

Christian von Toll und Henning J. Meyer

Energieorientierte Analyse in der Getreideproduktion

Die Entwicklung und der Vertrieb von Landmaschinen werden nach wie vor stark von den Anforderungen der europäischen Abgasgesetzgebung beeinflusst. Zudem ist die Nachfrage nach leistungsstärkeren und effizienteren Maschinen in Deutschland und der ganzen Welt hoch und wird weiter steigen. Die Suche nach Reduktionspotenzialen von Klimagasen darf sich dabei nicht nur auf den Motor und die Abgasnachbehandlung fokussieren, sondern muss auch die einzelnen Arbeitsprozesse umfassen und vollständige Produktionsketten in der Landwirtschaft einbeziehen. Im Zuge der vorliegenden Forschungsarbeit wurde daher eine praxisnahe, ganzheitliche und prozessorientierte Analyse von Landmaschinendaten durchgeführt, durch die auf einem Forschungsbetrieb konkrete Übermotorisierungen von bis zu 119 kW sowie überflüssige Standzeiten in der Erntelogistik herausgearbeitet werden konnten. Ferner wurden alle denkbaren Prozessketten und die dazugehörigen Verbräuche von Stoppel- und Grundbodenbearbeitung über Saatbettbereitung bis hin zum Drillen erfasst, sodass der für den Forschungsbetrieb kraftstoffsparsamste Bodenbearbeitungs- und Drillprozess identifiziert werden konnte.

Schlüsselwörter

Getreidewertschöpfungskette, Arbeitsprozesse, CO₂-Einsparpotenziale, Dokumentation, Energieströme, CAN-Bus

Keywords

Grain value chain, work processes, CO₂-reduction, documentation, energy flows, CAN-Bus

Abstract

von Toll, Christian and Meyer, Henning J.

Energy-oriented analysis in grain production

Landtechnik 68(5), 2013, pp. 327–332, 6 figures, 2 tables, 4 references

For the last years the agriculture industry's development and production of farm machinery have been subject to existing EU emissions legislation. In addition to that the demand for more powerful and efficient machines in Germany, but also abroad is high and will continue to rise. The search for potential reduction of greenhouse gases may thereby not only focus on the engine and the exhaust aftertreatment, but shall also include the individual work processes and all

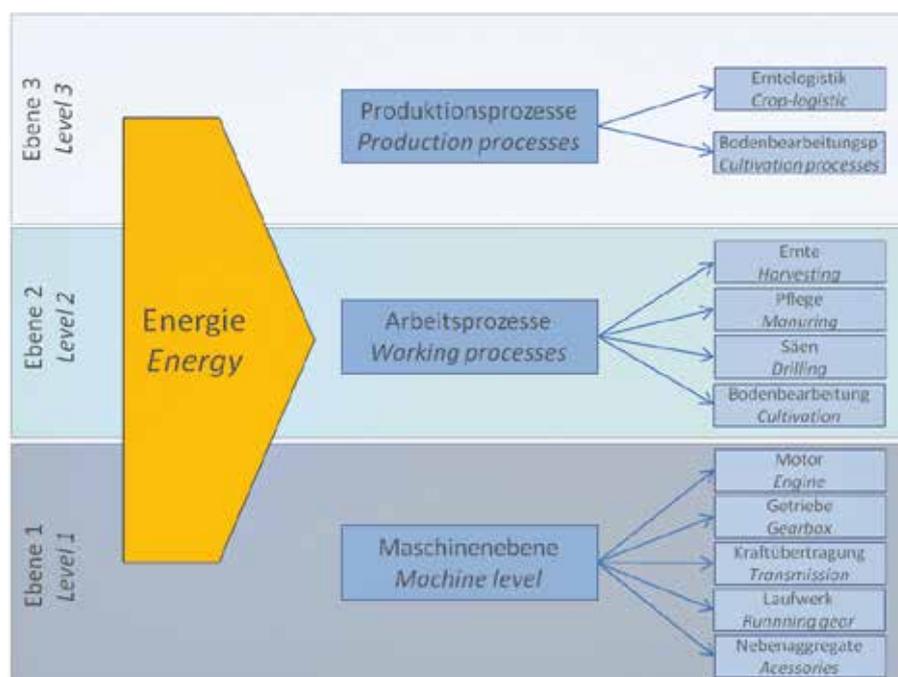
production chains in agriculture. In the course of this research, a practical, holistic and process-oriented analysis of agriculture machine data was accomplished, so system-wide savings, such as machine overpowering up to 119 kW as well as high non-active/waiting-times in the harvest logistics have been identified. Furthermore the entire process chain of tillage, seedbed preparation and drilling have been analyzed, so the fuel-optimized process for the research farm could be worked out.

