

# Simulationsmodell zur Unterstützung von selbstoptimierenden Fähigkeiten eines Traktors

Dipl.-Ing. **T. Kautzmann**, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima), Karlsruhe;  
Prof. Dr.-Ing. **M. Geimer**, KIT, Mobima, Karlsruhe;  
Dipl.-Inform. **M. Wünsche**; KIT, Institut für Angewandte Informatik und  
Formale Beschreibungsverfahren (AIFB), Karlsruhe;  
Dr.-Ing. **S. Mostaghim**, KIT, AIFB, Karlsruhe;  
Prof. Dr. **H. Schmeck**, KIT, AIFB, Karlsruhe;

## Kurzfassung

Diese Veröffentlichung thematisiert eine neuartige Steuerungsarchitektur für Traktoren, die sog. Observer/Controller (O/C) Architektur. Unter Einbeziehung adaptiver und lernfähiger Algorithmen und ganzheitlicher Systembetrachtung ist diese fähig, einen Traktor sukzessive zu optimieren. Ziel ist die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs. Hierzu wurde ein wirkungsgradbehaftetes Modell des Traktors mit reduzierter Dynamik entwickelt um die Architektur anhand einer *Model in the Loop*- Simulation zu verifizieren. Das Modell wird hier näher vorgestellt. Herausstellungsmerkmal ist die Abbildung aller als wesentlich eingestuften Einflüsse auf den Kraftstoffverbrauch.

## 1. Ausgangssituation

Die Traktorentwicklung der letzten Jahrzehnte ist geprägt von einer wachsenden Anzahl an Systemfreiheitsgraden. Ein Beispiel hierfür ist die Einführung von stufenlosen Getrieben aus dem Jahre 1995, die seit der Landtechnik- Messe Agritechnica 2009 in Hannover nicht mehr nur auf Traktoren der mittleren und oberen Leistungsklasse beschränkt ist. Durch die einsetzende und wachsende Elektronikanwendung in allen Bereichen des Traktors entstehen zusätzlich neue Möglichkeiten der Vernetzung von Komponenten innerhalb des Traktors (nach [1]). Dies führt letztendlich wiederum zu einer Erhöhung der Freiheitsgrade durch die Auflösung von Zwangsbedingungen, die durch eine mechanische Ansteuerung gegeben ist. Grund für die Einführung dieser Technologien in den Traktor ist im Wesentlichen der Komfortgewinn für den Maschinenführer. Jedoch ergeben sich auch neue Möglichkeiten der Betriebsführung. Werden heute oftmals Freiheitsgrade unabhängig und kennfeldbasiert eingestellt [2], so zeigen aktuelle Forschungsarbeiten, dass durch das gleichzeitige Optimieren mehrerer Einheiten eines Traktors signifikante Potenziale gegenüber diesen konventionellen Betriebsstrategien freigesetzt werden. In [3,4] werden diesbezüglich Motor und Getriebe, in [5] Motor und Arbeitshydraulik und in [6] einzelne Parameter in Traktor und Gerät im Verbund optimiert.

Die in Kapitel 2 vorgestellte Idee greift oben beschriebene Entwicklungen auf und führt diese konsequent fort. So ist das Ziel die Optimierung der Gesamtmaschine durch ganzheitliche Betrachtung aller auf die Zielfunktion Einfluss nehmender manipulierbaren Parameter unter Verwendung einer neuartigen Steuerungsarchitektur. In dieser Veröffentlichung vertiefend eingegangen werden soll auf das Traktormodell des Versuchsfahrzeugs Fendt Vario 412, welches als Basis für die Verifikation der Architektur dient. Optimiert werden soll der Kraftstoffverbrauch.

## 2. Neuer Lösungsansatz

Ein Traktor besteht heute größtenteils, wie in Kapitel 1 beschrieben, aus individuell angesteuerten und individuell geregelten Baugruppen, die untereinander kooperieren um selbständig ein gesetztes Ziel zu erreichen. Solche Systeme werden auch als selbst-

