

Thomas de Witte

Wirtschaftliche Perspektiven autonomer Kleinmaschinen im Ackerbau

Economic perspectives of small
autonomous machines
in arable farming

95

Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten wurden immer größere und leistungsfähigere Landmaschinen entwickelt und eingesetzt. Haupttreiber dieser Entwicklung sind Kostenvorteile, die sich beim Einsatz größerer Maschinen insbesondere im Bereich der Lohnkosten ergeben. Die Tendenz hin zu immer größeren Maschinen führt jedoch zu negativen Begleiterscheinungen, beispielsweise zunehmendem Bodendruck oder größeren einheitlichen Flächenstrukturen. Der technische Fortschritt im Bereich der Automatisierung bietet die Möglichkeit neue Produktionssysteme zu entwickeln, in denen kleine autonome Maschinen eingesetzt werden. Die Kalkulation der Arbeitserledigungskosten von sehr großen und kleinen Maschinenkombinationen für die Getreideernte und Bodenbearbeitung zeigt, dass Kleinmaschinen ohne die Berücksichtigung von Lohnkosten für weniger kapitalintensive Verfahren, wie der Bodenbearbeitung oder Aussaat, künftig wettbewerbsfähig werden können. Für die Ernte müssen jedoch voraussichtlich andere Maschinenkonzepte entwickelt werden, damit Kleinmaschinen wettbewerbsfähig werden können. Insgesamt wird die Rentabilität von Pflanzbausystemen mit autonomen Landmaschinen künftig wesentlich stärker durch potentielle Ertragssteigerungen und Betriebsmitteleinsparungen bestimmt werden als durch eingesparte Lohnkosten.

Stichwörter: Skaleneffekte, Arbeitserledigungskosten, autonomes Fahren, Landtechnik, Kleinmaschinen

Abstract

In recent decades, larger and more powerful agricultural machinery has been developed and used. The main drivers of this development are the cost advantages that arise when using larger machines, especially for labor costs. However, the trend towards larger machines leads to negative side effects, such as increasing ground pressure and decreasing biodiversity. The technical progress in the field of automation offers the possibility to develop new production systems in which small autonomous machines are used. The operating cost of very large and small machine combinations for grain harvesting and tillage indicate that small machinery can become competitive for less capital-intensive processes such as tillage or seeding if labor costs are not considered. However, it is likely that other machine concepts will have to be developed for the harvest, so that small machines can become competitive. Overall, the profitability of cropping systems with autonomous agricultural machinery in future will be much more determined by potential yield increases and resource savings than by saved labor costs.

Key words: Economies of scale, operating cost, autonomous driving, agricultural engineering, small scale machinery

Einleitung

Die Entwicklung der Agrartechnik begann bereits vor mehr als 10.000 Jahren als Menschen zunächst mit ein-

Institut

Thünen-Institut, Institut für Betriebswirtschaft, Braunschweig

Kontaktanschrift

Dr. Thomas de Witte, Thünen-Institut, Institut für Betriebswirtschaft, Bundesallee 63, 38116 Braunschweig,
E-Mail: thomas.dewitte@thuenen.de

Zur Veröffentlichung angenommen

11. März 2019

fachen Werkzeugen ihre Arbeit erleichterten und anschließend Tiere einsetzten, um den menschlichen Arbeitskräftebedarf weiter zu reduzieren. Durch die Nutzung von Verbrennungsmotoren ist der Einsatz mechanischer Maschinen seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts rasant angestiegen. Seither sind die eingesetzten Traktoren und Maschinen stetig größer geworden. In den letzten 50 Jahren kam es zu einem sehr starken Leistungswachstum von landwirtschaftlichen Maschinen. Die Leistung der jeweils verfügbaren größten Mähdreschermodelle hat sich seit 1960 von 40 kW auf über 450 kW mehr als verzehnfacht. Gleichzeitig ist auch das Gesamtgewicht stark angestiegen. Während ein Mähdrescher in den 60er Jahren mit vollem Korntank etwa 5 Tonnen wog, wiegen heutige Mähdrescher mit vollem Korntank mehr als 30 Tonnen. Das Leistungsgewicht, welches das Leergewicht mit der Leistung ins Verhältnis setzt, hat sich jedoch etwa halbiert (CLAAS, 2019a). Dies verdeutlicht die zunehmende Effizienz größerer Maschinen. Bei Traktoren verlief die Entwicklung ähnlich. Hier ist die durchschnittliche Größe zugelassener Schlepper zwischen 1970 und 2010 von 32 kW auf 94 kW gestiegen, was etwa einer Verdreifachung der Leistung entspricht (VDMA, 2015).

