

Markus Heckmann, Zoltan Gobor, Stefan Huber, Thomas Kammerloher und Heinz Bernhardt

# Entwicklung eines Prüfstandes für Fahrtriebssysteme in mobilen Arbeitsmaschinen

Die objektive Bewertung von unterschiedlichen Antriebsarchitekturen erfordert eine Versuchsumgebung, die die Prüfung von Fahrtrieben unter gleichen Bedingungen ermöglicht. Auf der Basis eines digitalen Prototyps wurde ein Prüfstand entwickelt, der im Folgenden von der Konzeptentwicklung bis zur Durchführung der Prüfstandversuche beschrieben wird. Anhand der Untersuchung und Bewertung verschiedener Achsantriebe bei einem selbstfahrenden Exakt-Feldhäcksler konnten belastbare Ergebnisse erzielt werden.

## Schlüsselwörter

Prüfstand, Feldhäcksler, Fahrtrieb

## Keywords

Test bench, forage harvester, traction drive

## Abstract

Heckmann, Markus; Gobor, Zoltan; Huber, Stefan; Kammerloher, Thomas and Bernhardt, Heinz

## Design of a test bench for traction drive systems in mobile machines

Landtechnik 68(6), 2013, pp. 415–419, 6 figures, 8 references

Different driveline architectures can be characterized by their specific features. The validation and evaluation of them depends on the conditions of their usage. To carry out an objective research a testing environment is required allowing examinations of alternative drivelines under the same conditions. This publication presents the development of a novel and to the experimental requirements adapted test bench, which allows testings of the different driveline architectures, especially in a self-propelled forage harvester. Furthermore, the single working steps are described – from the conception phase through conduction of experiments on the test bench including the final evaluation.

Die Implementierung von hybriden und vor allem von elektrischen Fahrtrieben in Landmaschinen stehen im Fokus aktueller Forschung und Entwicklung [1–4]. Ein Ansatz ist es, Potenziale elektrischer Antriebe gegenüber drehzahlvariablen hydraulischen Antrieben zu bestimmen und im spezifischen Anwendungsfall zu vergleichen. Dies erfordert spezielle Komponenten und Methoden, damit Systemveränderungen kritisch untersucht und bewertet werden können. Ein Teilziel des vorliegenden Forschungsprojektes, das von der Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik der Technischen Universität München durchgeführt und aus Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert wurde, ist die Entwicklung eines Prüfstandes zur Untersuchung und Bewertung verschiedener Achsantriebe in einem selbstfahrenden Exakt-Feldhäcksler.