organisiert bezeichnet. Eine Architektur, um solche Systeme zu beherrschen und effizient betreiben zu können, ist die Observer/Controller (O/C)- Architektur, die im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1183 OC „Organic Computing“ entwickelt wurde [7,8]. Das zu optimierende System, in diesem Fall ein Traktor, wird gemäß **Bild 1** als „System under Observation and Control“ (SuOC) bezeichnet. Das SuOC ist selbständig in der Lage, die vorgesehenen Funktionen auszuführen, jedoch nicht immer mit optimaler Effizienz. Ziel der O/C-Architektur ist es, das SuOC in seiner Gesamtheit zu überwachen und bei Bedarf zu optimieren, indem der Controller die Sollwerte der Aktuatoren beeinflusst. Um die aktuell zu verfolgende Zielfunktion der Optimierung vorgeben zu können, wird eine Schnittstelle für einen übergeordneten Bediener zur Verfügung gestellt (goals), der spezifische Vorgaben machen kann. Weitere Informationen zum Aufbau der O/C- Architektur sind in [2] veröffentlicht.

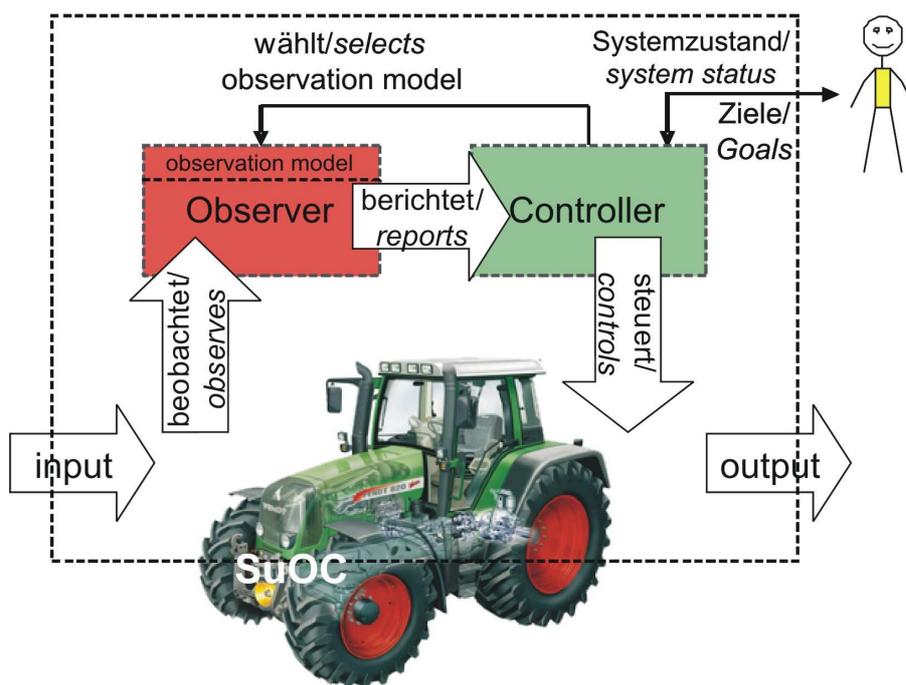


Bild 1: Observer/ Controller- Architektur

### 3. Ziele

In der aktuellen Projektphase wird mittels wirkungsgradbehaftetem Traktormodell in AMESim der reale Traktor als SuOC simuliert. AMESim ist ein leistungsflussorientiertes und topologiebasiertes Simulationsprogramm der Firma LMS Imagine.Lab. Das Modell soll sowohl dem Observer eine einfache Möglichkeit bieten, Simulationsdaten bereitzustellen, als auch dem Controller einfache Einflussmöglichkeiten gewährleisten. Dieser besondere Aufbau der Verifikation am Simulationsmodell wird als Model in the Loop (MiL) bezeichnet. Die O/C- Architektur soll nach der MiL-Phase in eine Rapid Prototyping Hardware implementiert werden, mit der der Traktor gesteuert wird. Diese besitzt die Möglichkeit, ein in Matlab/ Simulink erstelltes Modell mittels automatischer C-Code Generierung zu importieren. Daher wird schon jetzt die O/C- Architektur in Simulink erstellt. Die Kommunikation zwischen AMESim und Simulink soll über sog. S-Functions aufgebaut werden.

Ziel ist der Aufbau eines Traktormodells mit möglichst vollständiger Erfassung von sowohl internen als auch externen Einflussgrößen auf die Zielfunktion bei vertretbarer Rechenzeit. Bei der Simulation geht es ferner darum, Ergebnisse zum grundsätzlichen Maschinenverhalten zu erhalten, die erst in einem späteren Schritt anhand gemessener Daten aus der Maschine validiert werden sollen.