Zentraler Treiber dieser Entwicklung sind Kostenvorteile (economies of scale), die durch den Einsatz größerer Maschinen entstehen. Insbesondere in Industrieländern mit hohen Lohnkosten haben Landwirte in der Vergangenheit sehr stark Arbeit durch Kapital ersetzt (BLACKMORE et al., 2009; FOUNTAS et al., 2010; SHOCKLEY et al., 2019).

Allerdings werden vermehrt auch Nachteile der Entwicklung hin zu immer größeren Landmaschinen genannt:

- Größere Maschinen benötigen größere Flächenstrukturen, um einen effizienten Einsatz zu ermöglichen. In der umweltpolitischen Diskussion bezüglich der abnehmenden Biodiversität werden jedoch zunehmend kleinere und heterogenere Agrarstrukturen gefordert (RODRÍGUEZ und WIEGAND, 2009; ŠÁLEK et al., 2018).
- Größere Maschinen sind deutlich kapitalintensiver, sodass die Investitionen für moderne und schlagkräftige Maschinen nur von größeren Betrieben getragen werden können. Das treibt den Strukturwandel zugunsten größerer Betriebe, der in der gesellschaftspolitischen Diskussion über die moderne Landwirtschaft eher kritisch gesehen wird (FORBORD et al., 2014; ABSON, 2019).
- Das Ausfallrisiko und die damit verbundenen Kosten für zeitkritische Arbeitsprozesse, wie die Aussaat, steigen. Wenn ein Teil der Maschine ausfällt, muss der gesamte Arbeitsprozess unterbrochen werden, was erhebliche Terminkosten verursachen kann (FOUNTAS et al., 2010).
- Aufgrund des hohen Gewichts steigt das Risiko von Bodenverdichtungen (SIVARAJAN et al., 2018; BENNETT et al., 2019).

Gleichzeitig lässt es der technologische Fortschritt im Bereich der autonomen Mobilität und Sensortechnik im-

mer wahrscheinlicher erscheinen, dass künftig auch Arbeitsgänge in der Landwirtschaft von autonomen (führerlosen) Landmaschinen erledigt werden können. Aufgrund der hohen Bedeutung der Lohnkosten für die Größenentwicklung von Landmaschinen stellt sich die Frage, ob auf diese Weise die Entwicklung hin zu immer größeren Maschinen abgeändert werden kann und künftig die Feldarbeiten durch mehrere autonome Kleinmaschinen erledigt werden (GOENSE, 2005; BLACKMORE et al., 2009; FOUNTAS et al., 2010). Diese Entwicklungsoption wäre deshalb vielversprechend, weil damit einige der genannten negativen Begleiterscheinungen der Großmechanisierung überwunden werden könnten. Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieses Beitrages analysiert, wie sich die Arbeitserledigungskosten (AEK) für große und kleine Maschinenkombination in den Arbeitsverfahren Mähdrusch und Grubbern verändern, wenn in einem Szenario mit autonomen Landmaschinen keine Lohnkosten mehr berücksichtigt werden müssen.

Hierfür wird im nächsten Abschnitt zunächst eine Übersicht der bisherigen Literatur zur Wirtschaftlichkeit autonomer Landmaschinen gegeben. Anschließend werden die AEK für die genannten Arbeitsverfahren kalkuliert und Schlussfolgerungen aus den Analysen gezogen.

Wirtschaftlichkeit autonomer Landmaschinen

In mehreren Studien wurden Voraussetzungen für die Konzeption autonomer Kleinmaschinen und ihre potentielle Vorteile diskutiert. Das betraf insbesondere die höhere Flexibilität in der Anordnung von Pflanzen, die höhere Präzision bei der Ausbringung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln, eine bessere Befahrbarkeit der Flächen sowie ein geringeres Sicherheitsrisiko im Zuge der Automatisierung (BLACKMORE et al., 2005; PEDERSEN et al., 2006; BLACKMORE et al., 2009; FOUNTAS et al., 2010; SHOCKLEY et al., 2019).