## Material und Methoden

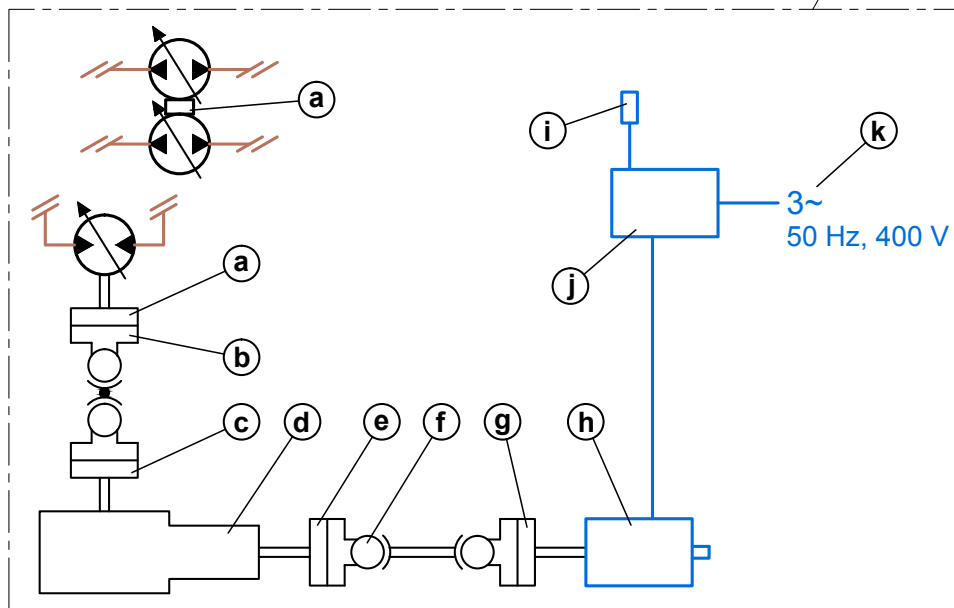
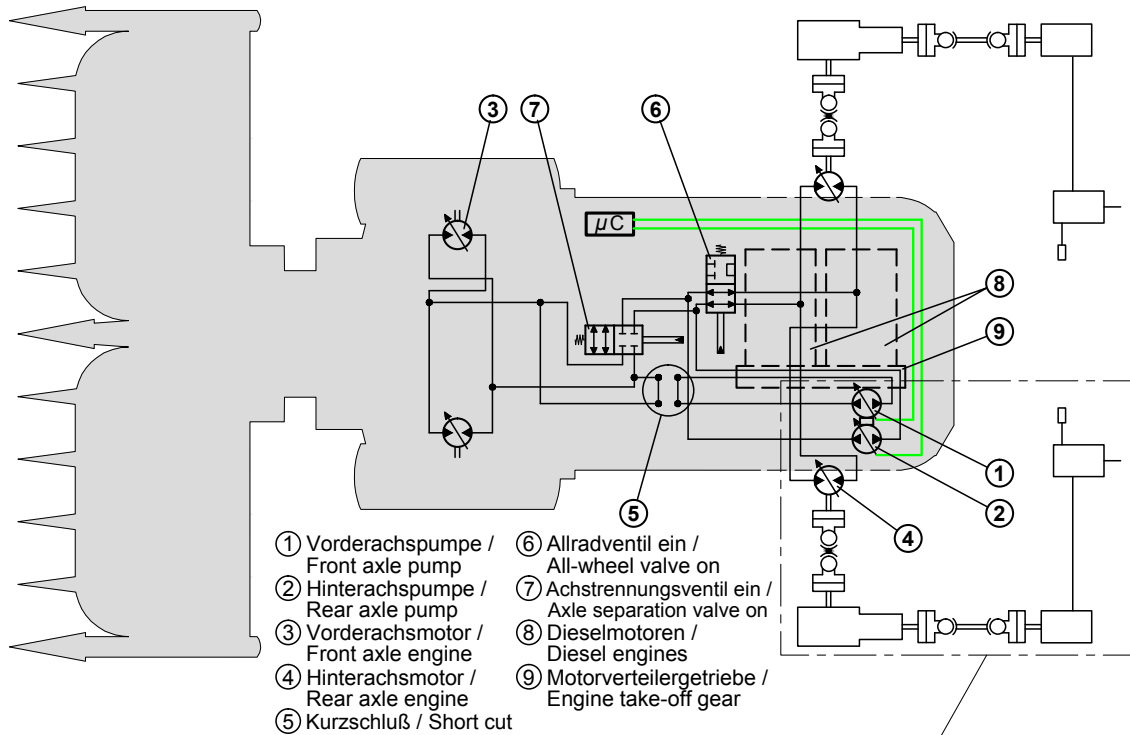
Der Prüfstand wurde mit dem Ziel entwickelt,

- den Einfluss der Reifen zu eliminieren, was beispielsweise bei einem Rollenprüfstand nicht möglich wäre, und
- eine Modifikation der Leitungsführung – mit einer damit verbundenen Einflussnahme auf die Ergebnisse – auszuschließen, indem die Komponenten zur Prüfung in der Maschine verbleiben.

Daraus wurde als Hauptanforderung an den Prüfstand abgeleitet, dass der Prüfstand flexibel an die Rahmenbedingungen der Versuchsmaschine angepasst werden kann.