## 4. Aufbau des Modells in AMESim

Die in Kapitel 3 formulierten Ziele sind mittels zeitbasiertem, empirischen Simulationsansatz und konzentrierten Parametern zu erreichen. Zu Gunsten einer verbesserten Rechenzeit wird ein Modell gewählt, welches eine beschränkte Dynamik aufweist.

### 4.1. Aufbau des verlustfreien Modells

Im Gegensatz zu bekannten Modellen aus der Literatur [9,10,11] müssen hier möglichst alle wesentlichen, auf den Kraftstoffverbrauch einfluss-nehmenden inneren und äußeren Einflüsse in den einzelnen Funktionsgruppen abgebildet werden. [9] untersuchte hier die wesentlichen äußeren Einflüsse auf den Traktor. Wesentliche innere Einflüsse sind all jene, die eine nicht zu vernachlässigende Änderung von Drehzahl oder Drehmoment an der Kurbelwelle verursachen. Das Modell wird modular aufgebaut. Im Folgenden wird auf den Aufbau der einzelnen verlustfreien Baugruppen Antriebsstrang, Arbeitssysteme und Hilfs- und Nebenaggregate (H.u.N.) eingegangen, anschließend folgt eine Verlustmodellierung.

#### Antriebsstrang

Das Modell des Antriebsstrangs besteht aus den Komponenten Verbrennungskraftmaschine (VKM), hydrostatisch- leistungsverzweigtes Vario- Getriebe und Abtrieb (mechanisches Verteilergetriebe und Räder). VKM und VARIO- Getriebe lassen sich mit den in der AMESim-Bibliothek zur Verfügung stehenden Modellen einfach aufbauen. Beim Differenzial stellen sich jedoch Zustände aufgrund der Wechselwirkung mit dem Reifen-Boden-Kontakt ein, sodass ein gerichteter Austausch von Flussgrößen nicht anwendbar ist. [9] behandelte dieses Problem mittels Lösen eines 30- dimensionalen Gleichungssystems, in welches sowohl die Zustände am Differenzial als auch des Rad-Boden Kontaktes eingehen. In diesem Fall wird darauf aufbauend ein 32-dimensionales Gleichungssystem gelöst indas zusätzlich zum Modell in [9] die Gruppenschaltung und der Lenkwinkel mit einfließt. Die Berechnung des Gleichungssystems ist in AMESim nicht möglich, daher wird hier mittels S-function in die Simulationsumgebung Matlab gewechselt.

In [9] wird weiter ein einfaches Reifenmodell vorgestellt, welches aus 4 empirisch ermittelten Parametern die Triebkraft-Schlupf Kurve ( $\kappa$ - $\sigma$  Kurve) für verschiedene Böden und Reifen darstellt. Die Kurve ist nicht monoton wachsend, was beim Lösen des Gleichungssystems zu einer nicht-eindeutigen Lösung führt. Aus diesem Grund wurde die ursprüngliche Triebkraft-Schlupf Kurve durch ein Polynom 5. Grades angenähert. Fahrzustände jenseits des maximalen Triebkraftsbeiwerts  $\sigma$  ( $\kappa_{max}$ ) der realen Kurve werden, da sie nicht bibo-stabil sind, als unrealistisch eingestuft und daher vernachlässigt.

#### Arbeitssysteme

Der zu modellierende Traktor besitzt die Arbeitssysteme Zapfwelle und Arbeitshydraulik. Die Lenkhydraulik wird aus dem gleichen Netz wie die Arbeitshydraulik gespeist und daher der Arbeitshydraulik zugeordnet.

Die Zapfwelle und Arbeitshydraulik können mit der in AMESim zur Verfügung stehenden Bibliothek abgebildet werden.

#### Hilfs- und Nebenaggregate

Abhängig von Drehzahl und Einschaltbedingung der Hilfs- und Nebenaggregate wird hier die Kurbelwelle mit einem Bremsmoment beaufschlagt.