Allerdings gibt es sehr wenige Arbeiten, die sich mit der Wirtschaftlichkeit autonomer Kleinmaschinen beschäftigt haben. PEDERSEN et al., 2006 analysieren anhand von Modellrechnungen die AEK von autonomen Prototypen zum Hacken von Zuckerrüben, zur Bonitur von Getreide sowie zum Mähen von Golfplätzen. Dabei gehen sie für die autonomen Maschinen von einer 24-stündigen Einsatzzeit aus und kommen zu dem Schluss, dass mit den autonomen Kleinmaschinen die o.g. Arbeiten günstiger erledigt werden können als mit den bisherigen Verfahren. In einer anschließenden Studie untersuchen die Autoren die Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren an unterschiedlichen Standorten und kommen zu ähnlichen Ergebnissen (PEDERSEN et al., 2007).

Anhand einer Kosten-Nutzen-Analyse wird die wirtschaftliche Machbarkeit für die Aus- und Nachsaat von Zuckerrüben mit autonomen Kleinmaschinen aufgezeigt (PEDERSEN et al., 2017). Allerdings sind die Verfahren nur wirtschaftlich, wenn Ertragssteigerungen von 2,5 bis 5% berücksichtigt werden. Die Autoren begründen die angenommenen Ertragssteigerungen mit einer früheren Aus-

saat aufgrund der leichteren Maschinen sowie mit einem besseren Feldaufgang aufgrund der Nachsaat.

SHOCKLEY et al., 2019 untersuchen die maximale Zahlungsbereitschaft für die Automatisierungstechnologie konventioneller Maschinen Größen mithilfe eines Betriebsoptimierungsmodells. Sie ermitteln eine erhebliche Spannweite der Zahlungsbereitschaft, die von 50 bis 50 Tsd. € reicht. Hauptursache für die starken Unterschiede sind die Annahmen zu potentiellen Betriebsmitteleinsparungen und Ertragssteigerungen. Werden nur die eingesparten Lohnkosten und bessere Maschinenauslastung berücksichtigt, ist die Zahlungsbereitschaft vergleichsweise gering.

Lediglich in einer Arbeit wird untersucht, wie sich die AEK von autonomen Landmaschinen in Abhängigkeit der Maschinengröße verändern. Aufgrund der hohen Kosten für die Navigationstechnik ergibt sich für autonom fahrende Reihenhacken eine optimale Maschinenbreite von etwa zehn Metern. Sollten künftig jedoch Kostensenkungspotentiale in der Navigationstechnik realisiert werden, wird sich die optimale Maschinengröße zunehmend verringern (GOENSE, 2005).

Als wesentliche Hürde autonomer Kleinmaschinen sehen die meisten Autoren die derzeit noch hohen Kosten für Sensortechnik, Elektronik und RTK-GPS Systeme. In Zukunft wird aufgrund des technischen Fortschritts in anderen Industriezweigen mit erheblichen Kostensenkungspotentialen gerechnet (GOENSE, 2005; PEDERSEN et al., 2007; FOUNTAS et al., 2010; PEDERSEN et al., 2017).

Kostenunterschiede von Groß- und Kleinmaschinen

Im vorherigen Abschnitt wurde deutlich, dass die derzeit hohen Kosten in der Navigations- und Sensortechnik als Haupthindernis für die Wirtschaftlichkeit autonomer Kleinmaschinen gesehen werden. Künftig werden in diesem Bereich jedoch erhebliche Kostensenkungen erwartet, da sich das Knowhow rasch verbreiten wird und bei einer Massenproduktion der Geräte nur relativ niedrige Material- und Arbeitskosten anfallen werden. Nachfol-

gend wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Kosten für diese Technologien langfristig gegen „null“ streben. Auf diese Weise sollen möglichst einfach die systematischen Kostenunterschiede zwischen großen und kleinen Maschinen analysiert und abgeleitet werden, ob autonome Kleinmaschinen künftig wettbewerbsfähig werden können, wenn keine Lohnkosten für das Führen der einzelnen Maschine mehr berücksichtigt werden müssen. Der Kostenvergleich findet auf Ebene der AEK statt, die sich aus den Kosten für Kapital, Diesel, Lohn und Reparaturen zusammensetzen (BOCHTIS et al., 2019).

