

Patrick Rößler, Timo Kautzmann und Marcus Geimer

Online parametrierbare Traktor-Gerätemodelle

Zur ganzheitlichen Optimierung des Kraftstoffverbrauchs von Traktoren werden Gerätemodelle benötigt, die das Verhalten von Zugkraft- und Drehmomentanforderung bei gegebenen Betriebsparametern beschreiben. Die Parametrierung vorhandener Modelle ist dabei in der Regel online, d. h. auf dem Feld, nicht möglich, da Geräte- und Bodenparameter oftmals nur schwer messbar sind und letztere stark variieren. In diesem Artikel wird zur Lösung des Problems ein clusterbasierter Ansatz vorgestellt. Durch die kontinuierliche Aufnahme situationsbezogener Messdaten und die Zuordnung zu einem Cluster werden unterschiedliche Geräte- und Bodeneigenschaften charakterisiert. Mittels Clusterschwerpunkt wird dadurch eine gemittelte Situationsbeschreibung zur Parametrierung der Modelle geliefert. Dazu müssen vereinfachende Modellannahmen getroffen werden, die ebenfalls vorgestellt werden. Betrachtet werden die Anbaugeräte aus dem DLG-PowerMix.

Schlüsselwörter

Empirische Modellbildung, Anbaugerät, Online-Optimierung, DLG-PowerMix

eterize the models. Therefore simplifying model assumptions have to be done which are also presented. The implements mentioned at DLG-PowerMix are considered.

Keywords

Empirical Modeling, implement, online optimization, DLG-PowerMix

Abstract

Rößler, Patrick, Kautzmann, Timo and Geimer, Marcus

Online configurable tractor implement models

Landtechnik 67 (2012), no. 4, pp. XX-XX, 3 figures, 12 references

In order to optimize fuel consumption of tractors holistically, implement models are necessary which are able to describe the demand of draft and torque power at given operating parameters. Typically, existing models aren't able to fulfil parameterization online, i. e. during field operation, because implement and soil parameters are unknown and soil parameters vary strongly. In this article a cluster-based approach is proposed. To recognize different soils and implements, the continuous collection of situation-based measurement data and their assignment to a cluster is used. The cluster center is used for a quantification of the average situation to param-

Der Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) am Karlsruher Institut für Technologie, untersucht derzeit eine neuartige Steuerungsarchitektur, um mittels ganzheitlicher Optimierung den Wirkungsgrad von Traktoren zu steigern [1]. Da sich die Effizienz von Traktoren insbesondere durch das Anbaugerät bestimmt, muss der ganzheitliche Ansatz das Verhalten des Geräts mit berücksichtigen. Unter Variation der Betriebsparameter müssen somit Modelle entwickelt werden, die, ausgehend vom momentan gemessenen Zustand, Aussagen zum Leistungsbedarf an der Anhängervorrichtung und an der Zapfwelle liefern. Die hydraulische Leistung soll in diesem Zusammenhang unberücksichtigt bleiben, da diese in den hier betrachteten Fällen relativ gering ist und nur Stellfunktionen realisiert. Zur Ermittlung der benötigten Informationen soll auf im Traktor vorhandene oder einfach zu integrierende Sensorik zurückgegriffen werden. Es werden die im DLG-PowerMix erwähnten Geräte Grubber, Pflüge, Kreiseleggen, Mähwerke, Miststreuer und Ballenpressen betrachtet, mit Schwerpunkt auf der Bodenbearbeitung.

Problemstellung und Lösungsansatz

Die Zielsetzung legt die Verwendung empirischer Modelle zur Vorhersage von Zug- und Drehleistung nahe, die hier ausschließlich betrachtet werden. Empirische Modelle besitzen im Allgemeinen drei Parametergruppen:

■ **Betriebsparameter:** Die maßgeblichen Betriebsparameter, also jene, die während der Fahrt definiert verändert werden können und Einfluss auf das Verhalten des Geräts im Hinblick auf Zug- und Zapfwellenleistung haben, sind Geschwindigkeit v , Zapfwellendrehzahl n_{ZW} und Bearbeitungstiefe t_{EHR} . Diese Parameter dienen der Optimierung des Gesamtsystems.

■ **Geräteparameter:** Geräteparameter sind konstruktiv bedingt und, anders als die Betriebsparameter, in der Regel während des Betriebs nicht veränderbar.