Das Konzept für die Messung des hydrostatischen Achsantriebes des Versuchsfeldhäckslers ist in **Abbildung 1** dargestellt. Dafür wird der Antrieb der Vorderachse durch einen Kurzschluss der Hoch- und Niederdruckseite stillgelegt. Über entsprechend geschaltete Ventile treibt somit die kleinere der beiden Fahrtriebepumpen ausschließlich die Hinterachsmo-

Abb. 1



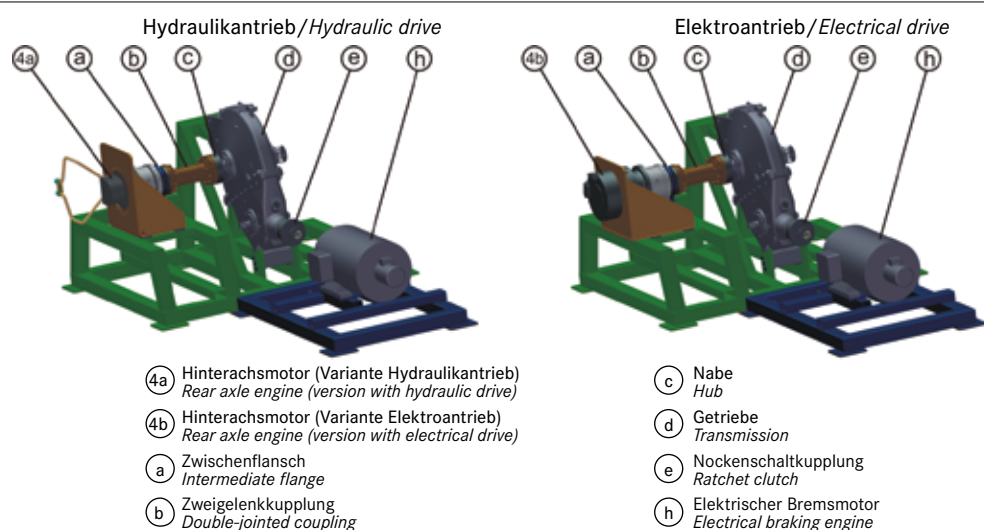
- (a) Zwischenflansch / Intermediate flange  
 (b) Zweigelenkkupplung / Double-jointed coupling  
 (c) Nabe / Hub  
 (d) Getriebe / Transmission,  $i = 26,208 : 1$   
 (e) Nockenschaltkupplung / Ratchet clutch  
 (f) Gelenkwelle / Universal shaft  
 (g) Adapterflansch / Adapter flange  
 (h) Elektrischer Bremsmotor / Electrical braking engine  
 (i) Bremswiderstand / Braking resistor  
 (j) Frequenzumrichter / Frequency converter  
 (k) Netzanschluß / Mains supply

Schematischer Aufbau des Prüfstandes zur Wirkungsgradbestimmung der Komponenten des Hinterachsfahrtriebes [6]  
 Fig. 1: Schematic layout of the test bench to determine the efficiency of the rear axle traction drive components [6]

toren an [5]. Durch die Trennung der Pumpen ist es möglich, die mechanische Leistung direkt an der Pumpeneingangswelle zu erfassen. Ebenso wird das auftretende Drehmoment direkt an beiden Radnabenmotoren gemessen. Über Kupplungen, Getriebe und Gelenkwellen wird die Verbindung zu den elektrischen

Brasmaschinen hergestellt, die das uniforme Belasten der beiden Radmotoren sicherstellen. Die elektrische Ansteuerung der Brasmaschinen gewährleistet darüber hinaus auch die Aufhebung der hydraulischen Differenzialwirkung des Achsantriebes, da geringe Unterschiede im Wirkungsgrad der

Abb. 2



Varianten des digitalen Prototyps mit Prüfstandskomponenten

Fig. 2: Optional configurations of the digital prototype including test bench components

Übersetzungsgetriebe zu einem Drehzahlunterschied an der Abtriebsseite führen würden.