Datengrundlage und allgemeine Annahmen

Die für die Berechnung der Kapitalkosten notwendigen Investitionen der einzelnen Maschinen werden – soweit verfügbar – aus den Planungsdaten des KTBL entnommen bzw. interpoliert (KTBL, 2018). Da es sich bei den Angaben des KTBL um Listenpreise handelt, in der Realität für Maschinenneukäufe aber in der Regel deutliche Rabatte gewährt werden, wird für alle Maschinen ein Preisabschlag von 20% berücksichtigt. Hinsichtlich der Standortbedingungen wird von einem Ertrag von 8 Tonnen/ha und einer Schlaggröße von 15 ha mit einer Länge von 548 m und einer Breite von 274 m ausgegangen. Für alle Verfahren wird zunächst ein Lohnansatz in Höhe von 20 €/h, ein Dieselpreis von 1,1 €/l sowie ein kalkulatorischer Zinssatz von 2,3% angenommen. Für den Mähdrusch werden 16 und für den tiefen Bodenbearbeitungsgang 25 Feldarbeitstage unterstellt (KRUG, 2013). Da im Rahmen der Kalkulation nicht die Frage im Vordergrund steht, welche Maschine für welche Betriebsgröße besser geeignet ist, wird für alle Maschinenkombinationen von einer maximalen Auslastung ausgegangen.

Annahmen zu den Maschinen

Die zentralen Annahmen zu den Leistungsparametern sowie den Investitionen der Maschinen sind in Tab. 1 dargestellt. Mähdrescher in der beschriebenen Leistungsklasse für kleine Maschinen werden in Deutschland nicht vertrieben, sodass kaum Informationen zu Leistungsdaten und Investitionsvolumen verfügbar sind. Daher

Tab. 1. Technische und ökonomische Kennzahlen der ausgewählten Maschinenkombinationen

	Einheit	Mähdrescher		Grubber + Traktor	
		klein	Groß	klein	groß
Leistung	kW	44	400	60	320
Arbeitsbreite	m	1,2	10,7	1,5	8,0
Gesamtinvestitionen	€	64.000	396.000	71.500	296.000
Fahrgeschwindigkeit	km/h	4,5	4,5	9,0	9,0
Flächenleistung	ha/h	0,4	3,6	1,3	6,6
Dieserverbrauch	l/h	9	70	18	80
Reparaturkosten	€/h	5	31	4	29

Quelle: (HOSSAIN et al., 2015; KTBL, 2018; CLAAS, 2019b).

wird hierfür auf Produktinformationen und Feldversuche eines Claas Tigers zurückgegriffen, der überwiegend für den asiatischen Markt produziert wird (HOSSAIN et al., 2015; CLAAS, 2019b). Der kleine Mähdrescher verfügt über eine Motorleistung von 44 kW und ein Korntankvolumen von 1.200 l. Der spezifische Leistungsbedarf je Meter Schneidwerksbreite liegt mit 37 kW in einer ähnlichen Größenordnung wie bei dem großen Mähdrescher. Als Investitionsvolumen werden für den asiatischen Markt 35 bis 45 Tsd. € angegeben. Allerdings kann dieses Investitionsvolumen nicht unmittelbar auf den deutschen Markt übertragen werden. Aufgrund höherer gesetzlicher Vorgaben, beispielsweise hinsichtlich der Abgasnormen, ist zu erwarten, dass die Kosten in Europa höher sind. Daher wurde das Investitionsvolumen von 64 Tsd. € aus den Daten des KTBL interpoliert. Als großer Mähdrescher wird ein Rotordrescher mit 400 kW Leistung, einer Schneidwerksbreite von 10,7 m sowie einem Korntankvolumen von 12.000 l unterstellt. Für beide Mähdrescher wird eine Fahrgeschwindigkeit von 4,5 km/h angenommen. Unter Berücksichtigung der Zeiten zum Wenden und Abtanken ergibt sich für den kleinen Drescher eine Flächenleistung von 0,4 ha/h bzw. 3,6 ha/h für den großen Mähdrescher.

Für den Arbeitsgang Grubbern wird für einen mittelschweren Boden von einem Leistungsbedarf von 40 kW je Meter Arbeitsbreite ausgegangen. Als Maschinenkombination werden ein angebauter 1,5 m breiter Tiefgrubber mit einem 60 kW Schlepper sowie ein 8 m breiter aufgesattelter Grubber mit einem 320 kW Schlepper berücksichtigt. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 9 km/h ergibt sich unter Berücksichtigung der Wendezeiten eine Flächenleistung von 1,3 bzw. 6,6 ha/Stunde. Aufgrund der höheren Verschleißerscheinungen werden für die Grubber jährliche Reparaturkosten von 15% des Investitionsvolumens unterstellt.