Die vorliegende Forschungsarbeit war Teil des Projektes AgroMICoS, mit dem Fachgebiet Konstruktion von Maschinensystem der Technischen Universität Berlin als leitendem Projektpartner. Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Realisierung einer ganzheitlichen, prozessorientierten Informationsmanagementlösung mithilfe einer geeigneten und preiswerten Gerätetechnik sowie einer intelligenten, angepassten Softwarelösung. Ziel des hier vorgestellten Teilforschungsbereiches war es, die Energieströme bei der Getreideproduktion über einen gesamten Anbauzyklus zu erfassen und darauf aufbauend Kraftstoffeffizienzpotenziale abzuleiten.

In einem ersten Schritt musste dafür ein sinnvolles Schema entwickelt werden, anhand dessen sich die Energieströme nach Arbeits- und Produktionsprozessen sowie nach Maschinenkomponenten klassifizieren ließen (**Abbildung 1**).

Darauf aufbauend sollte identifiziert werden, wie viel Energie bei unterschiedlichen Feldarbeiten wie Bodenbearbeitung,

Abb. 1



Ebenen des Energieverbrauches

Fig. 1: Levels of energy consumption

Säen, Pflege und Ernte verbraucht wird. Ferner sollte herausgearbeitet werden, welchen Verbrauchsanteil einzelne Komponenten einer Maschine wie Motor, Getriebe, Nebenaggregate und Laufwerk aufweisen. Für eine aussagekräftige Bewertung sollte eine zusammenfassende Systembetrachtung erfolgen, denn ein sinkender Energieeinsatz in einem Bereich kann zu einem steigenden Energiebedarf in anderen Bereichen führen. Schließlich sollten CO₂-Einsparpotenziale bei Landmaschinen

abgeleitet und nach Umsetzbarkeit und Einsparmenge quantifiziert werden.

Versuchsdurchführung

Um die relevanten Landmaschinendaten auszuwerten, wurde die landwirtschaftlich selbstkonfigurierende Kommunikationsbox (LaSeKo-Box) auf einem Forschungsbetrieb eingesetzt (**Tabelle 1**) [1]. Sie wurde an der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Konstruktion von Maschinensystemen, mit dem Unternehmen LogicWay entwickelt.

Die LaSeKo-Boxen wurden auf fünf Traktoren und zwei Mähreschern des Forschungsbetriebes mit dem maschineninternen Datennetzwerk CAN-Bus vernetzt und an die Stromversorgung angeschlossen (**Abbildung 2**).

Sobald die Maschine gestartet wurde, speicherte die Forschungsbox auf einer SD-Karte die für die Analyse relevanten Daten, wie Kraftstoffverbrauch, Motordrehzahl, Motordrehmoment, Motorlast sowie GPS-Koordinaten, Zeit und Datum. Die Landmaschinen wurden über einen Zeitraum von eineinhalb Jahren mit den Forschungsboxen ausgestattet, sodass Daten von zwei Ernten und einem kompletten Bodenbearbeitungs-, Sä- und Pflegezyklus ausgewertet werden konnten.