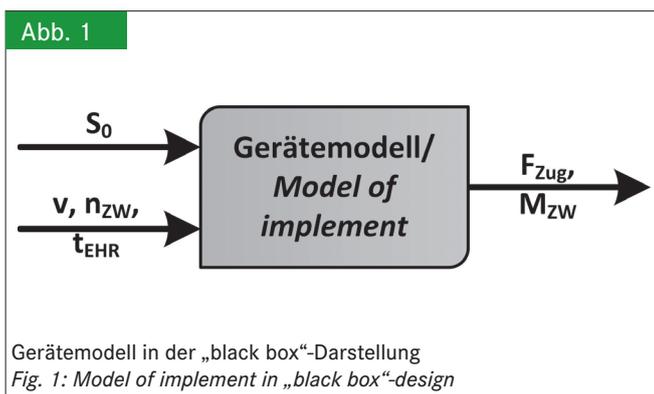
■ **Bodenparameter:** Bodenparameter wie Bodenart, Bodenfeuchte und Bodendichte unterliegen gewöhnlich starken Schwankungen auch innerhalb eines Schlages und sind schwer kontinuierlich messbar.

Aus der Zielsetzung resultiert die Problemstellung, dass unter der Vorgabe der Betriebsparameter die Geräte- und Bodenparameter mithilfe aktuell gemessener einfacher Sensorsignale bestimmt werden müssen. Problematisch ist, dass insbesondere die Bodenparameter schwer zu messen sind und lokal stark schwanken, sodass diese zur Parametrierung der Gleichungen unbrauchbar sind.

Der verwendete Lösungsansatz gebraucht einen Clustering-Algorithmus. Dieser ordnet aktuell gemessene situationsbeschreibende Werte wie Zugkraft F_{Zug} , Drehmoment an der Zapfwelle M_{ZW} , Geschwindigkeit v , Zapfwellendrehzahl n_{ZW} und Bearbeitungstiefe t_{EHR} als Wertetupel in ein Cluster ein [2]. Ähnliche Werte werden auf diese Weise demselben Cluster zugeordnet. Der Schwerpunkt S_0 des Clusters, bestehend u. a. aus $F_{Zug,0}$, $M_{ZW,0}$, v_0 , $n_{ZW,0}$ und $t_{EHR,0}$ ist ein gemittelter Wertetupel. Dadurch können verschiedene Böden und Geräte unterschieden werden. Dieser Schwerpunkt wird herangezogen, um sowohl Boden- als auch Geräteparameter von bekannten empirischen Modellen zu bestimmen. Dazu werden Parameterabhängigkeiten ermittelt und -vereinfachungen getroffen. So können wie in **Abbildung 1** mittels eines einzigen vorliegenden Clusterschwerpunkts S_0 alle unbekannt Parameter bestimmt werden.

Modellierung

Im Folgenden werden die verwendeten Modelle für die im DLG-PowerMix zum Einsatz kommenden Geräte vorgestellt.



Grubber

Das Modell für Grubber wird ausgehend vom ASAE-Standard D497.4 [3] aufgebaut. Folgende Formel kann zur Berechnung der erforderlichen Zugkraft unterschiedlicher Anbaugeräte verwendet werden:

$$F_{Zug} = S \cdot (A + B \cdot v + C \cdot v^2) \cdot b \cdot t_{EHR} \quad (\text{Gl. 1})$$

S: Bodenparameter

A, B, C: Geräteparameter

b: Arbeitsbreite

Für nicht wendende Bodenbearbeitungsgeräte wird laut ASAE-Standard C zu null. Im Gegensatz zum ASAE-Standard wird eine zum Quadrat der Arbeitstiefe proportionale Zugkraft angenommen. Damit wird der in [4, 5] beschriebene, progressive Anstieg der Zugkraft mit der Arbeitstiefe berücksichtigt.

Bei der Betrachtung der im ASAE-Standard für verschiedene Geräte der nicht wendenden Bodenbearbeitung angegebenen Werte für A und B fällt auf, dass das Verhältnis $q = A/B = 20$ dieser beiden Parameter zueinander konstant mit einer maximalen Abweichung kleiner 10 % ist. Damit kann A als Funktion von B dargestellt werden, wodurch A eliminiert wird. Dies führt zu folgendem Zusammenhang:

$$F_{Zug} = S \cdot (B \cdot q + B \cdot v) \cdot b \cdot t_{EHR}^2 \quad (\text{Gl. 2})$$

