



Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

BAND 97 | Ausgabe 3

Agrarwissenschaft
Forschung

Praxis

Rebound Effekte in der Präzisionslandwirtschaft – Ein Kommentar

Von Paul Johann WELLER von AHLEFELD

1 Einleitung

Die Landwirtschaft steht vor der Herausforderung, eine wachsende Weltbevölkerung zu ernähren (16). Die landwirtschaftliche Produktion muss, *ceteris paribus*, zwischen den Jahren 2012 und 2050 um 60 % wachsen um die steigende Nachfrage nach Nahrungsmitteln zu befriedigen (5). Gleichzeitig kommt es zu Veränderungen der Ernährungsgewohnheiten einhergehend mit einer höheren Nachfrage nach tierischen Produkten. Auch steigert der Bedeutungszuwachs von Agrarrohstoffen als Energieträger die Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten (50; 5). Schließlich wird von der Landwirtschaft ein Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz in Form eines effizienteren Ressourceneinsatzes erwartet (16; 48).

Informations- und Kommunikationstechnologien (engl. Information and communication technologies, ICT) gelten als Instrumente zur umweltfreundlichen Effizienzsteigerung in der Produktion von Gütern und der Bereitstellung von Dienstleistungen (23; 41). Studien zeigen jedoch auch, dass es anstatt zu einer Ressourceneinsparung zu einer gesteigerten Nachfrage nach der Ressource infolge des Einsatzes einer effizienzsteigernden ICT kommen kann, was als Rebound-Effekt oder Jevons Paradox bezeichnet wird. Diese Effekte gehen dabei explizit auf das adaptive Verhalten von Konsumenten und Produzenten als Reaktion auf die Einführung der ressourcensparenden Technologie zurück (46; 10).

Für die Landwirtschaft wird durch den Einsatz von ICT im Rahmen der Präzisionslandwirtschaft eine umweltfreundliche Effizienzsteigerung versprochen (29; 31). So kann durch den Einsatz von Sensoren die Überwachung und Kontrolle in der landwirtschaftlichen Erzeugung verbessert werden. Die erhöhte Verfügbarkeit von Informationen sowie deren Verbindung mit teilflächenspezifischen Applikationstechniken kann sowohl die Profitabilität der landwirtschaftlichen Produktion steigern als

auch die negativen externen Effekte verringern (52). Jedoch sind mögliche Rebound-Effekte in der Landwirtschaft durch den Einsatz von Techniken der Präzisionslandwirtschaft, z. B. Sensoren, in der wissenschaftlichen Literatur bisher wenig diskutiert.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieses Beitrags, mögliche Einsparpotenziale und Rebound-Effekte in der Ressourcennutzung durch die Digitalisierung in der Landwirtschaft aufzuzeigen. Potenzielle Rebound-Effekte werden am Beispiel des Einsatzes von Sensortechniken im Ackerbau diskutiert. Dieser Beitrag verknüpft die Anwendung von Technologien der Präzisionslandwirtschaft bzw. die Nutzung von Sensortechniken im Ackerbau explizit mit möglichen Rebound-Effekten.¹

Der Beitrag liefert Hinweise für die Entwicklung zukünftiger Politikmaßnahmen in den Bereichen Nachhaltigkeit, Ressourcenschutz und Digitalisierung in der Landwirtschaft sowie Grundlagen für die Durchführung weiterer Forschungsprojekte. Die dargestellten Ergebnisse sind damit sowohl für Politiker als auch Forscher auf diesem Gebiet von Bedeutung.

Kapitel 2 stellt die angewandten Materialien und Methoden vor. Kapitel 3 beinhaltet die Ergebnisse der Untersuchung sowie deren Diskussion; darin wird auch explizit auf die potentielle Einsparung ausgewählter Ressourcen (Nährstoffe in Form von Düngemitteln, Pflanzenschutzmitteln, Wasser und Ackerland) sowie mögliche Rebound-Effekte eingegangen. Der Beitrag schließt in Kapitel 4 mit dem Fazit und einem Ausblick.

2 Material und Methoden

Im Folgenden werden die genutzten Materialien und Methoden vorgestellt. Dazu werden in Abschnitt 2.1 die grundlegenden Begrifflichkeiten definiert und erläutert. In Abschnitt 2.2 wird die Vorgehensweise bei der Literaturrecherche erklärt.