### Digitaler Prototyp

Der digitale ist ebenso wie der physische Prototyp des Prüfstands am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft konzipiert und entwickelt worden. Für die Entwicklung und Realisierung wurde Pro/Engineer WF4 benutzt, ein vollparametrisches 3D-CAD Softwarepaket, das die Bearbeitung der gesamten Prozesskette vom Entwurf bis zur Fertigung des realen Prototyps ermöglichte. Darauf aufbauend war das detaillierte Modellieren aller Bauteile ebenso wie der virtuelle Zusammenbau von neuentwickelten und bestehenden digitalen Modellen, die von unterschiedlichen Herstellern zur Verfügung gestellt worden sind, ohne Beschränkungen möglich (**Abbildung 2**). Des Weiteren sind bereits in der ersten Phase der Entwicklung unter anderem Kollisionsanalysen durchgeführt und die Funktionalität der verschiedenen Konfigurationen des Prototyps geprüft worden. Auf diese Weise konnten die Optimierungen bereits am digitalen Prototyp umgesetzt werden. Im Hinblick auf die Robustheit und die erforderliche Genauigkeit beim Einbau von Komponenten im Prüfstand sind Konstruktionsfehler mithilfe von Analysen am digitalen Prototyp minimiert worden, wodurch sich die Entwicklungszeit deutlich verkürzte. Im Projekt konnte Kosten- und Zeitersparnis als wichtigste Vorteile der digitalen Prototypentwicklung bei dem Bau des physischen Prototyps (**Abbildung 3**) bestätigt werden.

### Datenerfassung und Regelung

An der Eingangswelle der Pumpe wird die mechanische Leistung erfasst, ebenso die beiden abtriebsseitigen Drehmomente. Um auf die abgegebene Leistung zu schließen, werden zusätzlich die Rotorlagegeber der Bremsmotoren ausgewertet und um das Übersetzungsverhältnis des Getriebes korrigiert

Abb. 3



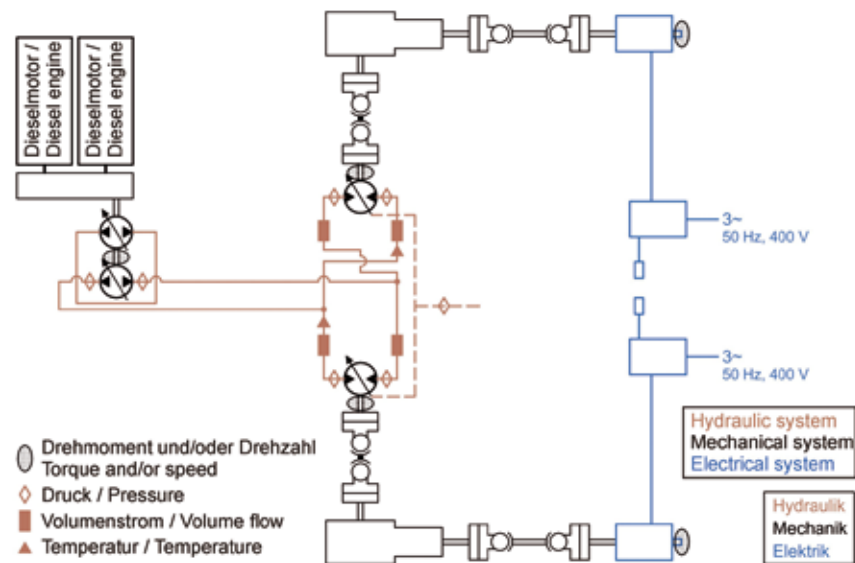
Prüfobjekt mit Prüfstandskomponenten in der Versuchshalle während der Versuche (Foto: M. Heckmann, TU München)

Fig. 3: Test object including test bench components during tests in the experimental hall

(**Abbildung 4**). Neben den mechanischen Größen findet auch eine Aufzeichnung der Parameter Druck und Volumenstrom an mehreren Stellen im hydraulischen System statt, um die Daten vollständig zu erfassen und Teilwirkungsgrade im System bestimmen zu können. Die Aufzeichnungsrate beträgt dabei 100 Hz.