Ergebnisse der Kalkulationen

In Abb. 1 sind die AEK der beiden Arbeitsverfahren mit und ohne Lohnkosten vergleichend gegenübergestellt. Unter Berücksichtigung der Lohnkosten sind die AEK für die kleinen Maschinen in beiden Verfahren erheblich teurer. Die Arbeiterledigungskosten des großen Mähdreschers sind mit 83 €/ha etwa 70% geringer als bei der kleinen Maschine mit 144 €/ha. Beim Arbeitsgang Grubbern sind die Unterschiede selbst unter Berücksichtigung von Lohnkosten nicht so extrem. Dennoch sind die AEK der großen Maschinenkombination mit 31 €/ha etwa 35% günstiger.

Das Arbeitsverfahren Mähdrusch ist sehr kapitalintensiv, da die Kapitalkosten für beide Maschinengrößen mit 40 bzw. 55% den größten Anteil an den Gesamtkosten haben. Deutliche Unterschiede zwischen dem kleinen und großen Mähdrescher ergeben sich bei den Lohnkosten. Diese betragen lediglich 6 €/ha bei dem großen Mähdrescher und sind bei dem kleinen Mähdrescher mit 50 €/ha knapp neun Mal so hoch. Der Anteil der Lohnkosten an den Gesamtkosten ist mit 33% beim kleinen Mähdrescher sehr hoch und spielt bei der großen Maschi-

ne mit einem Anteil von lediglich 7% eine untergeordnete Rolle. Auch Reparaturkosten des großen Mähdreschers sind mit 10 €/ha deutlich geringer als beim kleinen Mähdrescher (- 30%). Die Dieseldaten unterscheiden sich weniger stark. Hier verursacht der große Mähdrescher mit 21 €/ha etwa 10% geringere Kosten.

Für das Arbeitsverfahren Grubbern (unterer Teil der Abb. 1) sind die Kostenunterschiede im Ausgangsszenario mit Lohnkosten geringer. Die kleine Maschinenkombination verursacht lediglich 11 €/ha (34%) höhere Kosten als die große Maschinenkombination. Das Arbeitsverfahren ist im Vergleich zum Mähdrusch weniger kapitalintensiv, da die Kapitalkosten bei lediglich 8–10 €/ha liegen und ihr Anteil an den Gesamtkosten 34% bzw. 20% ausmacht. Wie beim Mähdrusch sind die Dieseldaten der kleinen Maschinenkombination etwa 10% höher. Ihr Anteil an den Gesamtkosten ist mit 40% hingegen wesentlich bedeutender als beim Mähdrusch. Für die kleine Maschinenkombination ist der Anteil der Lohnkosten mit 15 €/ha bzw. einem Anteil an den Gesamtkosten von knapp 40% ein erheblicher Kostenblock.

Ohne Berücksichtigung von Lohnkosten reduzieren sich in einem Szenario mit autonomen Landmaschinen die Kostenunterschiede zwischen der großen und kleinen Maschinenkombination erheblich. Für das Arbeitsverfahren Mähdrusch sinkt der Kostenunterschied von knapp 60 €/ha auf 18 €/ha, bzw. von 70% auf 23%. Dennoch ergeben sich bei heutigen Maschinenkonzepten für das Mähdreschen auch in einem autonomen Szenario deutliche Kostenvorteile für Großmaschinen. Für das Arbeitsverfahren Grubbern zeigt sich hingegen ein anderes Bild. Hier wird ohne Berücksichtigung der Lohnkosten das Arbeitsverfahren mit kleinen Maschinen etwa 2 €/ha (7%) günstiger. Ursache hierfür ist, dass die Kapital- und Reparaturkosten der kleinen Maschinen geringer sind als bei den großen Maschinen.