Zur Aufbereitung, Filterung und Umwandlung der Daten wurde anschließend ein CAN-CSV-Editor auf Linux-Basis programmiert, zur automatisierten Aufbereitung und Visualisierung wurden mehrere Skripte in den Softwareprogrammen Diadem und Matlab geschrieben.

Vier unterschiedlich große Felder von 2 bis 40 ha mit ähnlichen externen Bedingungen wurden als Auswertungsfelder

Tab. 1

Daten Forschungsbetrieb (Stand Januar 2013)

Table 1: Information about research farm (January 2013)

Betriebsgröße Farm size	1400 ha
Ø Schlaggröße Ø Field size	24,66 ha
Höhe über N. N. Height above N. N.	30–68 m
Ø Jahrestemperatur ¹⁾ Ø annual temperature ¹⁾	7,7 °C
Niederschlag p.a. ¹⁾ Rainfall p. a. ¹⁾	797,4 mm
Bodenpunkte Ground points	30–70
Bodenklasse Ground class	Sand, Stark lehmiger Sand, Lehm, Ton Sand, heavy loamy sand, loam, clay

¹⁾ Deutscher Wetterdienst (DWD), Abteilung Agrarmeteorologie, Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung Braunschweig (ZAMF), www.dwd.de/mittelwerte.



Installierte LaSeKo-Box mit Steckdosen auf Traktor (Foto: C. v. Toll)
 Fig. 2: Installed LaSeKo-Box on tractor with plugs

bestimmt und näher analysiert. Dafür wurden verschiedene Diagramme entwickelt, um die Auswertung der Kraftstoffverbräuche und Maschinenauslastungen bei verschiedenen Arbeitsprozessen und Feldgrößen sowie Prozessabläufen zu veranschaulichen. Es konnte identifiziert werden, wie viel Energie bei den unterschiedlichen Feldarbeiten genutzt wurde und wie hoch der Gesamtverbrauch verschiedener Prozessketten war. Aus diesen Informationen konnten schließlich Kraftstoff bzw.

CO₂-Einsparpotenziale abgeleitet und nach Umsetzbarkeit und Einsparmenge quantifiziert werden.

Ergebnisse

Tabelle 2 fasst die konkreten Einsparpotenziale bei Traktoren im Hinblick auf die Maschinenauslegung auf dem Forschungsbetrieb zusammen. Aufgrund der vorherigen Analysen der Leistungsdiagramme und Lastbalken (**Abbildung 3** und **4**) sowie der Leistungsvergleiche – bei den Feldversuchen wurden bei einigen Arbeitsprozessen zwei Maschinen mit jeweils unterschiedlicher Leistung getestet und die Motordaten verglichen – wurde bewertet, ob die Zugmaschine über- oder untermotorisiert war. Außerdem wurde ermittelt, welche Leistung eingespart werden oder zusätzlich notwendig sein könnte.

Auf der Ebene der Arbeitsprozesse konnten bei sieben Maschinen auf dem Forschungsbetrieb konkrete CO₂-Einsparpotenziale herausgearbeitet werden. Bei fünf Prozessen konnten Übermotorisierungen der Zugmaschinen festgestellt werden, sodass sich 39 bis 119 kW an Maximalleistung einsparen ließe, was eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes zur Folge hätte. Bei den übrigen zwei Prozessen konnten Untermotorisierungen von 39 bis 45 kW an fehlender Maximalleistung identifiziert werden. Eine angepasste Leistung würde hier ebenfalls den CO₂-Ausstoß reduzieren [2].

