radfelge integriert, um die oben genannten Anforderungen zu erfüllen. Die erreichte Leistungsdichte des integrierten Radnabenantriebes liegt weit über der der modularen Lösung. In weiteren Entwicklungsarbeiten ist der erreichte Wert dennoch zu steigern (**Tabelle 1**).

Schlussfolgerungen

Am Lehrstuhl Agrarsystemtechnik werden elektrische Antriebssysteme mit modularen und integrierten Einzelradantrieben für mobile Landmaschinen erforscht und entwickelt. Diese Systeme sind auf mobile Arbeitsmaschinen, Traktoren und Anbaugeräten mit Triebachsen übertragbar. Neben einer Vereinfachung des Antriebsstranges bieten Einzelradantriebe einen Zuwachs an Funktionalität und Effizienz gegenüber konventionellen Antrieben. Jedoch besitzen modulare Konzepte mit elektrischen Antrieben oft Gewichts- und Kostennachteile. Durch eine hohe Integration und die Ausnutzung von physikalischen Eigenschaften der Elektromaschinen lässt sich das Gewicht des Radantriebes deutlich reduzieren. Eine Masse-Kosten-Bilanz prognostiziert dem integrierten Einzelradantrieb Kennzahlen, die dem konventionellen Antrieb ähneln. Weitere Forschungsarbeiten werden sich auf die Optimierung der Kühlung der Elektromaschinen zur Steigerung der Leistungsdichte, eine Erhöhung der Packungsdichte des Radantriebes sowie auf Konstruktionsvereinfachungen zur Senkung der Herstellungskosten konzentrieren.

Literatur

- [1] Aumer, W.; Lindner, M.; Geißler M.; Herlitzius Th. (2008): Elektrischer Traktor: Vision oder Zukunft? Landtechnik 63 (1), S. 14–15
- [2] Herlitzius, Th. (2009): Gegenwart und Zukunft der Antriebstechnik für Landmaschinen. Vortrag bei der Jahreshauptversammlung des Landesverbandes Lohnunternehmen NRW e. V., Harsewinkel, 13.02.2009. Vortrag erhältlich per E-Mail beim Autor: herlitzius@ast.mw.tu-dresden.de
- [3] Herlitzius, Th.; Aumer, W.; Lindner, M.; Bernhardt, G.; Schuffenhauer, U.; Michalke, N.; Kuß, H. (2009): System Integration and Benefits of Electrical Solutions in Mobile Machines. ECPE-Seminar, More Electric Vehicles, München, 30.–31.03.2009, Kapitel 14
- [4] Rauch, N.: Mit elektrischen Antrieben Traktor-Geräte-Kombinationen optimieren. Tagung Land.Technik für Profis, Marktobendorf, 22.–23.02.2010. VDI-Wissensforum GmbH, Düsseldorf, S. 85-100
- [5] Elektrofahrzeuge – Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG), Frankfurt, April 2010, S. 16 und 52
- [6] Geißler, M.; Lindner, M.; Aumer, W.; Herlitzius, Th. et al. (2009): Diesel-elektrisches Antriebssystem in selbstfahrenden Landmaschinen. 4. Fachtagung Baumaschinentechnik 2009 – Energie, Ressourcen, Umwelt, Dresden. Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e.V. (FVB), Frankfurt, Heft Nr. 37, S. 135–144
- [7] Weck, M.; Erhard, P. (2000): Kompakte Magnet-Motor-Antriebssysteme als Basistechnologie für künftige Brennstoffzellenfahrzeuge. Tagung Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden Okt. 2000, VDI Berichte Nr. 1565, S. 441

Autoren

Dipl.-Ing. Mike Geißler, Dipl.-Ing. Mirko Lindner und M. Sc. Wolfgang Aumer sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl Agrarsystemtechnik der TU Dresden (Leitung: Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Herlitzius), Bergstraße 120, 01069 Dresden, E-Mail: geissler@ast.mw.tu-dresden.de