Alle verbleibenden unbekannt GröÙen lassen sich somit zu einem Parameter $X = S \cdot B \cdot b$ zusammenfassen. Zur Anpassung des Modells an den momentanen Betriebszustand muss dementsprechend lediglich ein Parameter bestimmt werden. Dieser kann anhand des momentanen Wertes von S_0 berechnet werden:

$$X = \frac{F_{Zug,0}}{(q+v_0) \cdot t_{EHR,0}^2} \quad (\text{Gl. 3})$$

Pflüge

Das Modell für Pflüge basiert ebenfalls auf dem ASAE-Standard D497.4. Der gerätespezifische Parameter B ist null. Die Formel wird auch hier so modifiziert, dass die Zugkraft als proportional zum Quadrat der Arbeitstiefe angenommen wird. Dies berücksichtigt Ergebnisse aus [6] und [7]. Analog zu dem Modell für Grubber wird der Parameter A eliminiert, indem ein konstantes Verhältnis $q = A/C = 130$ als Mittelwert verschiedener Pflugkörperperformen angenommen wird:

$$F_{Zug} = S \cdot (C \cdot q + C \cdot v^2) \cdot b \cdot t_{EHR}^2 \quad (\text{Gl. 4})$$

Die unbekannt GröÙen lassen sich wiederum zu einem Parameter $X = S \cdot C \cdot b$ zusammenfassen, und vergleichbar wie bei den Grubbern bestimmen.

Kreiseleggen

Bernacki [8] beschreibt die Berechnung der spezifischen Arbeit von rotierenden Maschinen. Die Arbeit, die während einer Umdrehung der Werkzeugsätze geleistet wird, bezogen auf das bearbeitete Volumen, kann demnach in folgender Form dargestellt werden:

$$w = c_0 k + a_u v_u^2 \quad (\text{Gl. 5})$$

k: Bodenparameter

c_0, a_u : Geräteparameter

v_u : Umfangsgeschwindigkeit der Werkzeuge

Über den dargestellten Ansatz ergibt sich nach einigem Umformen das berechnete Zapfwellen-Drehmoment:

$$M_{ZW} = \frac{bt_{EHR}v}{2\pi} \left(\frac{c_0 k}{n_{ZW}} + \frac{4\pi^2 R_{Rotor}^2 a_u n_{ZW}}{i^2} \right) \quad (\text{Gl. 6})$$

R_{Rotor}, i, b : Geräteparameter

Der folgende Ansatz zum Vereinfachen der Gleichung geht davon aus, dass der Bodenparameter k einen ein-eindeutigen Einfluss auf die Zugkraft-Schlupf (μ - σ)-Kennlinie am Reifen hat. Unter der Voraussetzung, dass sich der Fahrzustand des Traktors im stabilen Bereich links vom Traktionsmaximum μ_{max} befindet, gilt in Abhängigkeit des Bodens ein etwa konstantes Verhältnis $c = \mu/\sigma$ zwischen Zugkraft und Schlupf. Durch die Onlinebestimmung von c können Abschätzungen über den Boden und somit über den Bodenparameter k gemacht werden.

Zur Bestimmung von c_0 und b wird folgende grundsätzliche Überlegung angestellt: Für die Zerkleinerung der Erdschollen wird pro Bodenvolumen eine bestimmte Energie benötigt. Unterschiedliche Geräte mit rotierenden Werkzeugen müssen etwa die gleiche spezifische Arbeit bereitstellen, um ein ähnliches Arbeitsergebnis - in Form der Bodenzerkleinerung - zu erzielen. Den Zusammenhang zwischen dieser spezifischen Arbeit und der Werkzeug-Umfangsgeschwindigkeit wird in [8] beschrieben. Die Parameter c_0 und b werden so gewählt, dass eine möglichst genaue Übereinstimmung der anhand des Modells berechneten und der von [8] dargestellten spezifischen Arbeit vorliegt.

Die verbleibenden unbekanntenen Größen R_{Rotor}, a_u und i werden zum Parameter

$$X = a_u \frac{4\pi^2 R_{Rotor}^2}{i^2} \quad (\text{Gl. 7})$$

zusammengefasst und ähnlich zuvor anhand von S_0 berechnet.

Es besteht weiter ein Zusammenhang zwischen Zapfwellen- und Zugleistung, abhängig von der Fahrgeschwindigkeit und der Umfangsgeschwindigkeit der Werkzeuge. Bernacki [8] beschreibt dies unter Verwendung eines gerätespezifischen Para-

mers c_x . Darauf aufbauend wird die Zugkraft näherungsweise in Abhängigkeit des Drehmoments berechnet:

$$F_{Zug} = \frac{c_x i}{R_{Rotor}} M_{ZW} \quad (\text{Gl. 8})$$

Auch hier können die unbekanntenen Größen zu

$$X = \frac{c_x i}{R_{Rotor}} \quad (\text{Gl. 9})$$

zusammengefasst und analog wie zuvor berechnet werden.