Diskussion

Die durchgeführten Kalkulationen dienen dazu, eine erste Näherung an die Frage vorzunehmen, ob bei einem Einsatz autonomer Landmaschinen die bisherige Entwicklung zu immer größeren Maschinen gestoppt werden kann und kleinere Maschinen hinsichtlich der AEK wettbewerbsfähig werden können. Für das Arbeitsverfahren Mähdrusch hat sich gezeigt, dass dies nicht ohne weiteres zu erwarten ist. Sofern sich im Zuge der Automatisierung der Landtechnik mit Blick auf mögliche ökologische Vorteile kleinere Maschinengrößen für die Ernte durchsetzen sollen, wird es notwendig sein, andere Maschinenkonzepte zu entwickeln. Denkbar wäre es, den Gesamtprozess zu entkoppeln und durch kleinere Roboter lediglich die Ähren abschneiden zu lassen, während das Ausdreschen stationär erfolgt (GAUß et al., 2018).

Für weniger kapitalintensive Arbeitsverfahren wie das Grubbern zeigt sich hingegen ein anderes Bild. Hier lassen die Kalkulationen den Schluss zu, dass künftig auch

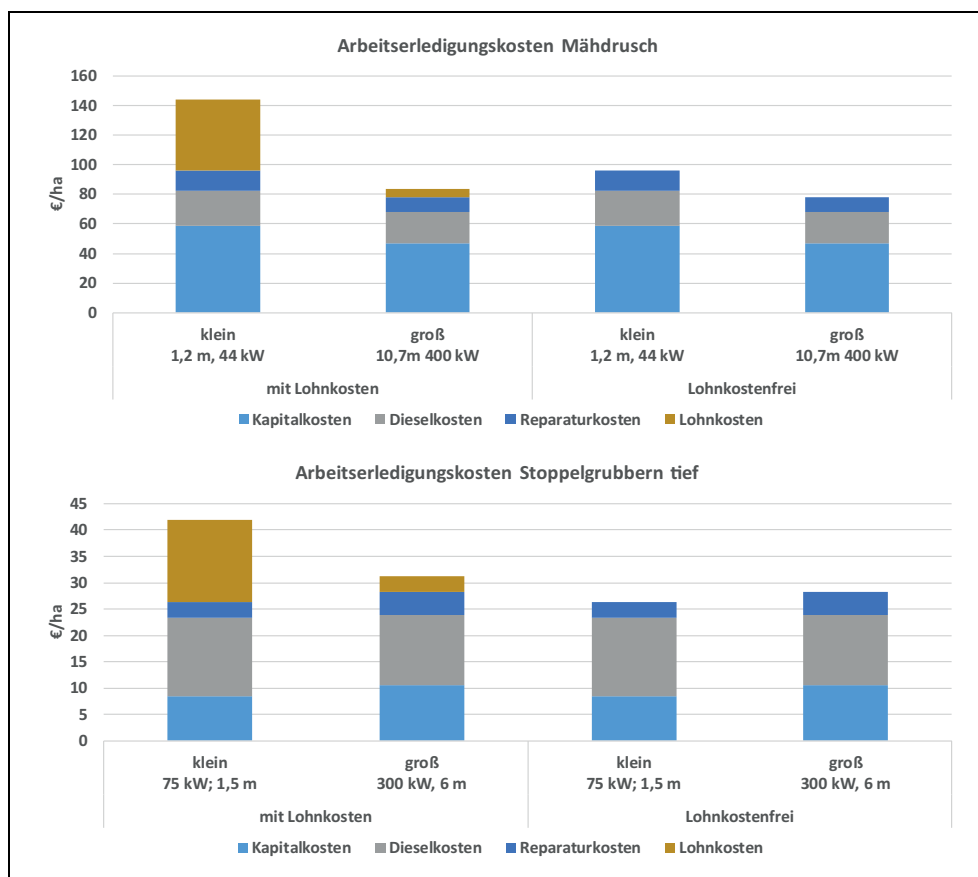


Abb. 1. Arbeits erledigungskosten der Arbeitsverfahren Mähdrusch und Stoppelgrubbern

kleinere Maschinenkonzepte wettbewerbsfähig werden können.