Abbildung 3 und **4** veranschaulichen exemplarisch die Maschinendaten beim Düngen mit einem AGT-Streuer (Hersteller: Rauch). Es wird deutlich, dass die Zugmaschine fast ausschließlich eine Leistung unter 150 kW abrufen und 80 % der Gesamtarbeitszeit im Leerlauf (0–25 %) oder Teillastbereich (25–60 %) betrieben wurde. Die Maximalleistung bei 269 kW wurde nicht abgerufen, nur selten wurde eine Leistung über 150 kW genutzt. Die Zugmaschine war somit für diesen Arbeitsgang übermotorisiert, denn eine Maschine mit 150 kW Maximalleistung hätte das Düngestreuen mit gleichem Ergebnis erledigen kön-

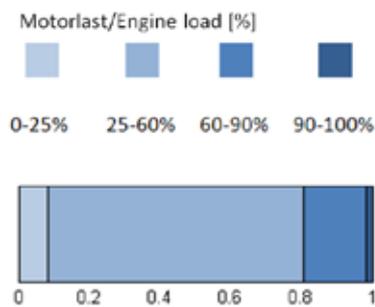
Tab. 2

Einsparpotenziale bei Maschinen- und Anbaugeräteauslegung

Table 2: Savings in machine- and farming unit design

Prozess Process	Leistung Traktor Power tractor	Bewertung Result	Einsparung/Zusatzleistung Reduction/additional power	Quelle Source
Kreiselegge, 6 m Arbeitsbreite Harrow, 6 m working width	239 kW	Übermotorisiert Overpowered	-59 kW	Leistungsdiagramm Power chart
Kreiselegge, 4 m Arbeitsbreite Harrow, 4 m working width	239 kW	Übermotorisiert Overpowered	-89 kW	Lastbalken, Leistungsvergleich Load bar, power comparison
Drillmaschine, 6 m Arbeitsbreite Seed drill, 6 m working width	224 kW	Untermotorisiert Underpowered	+45 kW	Lastbalken, Leistungsvergleich Load bar, power comparison
Düngerstreuer AGT, 36 m Arbeitsbreite Fertilizer spreader, 36 m working width	269 kW	Übermotorisiert Overpowered	-119 kW	Lastbalken, Leistungsdiagramm Load bar, power chart
Korntransport 2 x 18 t Grain transportation, 2 x 18 t	141 kW	Untermotorisiert Underpowered	+39 kW	Lastbalken, Leistungsdiagramm Load bar, power chart
Überladewagen 22 t Field trans trailer 22 t	239 kW	Übermotorisiert Overpowered	-39 kW	Lastbalken, Leistungsdiagramm Load bar, power chart
Pflug, 2 m Arbeitsbreite Plow, 2 m working width	239 kW	Übermotorisiert Overpowered	-89 kW	Lastbalken, Leistungsdiagramm Load bar, power chart

Abb. 3



Motorlastbalken beim Arbeitsprozess Düngerstreuen auf 10-ha-Schlag, Traktor-Nennleistung: 261 kW
 Fig. 3: Engine load bar for fertilizer spreading on 10 ha field, tractor power: 261 kW

nen. Auf dem Forschungsbetrieb könnten beim Düngen somit zukünftig 44,2 % Leistung oder 119 kW weniger eingesetzt werden, was einen geringeren Kraftstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß zur Folge hätte.

Auf der Ebene des Produktionsprozesses wurden zuerst alle denkbaren Prozessketten und die dazugehörigen Verbräuche von Stoppel- und Grundbodenbearbeitung über Saatbettbereitung bis hin zum Drillen erfasst (**Abbildung 5**). Anhand der erhobenen Verbrauchsdaten konnte somit der Bodenbearbeitungs- und Drillprozess mit dem geringsten Kraftstoffverbrauch berechnet werden (**Abbildung 5**, Szenario 2).