Mähwerke

Als Grundlage für die folgenden Modelle dient die Berechnung der Zapfwellenleistung (P_{ZW}) laut ASAE-Standard EP496.2 [9]:

$$P_{ZW} = A + B \cdot b + C \cdot f \quad (\text{Gl. 10})$$

A, B, C: Geräteparameter

f: Geförderte Masse pro Zeiteinheit, Durchsatz

Bei Mähwerken werden nach ASAE Standard A und C zu null. Für das erforderliche Drehmoment an der Zapfwelle folgt:

$$M_{ZW} = \frac{B \cdot b}{2\pi \cdot n_{ZW}} \quad (\text{Gl. 11})$$

B und b werden zusammengefasst zu

$$X = \frac{B \cdot b}{2\pi} \quad (\text{Gl. 12})$$

und ähnlich wie zuvor berechnet.

Miststreuer

Auch bei Miststreuer werden nach ASAE Standard A und B zu null. Es wird angenommen, dass die ausgebrachte Stallungsmenge pro Fläche durch eine entsprechende geräteinterne Regelung konstant gleich c gehalten wird. Damit ist der Massenstrom f proportional zu der Fahrgeschwindigkeit. Das Drehmoment kann demnach in folgender Form berechnet werden:

$$M_{ZW} = c \frac{v}{n_{ZW}} \quad (\text{Gl. 13})$$

Der unbekannte Parameter $X = c$ wird ähnlich wie zuvor berechnet.

Ballenpressen

Bei Ballenpressen entfällt der von der Arbeitsbreite abhängige Term. Da der Parameter A laut ASAE-Standard D497.4 für verschiedene Pressen nur sehr kleine Werte annimmt (maximal 4 kW), wird dieser vernachlässigt. Bei der Berechnung

des Drehmoments wird näherungsweise von einer konstanten Dichte ρ_s und einer konstanten Querschnittsfläche A_s der Schwade ausgegangen:

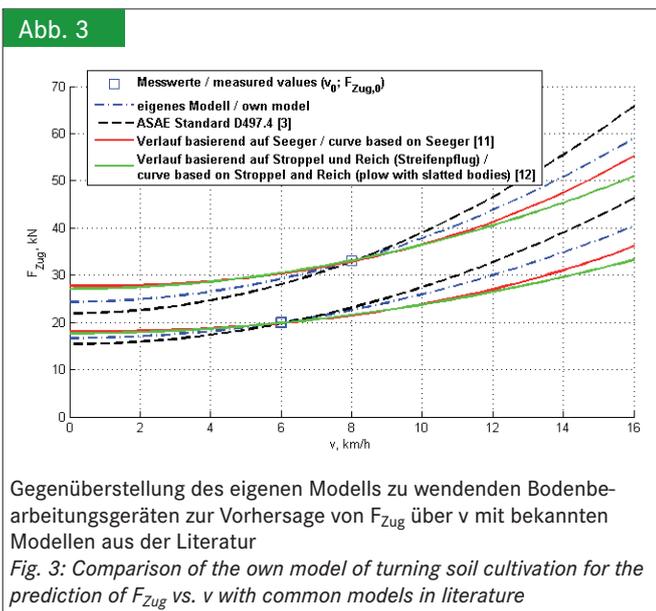
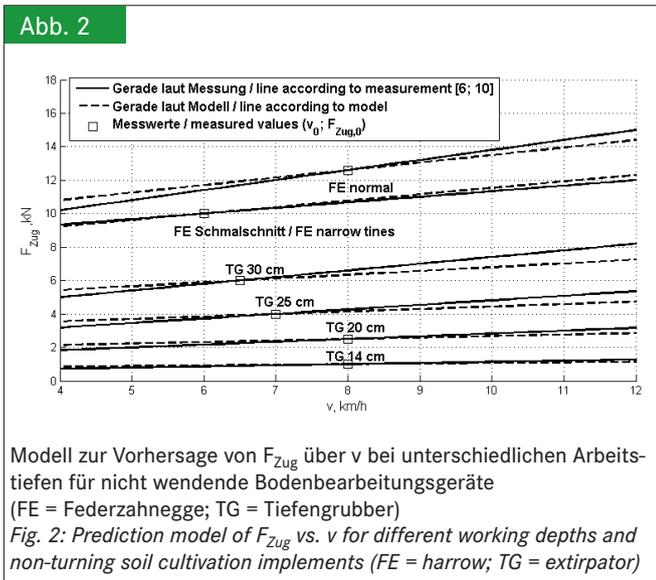
$$M_{ZW} = \frac{C \cdot \rho_s \cdot A_s \cdot v}{2\pi \cdot n_{ZW}} \quad (Gl. 14)$$

Die unbekanntenen Größen werden wiederum zu

$$X = \frac{C \cdot \rho_s \cdot A_s}{2\pi} \quad (Gl. 15)$$

zusammengefasst und analog wie zuvor berechnet.