Die Datenerfassung, ebenso wie die Regelung des Prüfstandes, erfolgt mit der Hardware CompactRio von National Instruments und der Software Labview. Die dafür genutzten Schnittstellen sind die Signaleingänge für die Sensoren in analoger und digitaler Bauart, die CAN-Schnittstelle zum Ansteuern des Pumpenausschwenkwinkels über den Fahrzeug-BUS und die Analogausgänge zur Ansteuerung der beiden Bremsmotoren. Datengrundlage für die Versuche ist eine Datei mit den zu überprüfenden Betriebspunkten, die aus je einem Drehmoment-Drehzahl-Paar bestehen. Jeder einzelne dieser

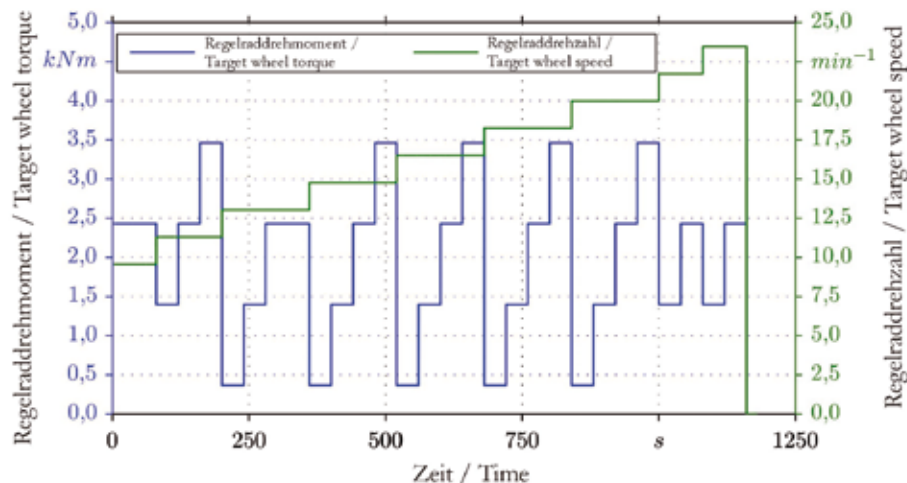
Abb. 4



Messgrößen und Einbauorte der jeweiligen Sensoren während des Versuchs (nach [7], geändert)

Fig. 4: Measured values and transducer locations during test bench experiments ([7], modified)

Abb. 5



Beispielhafter Soll-Prüfzyklus zur Belastung des Achsantriebes mit veränderlichen Werten für abtriebsseitiges Drehmoment und Drehzahl

Fig. 5: Example of a target test cycle for the load on the axle drive with variable values for torque and speed on both output sides

Betriebspunkte, die auf Grundlage vorausgegangener Feldversuche berechnet worden sind [8], wird am Prüfstand für ein definiertes Zeitintervall gehalten, bevor das nächste Wertepaar eingeregelt wird.

Somit wird für jeden Betriebspunkt ein quasi stationärer Zustand automatisiert aufgezeichnet. Über die Datenexportfunktion werden die Messergebnisse als Textdatei aus Labview exportiert und in Matlab importiert und ausgewertet.