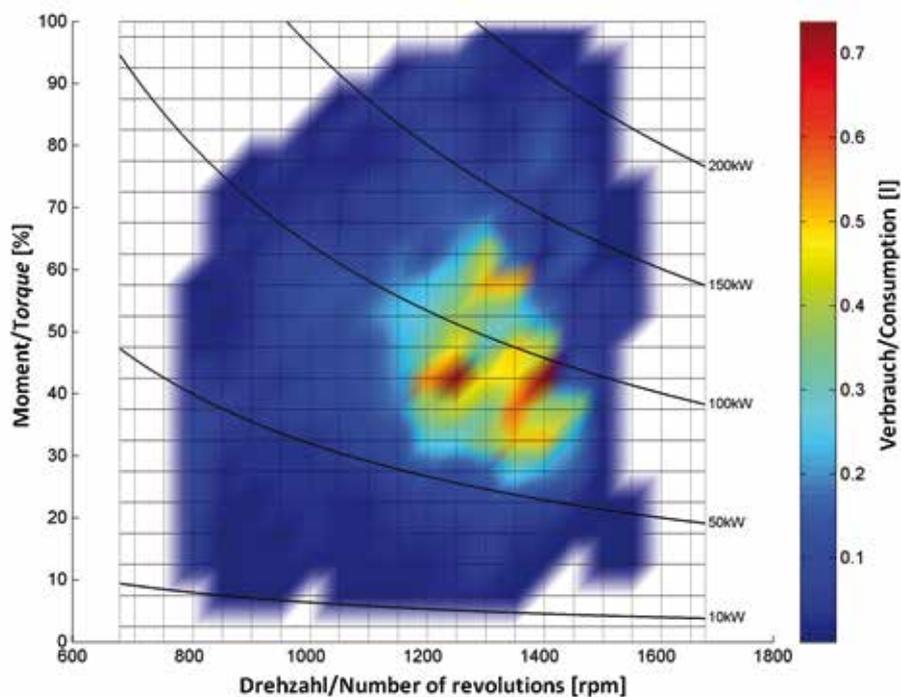
Gleichzeitig konnte eine alternative Prozesskette ermittelt werden, die einen hohen Bodenauflockerungs- und Vermengungsprozess bei möglichst geringem Kraftstoffverbrauch aufweist (**Abbildung 5**, Szenario 14).

Des Weiteren wurde die gesamte Erntelogistik des Forschungsbetriebes analysiert und im Hinblick auf weitere Einsparpotenziale untersucht. Mithilfe der Daten aus Drehzahl und GPS konnten die Standzeiten der verschiedenen an der Ernte beteiligten Fahrzeuge (zwei Mähdrescher mit 9- und 11,5-m-Schneidwerk, Überladewagen 18 t, zwei Kornzüge je 2 x 18 t) ermittelt werden. Dabei stellte sich heraus, dass der Überlade- sowie die beiden Kornwagen hohe Standzeiten aufwiesen. Wenn diese Standzeiten auf dem Forschungsbetrieb eliminiert werden, etwa durch eine alternative Logistikkette, so können allein dadurch Kraftstoffeinsparungen von bis zu 6,65 l (Überladewagen auf 40-ha-Feld) oder 8,83 l (Kornwagen auf 40-ha-Feld) erzielt werden. Eine sinnvolle Alternative wäre auch eine Start-Stopp-Automatik bei Landmaschinen.

Außerdem wurden alternative Getreidetransportmöglichkeiten mit zwei Muldenkippern analysiert. Es stellte sich heraus, dass die zwei Mulden auf dem untersuchten Feld einen Mehrverbrauch von 1,65 l pro Zyklus im Vergleich zu dem Prozess mit Überladewagen und zwei Zügen aufwiesen (**Abbildung 6**).