Bei Miststreuern und Ballenpressen muss eine Zugkraft zur Überwindung des Rollwiderstands aufgebracht werden. Dieser wird als konstant angenommen. Auch bei Mähwerken wird eine Widerstandskraft ausgeübt, die ebenfalls als konstant angenommen wird.



Ergebnisse

In **Abbildung 2** und **Abbildung 3** sind Ergebnisse der entwickelten Modelle für wendende und nicht wendende Bodenbearbeitungsgeräte bei reiner Zugleistung, verglichen mit den Messwerten und den Modellen aus der Literatur, dargestellt.

Schlussfolgerungen

Mithilfe der Online-Parametrierung der Gerätemodelle werden bei kleinen Variationen der Betriebsparameter um den gemessenen Zustand gute Vorhersagen für die zu erwartende Zugkraft und das Drehmoment erzielt. Diese Aussage stützt sich auf validierte Ergebnisse anhand gemessener Werte und validierter Modelle aus der Literatur. Ein Grund dafür ist, dass für Geräte gleicher Art weitgehend gleiche qualitative Zusammenhänge zwischen Zugkraft bzw. Drehmoment und den Betriebsparametern gültig sind. Dadurch kann das Verhalten von vielen verschiedenen Geräten anhand weniger Modelle simuliert werden. Schlussfolgernd wird durch die Berücksichtigung der momentanen Situation in Form des Clusterschwerpunkts eine Anpassung der Modelle an die vorliegenden Geräte- und Bodenparameter ermöglicht. Ein dementsprechend parametrisiertes Modell kann ausgehend vom momentanen Zustand realistische Vorhersagen für einen theoretischen zukünftigen Zustand mit veränderten Betriebsparametern liefern.

Literatur

- [1] Kautzmann, T.; Wünsche, M.; Geimer, M.; Mostaghim, S.; Schmeck, H. (2011): Holistic Optimization of Tractor Managements. Land.Technik AgEng 2011, VDI, 11.-12. November 2011, Hannover, pp. 275-280
- [2] Schmeck, H.; Mostaghim, S.; Wünsche, M.; Geimer, M.; Kautzmann, T. (2011): Organic Computing in mobilen Arbeitsmaschinen. Mobile Machines - Sicherheit und Fahrerassistenz für Arbeitsmaschinen. Hanser-Verlag, 29.-30. März 2011, Karlsruhe
- [3] American Society of Agricultural Engineers (2003): ASAE-Standard D497.4 Agricultural Machinery Management Data, St. Joseph, Michigan, USA
- [4] Gebresenbet, G. (1991): Analysis of Forces Acting on Mouldboard Ploughs and Seed Drill Coulters in Relation to Speed, Depth and Soil Conditions. PhD Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala
- [5] Getzlaff, G. (1953): Vergleichende Untersuchungen über die Kräfte an Normpflugkörpern. Grundlagen der Landtechnik 5, S. 16-35
- [6] Reich, R. (1980): Einfluss verschiedener Betriebs- und Konstruktionsparameter auf die Kräfte am Tiefengrubber. Dissertation, Universität Hohenheim
- [7] Reich, R. (1977): Bodenwiderstand und Arbeitseffekt eines Grubberwerkzeugs. Grundlagen der Landtechnik 27(4), S. 128-132
- [8] Bernacki, H. (1972): Bodenbearbeitungsgeräte und -maschinen. Berlin, VEB Verlag Technik
- [9] American Society of Agricultural Engineers (1999): ASAE-Standard EP496.2 DEC99 Agricultural Machinery Management, St. Joseph, Michigan, USA
- [10] Reich, R. (1978): Messung der Kräfte zwischen Schlepper und Gerät. Grundlagen der Landtechnik 28(4), S. 156-159
- [11] Seeger, J. (2001): Antriebsstrangstrategien eines Traktors bei schwerer Zugarbeit. Dissertation, Technische Universität Braunschweig
- [12] Stroppel, A.; Reich, R. (1983): Untersuchungen an Pflügen mit Streifenstreichblechen. Landtechnik 33(2), S. 49-52

Autoren

Cand.-Ing. Patrick Rößler ist Diplomand, **Dipl.-Ing. Timo Kautzmann** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer** ist Leiter des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik, Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen, am Karlsruher Institut für Technologie, Rintheimer Querallee 2, 76131 Karlsruhe, E-Mail: Timo.Kautzmann@kit.edu, E-Mail: marcus.geimer@kit.edu