¹ Der Fokus des Beitrags liegt auf den möglichen Rebound Effekten durch den Einsatz der Sensortechniken im Ackerbau. Die Rebound Effekte gehen auf das adaptive Verhalten von Produzenten und Konsumenten zurück. In dem vorliegenden Beitrag wird dabei explizit auf das adaptive Verhalten der Landwirte eingegangen. Auf die genaue Funktionsweise sowie Arten der Sensoren wird nur kurz für das Verständnis dieses Beitrags eingegangen. Weiterführende Literatur wird an den wichtigsten Stellen angegeben.

2.1 Grundlegende Begriffsdefinitionen

Informations- und Kommunikationstechnologien (engl. Information and communication technologies, ICT) tragen zum wirtschaftlichen Strukturwandel durch eine veränderte Ressourcennutzung bei (9). Gemäß OECD-Report von Berkhout und Hertin (9) lassen sich Effekte auf die Umwelt - infolge der Nutzung von ICT - in First-Order-, Second-Order- und Third-Order-Effekte einteilen.

Zu den First-Order-Effekten zählen die direkten Umwelteffekte infolge der Produktion, Nutzung sowie Entsorgung durch den Einsatz der ICT. Darunter fallen auch Umwelteffekte durch den Aufbau von ICT-Strukturen, wie z. B. der Netzausbau für die Nutzung des Internets.

Unter Second-Order-Effekten werden indirekte Umwelteffekte, die durch den Einfluss der Nutzung von ICT hervorgerufen werden, auf wirtschaftliche Strukturen verstanden. Dazu zählen speziell die Dematerialisierung, Virtualisierung und Demobilisation. Unter der Dematerialisierung versteht man die Einsparung an Inputressourcen zur Herstellung eines Outputs. Bei Virtualisierung spricht man von der Substitution analoger bzw. physischer Güter durch digitale Informationsgüter. Als Demobilisation bezeichnet man die Einsparung an Transportwegen durch z.B. E-Commerce oder die Möglichkeit der Verrichtung der Arbeit zuhause in Form des sogenannten „Home-Office“.

Third-Order-Effekte sind indirekte Umwelteffekte durch veränderten Konsum, veränderte Produktion und wirtschaftliches Wachstum. Dazu zählen auch Rebound-Effekte, die auf das adaptive Verhalten von Konsumenten und Produzenten zurückgehen (9).

Die folgende Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den verschiedenen Effekten.

Tabelle 1:
Übersicht der grundlegenden Begrifflichkeiten zur Einteilung der Umwelteffekte infolge der Nutzung von ICT

Begriff	Definition
First-Order-Effekt	Direkte Umwelteffekte durch Produktion und Nutzung von ICT
Second-Order-Effekt	Indirekte Umwelteffekte durch Einfluss der Nutzung von ICT auf wirtschaftliche Strukturen und Produktionsprozesse
Third-Order-Effekt	Indirekte Umwelteffekte durch veränderten Konsum, Produktion und wirtschaftliches Wachstum inkl. Rebound-Effekte

Quelle: Eigene Darstellung gemäß Berkhout und Hertin (9)

Die Verwendung des Begriffs Rebound-Effekt zur Beurteilung der Energie-Effizienz geht auf Khazzoom (26) sowie Greening et al. (19) zurück, die ihn aus dem Jevons Paradox vom namensgebenden Ökonom Jevons² abgeleitet haben (4).

Rebound-Effekt ist ein Sammelbegriff für mehrere Mechanismen, die dazu führen, dass potenzielle Einsparungen einer Ressource zum Teil durch eine höhere Nachfrage nach der Ressource infolge der Einführung einer potenziell ressourceneinsparenden Technologie kompensiert werden. Rebound-Effekte gehen dabei explizit auf das adaptive Verhalten von Konsumenten und Produzenten zurück (46; 10). Aus mikroökonomischer Sicht³ lässt sich der Rebound-Effekt weiter untergliedern und wie folgt erklären: der effiziente Einsatz einer Ressource senkt die marginalen Kosten der Ressourcennutzung und steigert die Nachfrage nach dieser Ressource (direkter Rebound-Effekt). Weiterhin kann durch ein höheres verfügbares Restbudget eine andere Ressource verstärkt nachgefragt werden (indirekter Rebound Effekt) (10). Der wirtschaftsweite Rebound-Effekt in Form der Verschiebungen von Angebot und Nachfrage sowie der Produktionsstruktur wird dabei als Summe des direkten und indirekten Rebound-Effekts definiert (46).