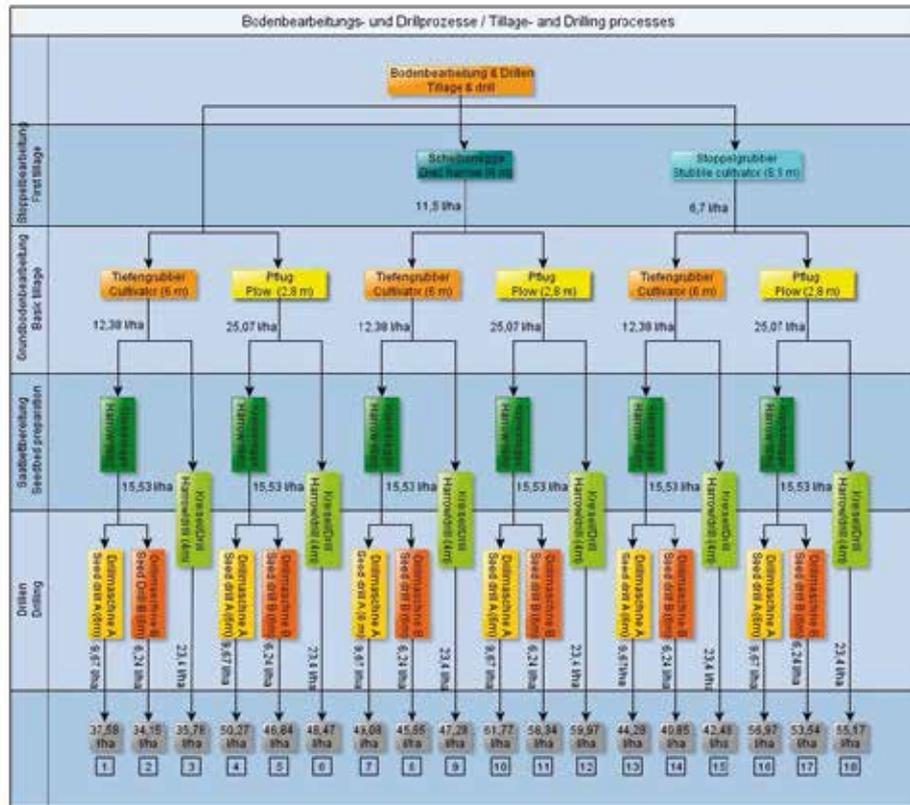
Gleichzeitig konnte festgestellt werden, dass sich diese Differenz unter Berücksichtigung der transportierten Tonnen sogar noch erhöht. Der Mehrverbrauch pro bewegte Tonne be-

Abb. 4



Leistungsdiagramm beim Arbeitsprozess Düngerstreuen auf 10-ha-Schlag, Traktor-Nennleistung: 261 kW
 Fig. 4: Power chart for fertilizer spreading on 10 ha field, tractor power: 261 kW

Abb. 5



Prozessketten Bodenbearbeitung und Drillen
 Fig. 5: Process chains tillage and drilling

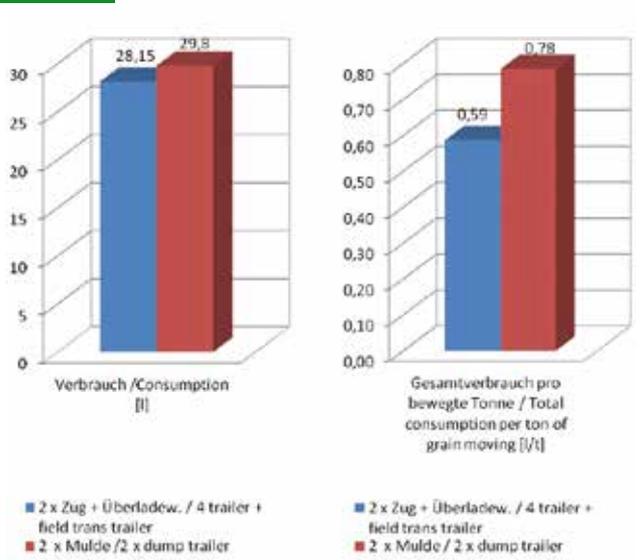
trägt hier 32 Prozent (Basiswert: Verbrauch Überladewagen einschließlich Züge). Auf dem Forschungsbetrieb ist daher bei Feldern mit weiten Entfernungen zum Silo die Erntekette mit Überladewagen und Zügen zu bevorzugen. Bei Feldern mit

kurzen Anfahrtswegen nehmen die Standzeiten der Züge stark zu, sodass sich bei diesen der Einsatz von Mulden anstelle von Überladewagen und Zug rechnen und Verbrauchseinsparungen generieren würde [2].