In **Bild 2** ist links der schematische Aufbau des Modells dargestellt. Durchgezogene Pfeile geben die Richtung der leistungsbeschreibenden Größen zwischen den Funktionsblöcken an. S-functions (in **Bild 2** als „S“ dargestellt) sorgen für den Austausch von Simulationsdaten zwischen den beiden Simulationsumgebungen AMESim (LMS) und Simulink (Firmenlogo „Mathworks“). Ferner sind die aus dem Controller stammenden Sollwertvorgaben gestrichelt eingezeichnet. Diese entsprechen den Freiheitsgraden des Systems Traktor. Auf der rechten Seite sind die möglichen Parametereinstellungen in den Subsystemen Arbeitssysteme, Antriebsstrang und H.u.N. dargestellt.

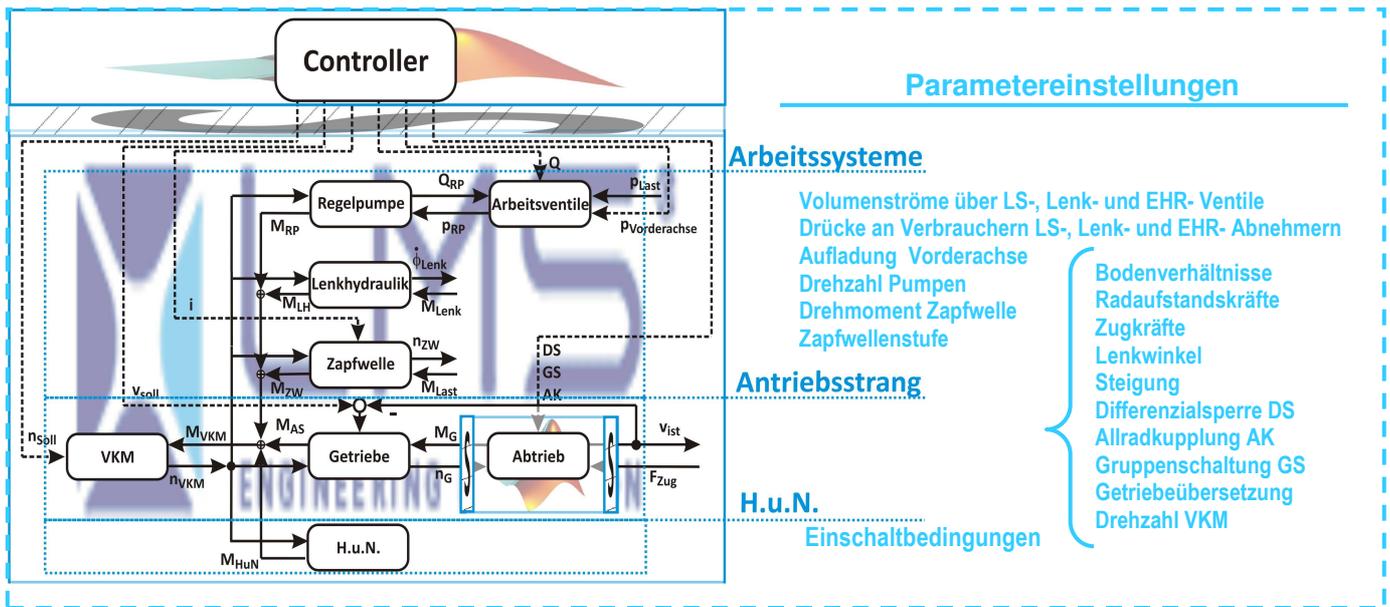


Bild 2: Schematischer Aufbau des Traktormodells