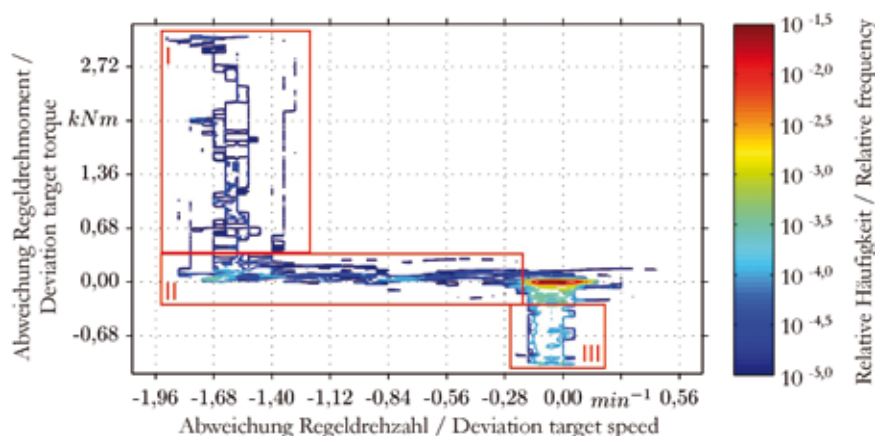
## Ergebnisse

**Abbildung 5** zeigt beispielhaft eine Prüfdatei mit den relevanten Parametern Regelraddrehmoment und Regelraddrehzahl in Abhängigkeit von der Messzeit. Diese Prüfung deckt ausschließlich den ersten Antriebsquadranten mit positivem Drehmoment und positiver Drehzahl ab und repräsentiert nur

Betriebspunkte, die mit einer Wahrscheinlichkeit größer 1 % in vorab durchgeführten Feldversuchen aufgetreten sind [8]. Für weniger häufig auftretende Betriebspunkte sowie für die drei weiteren Antriebsquadranten werden eigenständige Prüfzyklen erstellt, die jeweils bei unterschiedlichen Pumpeneingangsdrehzahlen in dreifacher Wiederholung durchgeführt werden. Somit wird eine ausreichend große Datenmenge aufgezeichnet, um gesicherte Ergebnisse zu erzielen.

Um die Qualität der Regler- und Prüfstandsgüte bewerten zu können, sind die Sollwertvorgaben in Bezug zu den Istwerten zu setzen. Besonders muss dabei die gegenseitige Beeinflussung von Drehmoment und Drehzahl, vor allem im hydraulischen Serienfahrantrieb, beachtet werden. In **Abbildung 6** ist die Soll-Ist-Abweichung von Drehmoment und Drehzahl in gegenseitiger Abhängigkeit dargestellt. In der dritten Dimension

Abb. 6



Reproduzierbarkeit der Last- und Drehzahlvorgaben am Prüfstand in gegenseitiger Abhängigkeit der Soll-Ist-Abweichung [7]

Fig. 6: Reproducibility of the targets of load and speed on the test bench in mutual dependence of target and actual deviation [7]

ist die relative Häufigkeit der einzelnen Messwerte angegeben. Somit kann abgeleitet werden, mit welcher relativen Häufigkeit bestimmte Sollwertabweichungen hinsichtlich Drehmoment und Drehzahl während der Versuche aufgetreten sind. Eine Wertepaarung ohne Abweichung im Drehmoment und in der Drehzahl steht somit für eine vollständige Übereinstimmung von Ist- und Sollwert. Innerhalb des roten Spektrums ( $10^{-2,0}$ ) sind demnach alle Punkte enthalten, die mit einer relativen Wahrscheinlichkeit über einem Prozent auftreten. Es ist dabei jeweils die Sollgröße von der Istgröße subtrahiert. Bei genauer statistischer Auswertung der Zeitanteile über den Versuchsreihen zeigt sich somit, dass 74 % aller Punkte innerhalb des angestrebten Regelungsbereiches sind.

Aus dem Prüfergebnis lassen sich nun insgesamt drei Bereiche abgrenzen (**Abbildung 6**): In Sektor I ist die Reduzierung des Drehmomentes wiedergegeben, die bei Einstellung der nächsthöheren Drehzahlklasse eintritt, wobei sich die Ist-Drehzahl noch deutlich unterhalb der Soll-Drehzahl befindet. Diese Konstellation tritt beispielsweise bei ca. 1 000 Sekunden in der Sollwertdatei, welche in **Abbildung 5** dargestellt ist, auf. Dies spiegelt die priorisierte Einregelung des Drehmomentes wider: Zuerst wird das Drehmoment ohne Regelungsaktivität hinsichtlich Drehzahl eingeregelt. In Sektor II ist die nachfolgende Einstellung der Drehzahl bei sehr niedriger Drehmomentabweichung dargestellt. Innerhalb einer Drehzahlklasse ( $n = \text{konstant}$ ) führt die schrittweise Drehmomenterhöhung in der Sollwertdatei zur Ausbildung des Sektors III (**Abbildung 6**).