Auf der Ebene der Maschinen wurde auf Basis von Literaturdaten ein vereinfachtes Kalkulationsmodell entwickelt, mit dem sich die Verbrauchsanteile der Maschinenkomponenten berechnen ließen [3; 4]. Es wurde dabei deutlich, dass auch in Zukunft die Verluste durch Abwärme sowie durch den Laufwerkwirkungsgrad minimiert werden müssen.

Schließlich konnte aus den erhobenen Maschinendaten in Verbindung mit den Betriebsdaten des Forschungsbetriebes der Mittelwert des Verbrauchs und des CO₂-Ausstoßes pro Tonne Getreide auf den vier Forschungsfeldern berechnet werden. Im betrachteten Getreideproduktionszyklus 2011 und 2012 wurden pro Tonne Getreide 14,79 Liter verbraucht und 39,2 kg CO₂ ausgestoßen.

Abb. 6



Vergleich Prozesskette Überladewagen und Zug mit Mulde
 Fig. 6: Comparison grain transportation

Schlussfolgerungen

Landwirte müssen in Zukunft beim Ankauf von Traktoren den Leistungsbedarf der Maschine sehr kritisch analysieren und betrachten. Die Auslegung der Maschine am leistungsintensivsten Arbeitsprozess auf dem Betrieb kann aufgrund der hohen Anschaffungskosten und des zusätzlichen Kraftstoffverbrauchs sehr teuer werden. Die vorliegende Analyse hat gezeigt, wie

Anspruch und Wirklichkeit des Leistungsbedarfs verschiedener Arbeitsprozesse auseinanderklaffen können. Gleichzeitig können die vorliegende Analyse und die Diagramme einen sinnvollen Auswertprozess darstellen, mit dessen Hilfe Landwirte den tatsächlichen Leistungsbedarf eines Arbeitsprozesses auf ihrem Betrieb identifizieren und darauf aufbauend eine Kaufentscheidung ableiten könnten. Darüber hinaus wäre es denkbar, dass zukünftig ein ausgereiftes Modell der vorliegenden Forschungseinrichtung sowie die gewonnenen Erkenntnisse aus der Forschung für die Optimierung der Prozessketten im Getreideanbau, insbesondere bei der Erntelogistik, eingesetzt werden könnten.

Die erhobenen Praxisdaten sowie die daraus gewonnenen Erkenntnisse können somit Denkanstoß und Referenzwert für zukünftige Optimierungsstrategien sein. Dabei lässt sich die Forschungsbox LaSeKo mit den entwickelten Auswertalgorithmen als Monitoring-Tool nutzen. Denn die Identifikation von CO₂-Einsparpotenzialen bei Landmaschinen sowie konkrete Maßnahmen zur Umsetzung werden in Zukunft noch an Relevanz gewinnen.

Literatur

- [1] Informations-Homepage zum Projekt landwirtschaftlich selbstkonfigurierende Kommunikationsbox LaSeKo-Box (2009): www.laseko.de, Zugriff am 23.7.2013
- [2] v. Toll, C. (2013): Energieorientierte Analyse der Landmaschinentechnik – Untersuchung zur maschinenrelevanten Energiebilanzierung in der Getreideproduktion mit Erfassung von CO₂-Einsparpotenzialen. Dissertation, TU Berlin, noch nicht veröffentlicht
- [3] Renius, K. (1987): Traktoren: Technik und ihre Anwendung. München, S. 51ff.
- [4] Käsler, R.; Stingl, K. (2008): Rückgewinnung potentieller Energie in der Mobilhydraulik“. 5. Kolloquium Mobilhydraulik, 16.–17.10.2008, Karlsruhe, S. 6 f.

Autoren

Dipl.-Ing. Christian von Toll ist Promotionsstipendiat der Stiftung der deutschen Wirtschaft und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Konstruktion von Maschinensystemen (Leiter: **Prof. Dr.-Ing. Henning J. Meyer**) der Technischen Universität Berlin, Straße des 17. Juni 144, 10623 Berlin, E-Mail: cvontoll@km.tu-berlin.de