## 4.2. Verlustmodelle

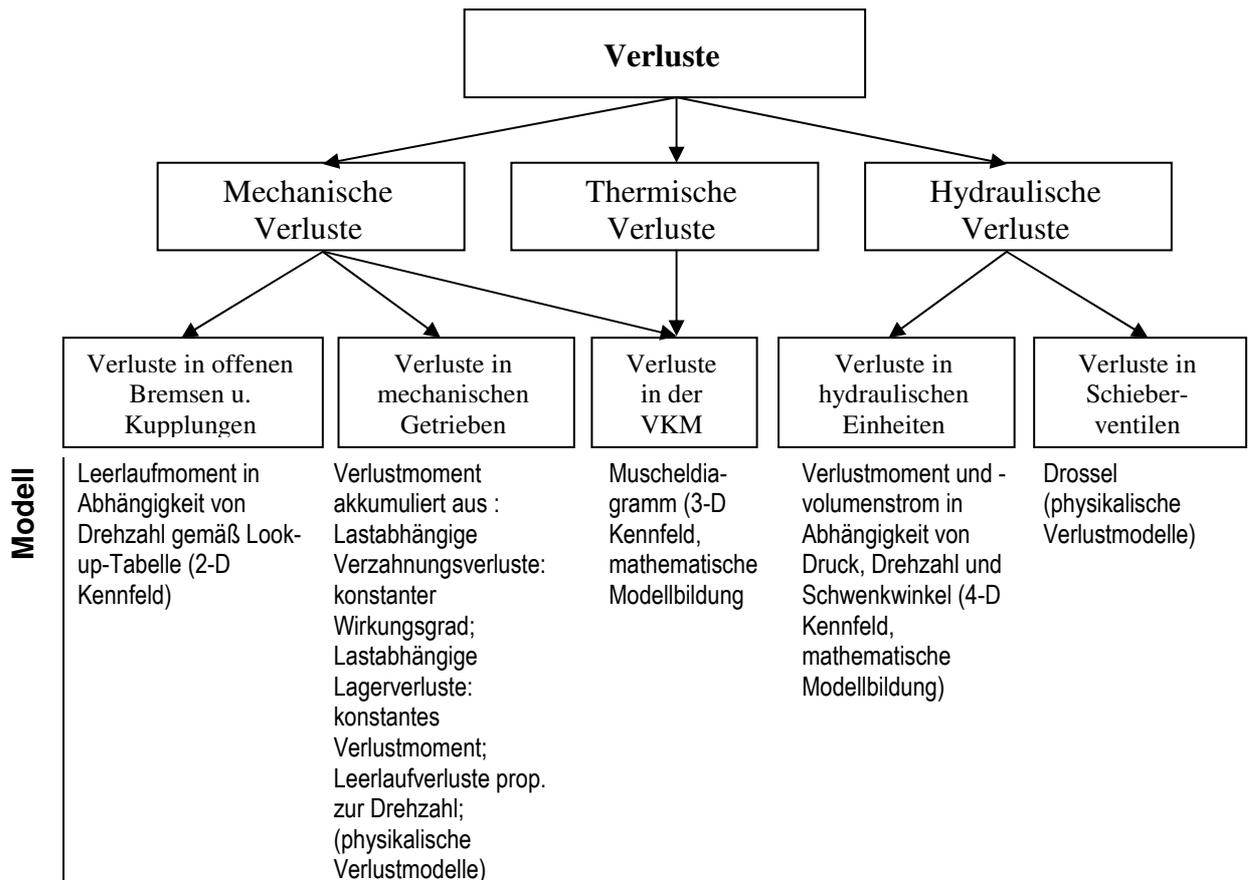


Bild 3: Verlustquellen im Traktor

**Bild 3** lokalisiert die wesentlichen Verlustquellen in Traktoren und beschreibt die hinterlegten Verlustmodelle. Weitere Verlustquellen werden im Rahmen der hier geforderten Genauigkeit vernachlässigt.

## 5. Ergebnisse der Simulation

Dieses Kapitel soll nun ein repräsentatives Ergebnis der Simulation zeigen. Als Belastungsgrößen wurden dem Modell der sog. PowerMix Zyklus 7 „Pressen“ [12] vorgegeben. Dabei wird sowohl Zug ( $P_{\text{Zug}}$ )-, Zapfwellen ( $P_{\text{PTO}}$ )- und hydraulische ( $P_{\text{hydr}}$ ) Leistung umgesetzt. In **Bild 4** sind Zyklus und interne Parametereinstellungen des Modells dargestellt.