Die hier durchgeführte ökonomische Analyse beschränkt sich auf das Kostensenkungspotential von autonomen Kleinmaschinen aufgrund eingesparter Lohnkosten. Es stellt sich jedoch die Frage, ob sich Kleinmaschinen künftig deutlich einfacher, d.h. mit wesentlich günstigeren Bauteilen, konstruieren lassen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Hinzu kommt, dass autonome Kleinmaschinen die Möglichkeit bieten den Pflanzenbau völlig anders zu organisieren (WEGENER et al., 2017). Hierzu zählt beispielsweise eine gleichmäßigere Anordnung der Pflanzen im Feld oder eine kleinräumigere Variation von Pflanzen im Feld, um positive Effekte, wie gegenseitige Beschattung, zu nutzen. Auf diese Weise könnten zusätzliche Ertragspotentiale erschlossen, negative Umwelteinflüsse des Ackerbaus reduziert und eine höhere Effizienz des Produktionssystems erreicht werden. Für eine umfassende ökonomische Bewertung autonomer Kleinmaschinen wird es künftig notwendig sein, derartige potentielle pflanzenbauliche Vorteile zu untersuchen und ökonomisch zu bewerten. Diese pflanzenbaulichen Potentiale werden sich voraussichtlich aber nur realisieren lassen, wenn das gesamte Anbauverfahren inklusive der Ernte mit autonomen Kleinmaschinen erfolgt und sich die neu entwickelten Verfahren stärker an den Bedürfnissen der Kulturpflanzen orientieren. Die derzeit stattfindende Entwicklung einzelner autonomer Maschinenkonzepte für einzelne Verfahrensschritte, wie beispielsweise das Hacken

von Unkräutern, kann dabei nur ein Zwischenschritt sein.

Fazit

Insgesamt zeigen die Kalkulationen, dass in einer Welt mit autonom fahrenden Landmaschinen für Arbeitsverfahren mit hohen Lohnkostenanteilen künftig mehrere kleinere Maschinen ebenso günstig eingesetzt werden können wie eine große Maschine. Somit könnte der Trend hin zu immer größeren Landmaschinen in diesem Bereich durchbrochen werden. Für kapitalintensivere Arbeitsverfahren mit geringem Lohnkostenanteil, wie die Ernte, ist dies nicht ohne Weiteres zu erwarten. Die Kalkulationen stellen jedoch nur eine erste Näherung an die Frage dar, welche Maschinengröße sich bei autonom fahrenden Landmaschinen künftig durchsetzen wird. Künftig besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, insbesondere hinsichtlich der monetären Bewertung möglicher pflanzenbaulicher Vorteile durch kleinere Landmaschinen.

Literatur


ABSON, D.J., 2019: The Economic Drivers and Consequences of Agricultural Specialization. In: *Agroecosystem diversity: Reconciling contemporary agriculture and environmental quality*. LEMAIRE, G., S. KRONBERG, S. RECOUS und P. CÉSAR DE FACCIÓ CARVALHO (Hrsg.), London, Academic Press, S. 301-315.