### Schlussfolgerungen

Der gewählte Prüfstand erfüllt die Erwartungen an die Durchführbarkeit der Versuche und an die Reproduzierbarkeit der auf Felddaten basierenden Lastdaten in jeglicher Hinsicht. Durch den automatisierten Ablauf der einzelnen Prüfzyklen wird eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit der wichtigen Parameter erreicht, sodass aussagekräftige Ergebnisse hinsichtlich der Gesamt- und Teilwirkungsgrade der geprüften Antriebssysteme ermittelt werden können.

### Literatur

- [1] Gruber, M. (2013): 100 ha Felderfahrung mit einem elektrisch angetriebenen Rübenvollernter. 4. Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik. 25.–26. Juni 2013, Wieselburg/Österreich
- [2] Geißler, M.; Osinenko, P.; Scholz, J. (2013): Potenzial von Fahrdynamik- und Schlupfregelung am elektrischen Einzelantrieb von Arbeitsmaschinen (am Beispiel Rigitrac). 4. Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik. 25.–26. Juni 2013, Wieselburg/Österreich
- [3] Karner, J. (2013): Entwicklung eines Hybrid-Geräteträgers. 4. Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik. 25.–26. Juni 2013, Wieselburg/Österreich
- [4] Höpfinger, F. (2013): Feldversuche mit elektrischer Triebachse bei einem Abschiebewagen. 4. Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik. 25.–26. Juni 2013, Wieselburg/Österreich
- [5] Hirsch, W. (2001): Vollhydrostatischer Fahrtrieb mit Zweipumpensystem für selbstfahrende Erntemaschinen. Tagung Land.Technik, VDI, 9.–10. November 2001, Hannover, S. 365-370
- [6] Heckmann, M.; Bernhardt, H. (2012): Elektrifizierung eines Feldhäckslers – Vor- und Nachteile im Vergleich zu mechanischen Antrieben. 11. Tagung Landtechnik im Alpenraum, 9.–10. Mai 2012, Feldkirch/Österreich
- [7] Horstmann, J.; Bernhardt, H.; Heckmann, M. (2013): Effizienzsteigerung und Umweltentlastung am selbstfahrenden Exakt-Feldhäckslers durch Optimierung des Fahrtriebes – Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 27789 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt/Maschinenfabrik Bernard KRONE GmbH und Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik, Technische Universität München, Forschungsbericht
- [8] Heckmann, M.; Bernhardt, H. (2010): Method for comparing alternative traction drives in agricultural working machines based on load spectra analysis. International Conference on Agricultural Engineering AgEng 2010, Clermont-Ferrand, France, 6.-8. September 2010

### Autoren

**Dipl.-Ing. agr. Markus Heckmann** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Dipl.-Ing. (FH) Stefan Huber** ist technischer Mitarbeiter am Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik der Technischen Universität München (Ordinarius: **Prof. Dr. agr. Dr. agr. habil. Heinz Bernhardt**), Am Staudengarten 2, 85354 Freising, E-Mail: markus.heckmann@wzw.tum.de

**Dr.-Ing. Zoltan Gobor** ist Leiter der Arbeitsgruppen „Maschinenbau und Konstruktion“ und „Sonderkulturen und Feldgemüsebau“ und **Thomas Kammerloher** ist technischer Mitarbeiter am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Vöttinger Str. 36, 85354 Freising

### Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Projektförderung und der Maschinenfabrik Bernard KRONE GmbH sowie den beteiligten Mitarbeitern des Instituts für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft und des Lehrstuhls für Agrarsystemtechnik der Technischen Universität München für die sehr gute Zusammenarbeit.