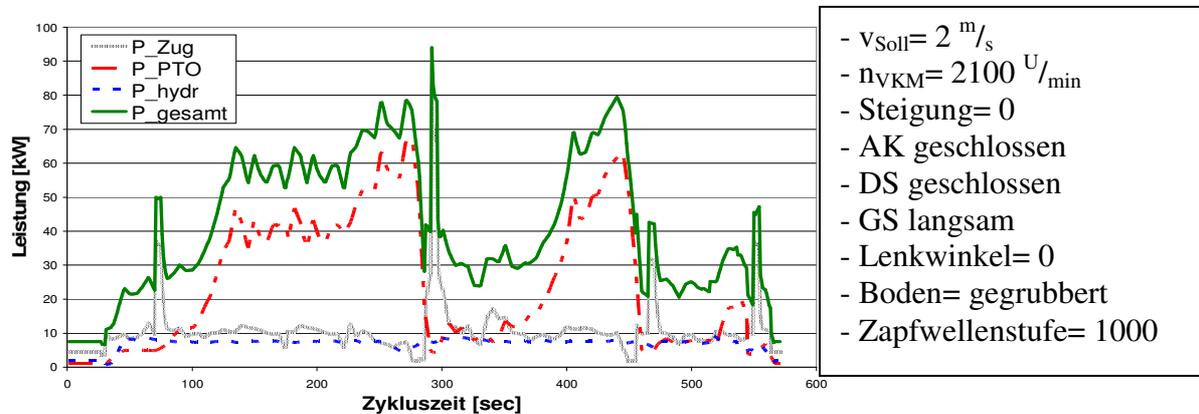


Bild 4: PowerMix- Zyklus 7 mit Traktorparameter (nach [12])

Charakteristische Ergebnisse aus der Simulation zeigt **Bild 5**. Zu sehen ist auf der linken Seite der Drehmomentenverlauf an der Kurbelwelle. Es fällt auf, dass sich der Verlauf ähnlich der Gesamtleistung  $P_{\text{gesamt}}$  aus dem PowerMix verhält. Dies rührt daher, dass die Drehzahl der Kurbelwelle konstant ist und daher das Drehmoment proportional zur Leistung ist, die die VKM abgibt. Weiter fallen die kurzen Drehmomentspitzen im Verlauf auf. Die Ursache hierfür ist die Aufladung der Vorderachse. Die Arbeitshydraulik sorgt hier für die niveaugeregelte Mittellage. Dazu schwenkt die LS- Regelpumpe voll aus um den Druck in der LS- Leitung auf Maximaldruck anzuheben, was letztendlich zu einem Momentenanstieg an der Regelpumpe führt. Auf der rechten Seite von Bild 5 ist der akkumulierte Kraftstoffverbrauch dargestellt.

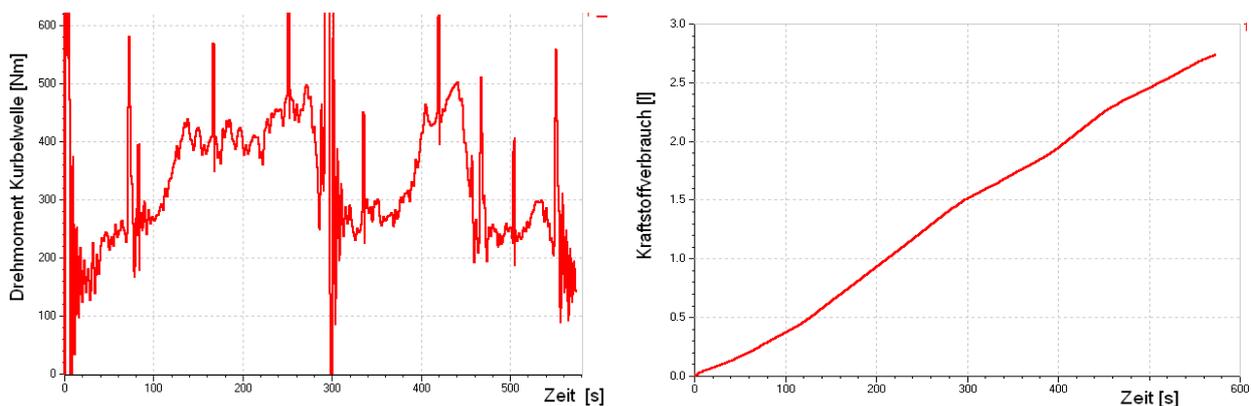


Bild 5: Ergebnisse der Simulation

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Wie in Kapitel 1 angesprochen, zeigen aktuelle Forschungsarbeiten das Potenzial einer Steigerung der Effizienz durch vernetzte Optimierung. Eine konsequente Fortführung dieses Gedankens führt zu dem Schluss, dass mittels Gesamtsystembetrachtung erst die Grundlagen für eine komplette Potenzilausschöpfung gegeben sind. Derzeitige Managementsysteme sind jedoch nicht in der Lage, eine ganzheitliche Maschinenbetrachtung und Optimierung durchzuführen, wenngleich durch das vernetzte Kommunikationssystem die Möglichkeit einer zentralen Informationsverwaltung ermöglicht wird.