- BENNETT, J.M., S.D. ROBERTON, S. MARCHUK, N.P. WOODHOUSE, D.L. ANTILLE, T.A. JENSEN, T. KELLER, 2019: The soil structural cost of traffic from heavy machinery in Vertisols. *Soil and Tillage Research* **185**, 85–93, DOI:10.1016/j.still.2018.09.007.
- BLACKMORE, B.S., S. FOUNTAS, T.A. GEMTOS, H.W. GRIEPENTROG, 2009: A SPECIFICATION FOR AN AUTONOMOUS CROP PRODUCTION MECHANIZATION SYSTEM. *Acta Horticulturae* (824), 201–216, DOI:10.17660/ActaHortic.2009.824.23.
- BLACKMORE, S., B. STOUT, M. WANG, B. RUNOV, 2005: Robotic agriculture – the future of agricultural mechanisation? Uppsala.
- BOCHTIS, D., C.A.G. SØRENSEN, D. KATERIS, 2019: Cost of Using Agricultural Machinery. In: *Operations management in agriculture*. BOCHTIS, D., C.A.G. SØRENSEN und D. KATERIS (Hrsg.), London, Academic Press, S. 79–115.
- CLAAS, 2019a: Claas Produkthistorie Mähdröschler. Zugriff: 24. Februar 2019, URL: <https://www.claas.de/unternehmen/historie/products>.
- CLAAS, 2019b: Technical Data CROP TIGER 40/30, URL: <https://www.costarica.claas.com/cl-pw-en/products/combindes/crop-tiger30-terra-trac>.
- FORBORD, M., H. BJØRKHaug, R.J.F. BURTON, 2014: Drivers of change in Norwegian agricultural land control and the emergence of rental farming. *Journal of Rural Studies* **33**, 9–19, DOI:10.1016/j.jrurstud.2013.10.009.
- FOUNTAS, S., T.A. GEMTOS, S. BLACKMORE, 2010: Robotics and Sustainability in Soil Engineering. In: *Soil engineering*. DEDOUSIS, A.P. (Hrsg.), Berlin, Springer, S. 69–80, DOI: 10.1007/978-3-642-03681-1.
- GAUß, C.-C., T.-F. MINßEN, L.-M. URSO, T. DE WITTE, J.K. WEGENER, 2018: Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen. Schlussbericht.
- GOENSE, D., 2005: The Economics of Autonomous Vehicles in Agriculture. 2005 Tampa, FL July 17-20, 2005, DOI: 10.13031/tfl2005.2013.
- HOSSAIN, M.A., M.A. HOQUE, M.A. WOHAB, M.M.A. MIAH, M.S. HASSAN, 2015: Technical and economic performance of combined harvester in farmers' field. *Bangladesh Journal of Agricultural Research* **40** (2), 291–304, DOI:10.3329/bjar.v40i2.24569.
- KRUG, J., 2013: Perspektiven ackerbaulicher Grenzstandorte in Nordostdeutschland: Übertragbarkeit extensiver Produktionssysteme überseeischer Trockenstandorte. Zugl.: Göttingen, Univ., Diss., 2013. Braunschweig, Johann-Heinrich-von-Thünen-Inst.
- KTBL (Hrsg.), 2018: Betriebsplanung Landwirtschaft 2018/19: Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft, Darmstadt.
- PEDERSEN, S.M., S. FOUNTAS, S. BLACKMORE, 2007: Economic potential of robots for high value crops and landscape treatment. In: *Precision agriculture '07: Papers presented at the 6th European Conference on Precision Agriculture Skiathos, Greece, 3-6 June 2007*. STAFFORD, J.V. (Hrsg.), Wageningen, Wageningen Academic Publ, S. 457–464.
- PEDERSEN, S.M., S. FOUNTAS, H. HAVE, B.S. BLACKMORE, 2006: Agricultural robots—system analysis and economic feasibility. *Precision Agriculture* **7** (4), 295–308, DOI:10.1007/s11119-006-9014-9.
- PEDERSEN, S.M., S. FOUNTAS, C.G. SØRENSEN, F.K. VAN EVERT, B.S. BLACKMORE, 2017: Robotic Seeding: Economic Perspectives. In: *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*. PEDERSEN, S.M. und K.M. LIND (Hrsg.), Cham, Springer International Publishing, S. 167–179, DOI: 10.1007/978-3-319-68715-5.
- RODRÍGUEZ, C., K. WIEGAND, 2009: Evaluating the trade-off between machinery efficiency and loss of biodiversity-friendly habitats in arable landscapes: The role of field size. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **129** (4), 361–366, DOI:10.1016/j.agee.2008.10.010.
- ŠÁLEK, M., V. HULA, M. KIPSON, R. DAŇKOVÁ, J. NIEDOBOVÁ, A. GAMERO, 2018: Bringing diversity back to agriculture: Smaller fields and non-crop elements enhance biodiversity in intensively managed arable farmlands. *Ecological Indicators* **90**, 65–73, DOI:10.1016/j.ecolind.2018.03.001.
- SHOCKLEY, J.M., C.R. DILLON, S.A. SHEARER, 2019: An economic feasibility assessment of autonomous field machinery in grain crop production. *Precision Agriculture* **13** (2), 21, DOI:10.1007/s11119-019-09638-w.
- SIVARAJAN, S., M. MAHARLOOEI, S.G. BAJWA, J. NOWATZKI, 2018: Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. *Soil and Tillage Research* **175**, 234–243, DOI:10.1016/j.still.2017.09.001.
- VDMA, 2015: Entwicklung der durchschnittlichen Leistung von Neuzulassungen bei Traktoren. Datenbereitstellung per Mail.
- WEGENER, J.K., L.-M. URSO, D.V. HÖRSTEN, T.-F. MINßEN, C.-C. GAUS, 2017: Neue Pflanzenbausysteme entwickeln – welche innovativen Techniken werden benötigt? *LANDTECHNIK – Agricultural Engineering*, **72** (2), DOI:10.15150/lt.2017.3156.

© Der Autor/ Die Autorin 2019.

 Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt wird (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

© The Author(s) 2019.

 This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).