Die in dieser Veröffentlichung angesprochene Architektur ist in der Lage, das System Traktor als Ganzes aufzufassen und auf Basis lernfähiger Algorithmen ganzheitlich sukzessive zu optimieren. In gegenwärtiger Projektphase soll diese Architektur anhand des vorgestellten wirkungsgradbehafteten Traktormodells in AMESim verifiziert werden. Weiteres Ergebnis wird das Schreiben einer Anforderungsliste für den Aufbau der Kommunikation zum Traktor in der anschließenden Projektphase sein.

Zukünftige Traktoren werden geprägt sein von einer weiter wachsenden Zahl an Freiheitsgraden. Beispiele hierfür sind der elektrisch unterstützte Antriebsstrang von ZF [13], um Hilfs- und Nebenaggregate zu entkoppeln, das variable Zapfwellengetriebe von John Deere [14] sowie eine noch tiefere Durchdringung stufenloser Getriebe [15]. Um daraus entstehende Potenziale möglichst umfassend erschöpfen zu können, müssen die entstandenen Freiheitsgrade in den ganzheitlichen Optimierungsprozess mit einfließen.

## 7. Literatur

- [1] Reiter, H.: Innovative Technologien am Traktor durch Elektronikanwendung. Landtechnik (58) S. 162–165
- [2] Kautzmann, T., Wünsche, M., Geimer, M. und Schmeck, H.: Self-optimizing Machine Management. 2nd International Conference on Machine Control & Guidance. Schriftenreihe Institut für Geodäsie und Geoinformation (16) S. 107–115
- [3] Seeger, J.: Antriebsstrangstrategien eines Traktors bei schwerer Zugarbeit. TU Braunschweig Diss. 2001
- [4] Brunotte, D.: Einsatzmöglichkeiten eines Fuzzy-Logik-Systems für das Antriebsstrangmanagement eines Traktors. TU Braunschweig Diss. 2005
- [5] Djurovic, M. und Helduser, S.: Neue Load-Sensing Systeme für Traktoren. Düsseldorf: VDI-Berichte (1855) S. 49-54
- [6] von Hoyningen-Huene, M. und Baldinger, M.: Tractor-Implement-Automation and its application to a tractor-loader wagon combination. 2nd International Conference on Machine Control & Guidance. Schriftenreihe Institut für Geodäsie und Geoinformation (16) S. 171–185
- [7] Schmeck, H.: Organic Computing -- A New Vision for Distributed Embedded Systems. Eighth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC 2005) S. 201-203
- [8] Richter, U., Mnif, M., Branke, J., Müller-Schloer, C. und Schmeck, H.: Towards a generic observer/controller architecture for Organic Computing. INFORMATIK 2006 - Informatik für Menschen! (P-93) S.112-119
- [9] Schreiber, M.: Kraftstoffverbrauch beim Einsatz von Ackerschleppern im besonderen Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Emissionen. Universität Hohenheim Diss. 2006
- [10] Kohmäscher, T.: Modellbildung, Analyse und Auslegung hydrostatischer Antriebsstrangkonzep. RWTH Aachen Diss. 2008
- [11] Seeger, J. und Frerichs, L.: Modellbildung und Simulation des Hydrauliksystems des Xerion. VDI-Berichte (1356) S. 257-260
- [12] Degrell, O. und Feuerstein, T.: DLG-PowerMix™. [http://www.dlg-test.de/powermix/PowerMix\\_Teil\\_I.pdf](http://www.dlg-test.de/powermix/PowerMix_Teil_I.pdf). Zugriff am 18.3.2010
- [13] Götz, M., Gruhle, W.-D., Mohr, M. und Grad, K.: Electrically Assisted Powertrains for Agricultural Machinery, in particular Tractors. VDI- Berichte (2060) S. 67-72
- [14] Gugel, R. und Tarasinski, N.: Infinitely variable PTO transmission. VDI- Berichte (2060) S. 441-444
- [15] Schleich, W. und Brenninger, M.: The drive family for a new series of vineyard, orchard and small standard tractors. VDI- Berichte (2060) S. 73-78

## 8. Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung und der Firma AGCO Fendt für die Bereitstellung von Messdaten sowie deren weitere Unterstützung bei der Durchführung des Projekts.