² William Stanley Jevons gab an, dass eine effizientere Nutzung von Kohle durch effizientere Maschinen zu erhöhten statt verringerten Nachfrage nach Kohle führt (4; 38).

³ Für eine detaillierte mikroökonomische Darstellung des Rebound-Effekt siehe Sorrell und Dimitropoulos (47).

Als Jevons Paradox⁴ wird die Situation bezeichnet, wenn die erhöhte Nachfrage infolge der effizienteren Technologie die Einsparungen übertrifft und somit der Konsum der Ressource insgesamt nicht verringert, sondern erhöht wird (4). Somit lässt sich zur Unterscheidung und Abgrenzung der Begriffe feststellen, dass beim Rebound-Effekt lediglich ein Teil der Einsparungen bzw. die gesamten Einsparungen durch eine erhöhte Nachfrage ausgeglichen werden, während beim Jevons-Paradox die Einsparungen durch die erhöhte Nachfrage übertroffen werden. In der Gleichung [1] ist die Berechnung des Effektes gemäß York und McGee (55) dargestellt:

$$\text{Effekt [\%]} = \frac{\text{Einsparung}_{\text{Potenziell}} - \text{Einsparung}_{\text{Real}}}{\text{Einsparung}_{\text{Potenziell}}} * 100 \quad [1]$$

$$\text{wenn } \begin{cases} \text{Effekt [\%]} \leq 100 \% = \text{Rebound Effekt} \\ \text{Effekt [\%]} > 100 \% = \text{Jevons Paradox} \end{cases}$$

wobei $\text{Einsparung}_{\text{Potenziell}}$ für die mögliche Einsparung der Ressource durch die Technologie und $\text{Einsparung}_{\text{Real}}$ für die real beobachtbare Einsparung bei Verwendung der Technologie steht. Liegt das Potenzial zur Einsparung einer Ressource bei 10 % und man beobachtet eine reale Einsparung von 2 %, dann liegt der Rebound Effekt bei 80 %. Beobachtet man nur bei der realen Verwendung keine Einsparung an der Ressource sondern eine erhöhte Verwendung von 2 %, wird für $\text{Einsparung}_{\text{Real}}$ ein negative Koeffizient von -2% eingesetzt, sodass sich ein Rebound Effekt von 120 % ergibt, was dem Jevons Paradox entspricht (22).

⁴ Ein Überblick zu Studien zum Jevons Paradox lässt sich bei Polimeni et al. (38) finden.

Die folgende Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die Begrifflichkeiten.

Tabelle 2:
Übersicht der grundlegenden Begrifflichkeiten zum Rebound Effekt und Jevons Paradox

Begriff	Definition
Jevons Paradox	Erhöhte Nachfrage einer Ressource infolge der Einführung einer Technologie zur effizienteren Nutzung dieser Ressource; Erhöhte Nachfrage übertrifft die Einsparungen
Rebound Effekt	Erhöhte Nachfrage nach einer Ressource infolge der Einführung einer Technologie zur effizienteren Nutzung dieser Ressource; Erhöhte Nachfrage übertrifft nicht die Einsparungen
Direkter Rebound Effekt	Erhöhte Nachfrage nach einer Ressource infolge der Einführung einer Technologie zur effizienteren Nutzung dieser Ressource
Indirekter Rebound Effekt	Erhöhter Nachfrage nach anderen Ressourcen infolge der Einführung einer Technologie zur effizienteren Nutzung einer Ressource
Wirtschaftsweiter Rebound Effekt	Summe aus direktem und indirektem Rebound Effekt

Quelle: Eigene Darstellung nach Berkhout et al. (10), Alcott (4) sowie Sorrell (46)

In der Landwirtschaft finden ICT besonders in der Präzisionslandwirtschaft Anwendung. Als Präzisionslandwirtschaft bezeichnet man dabei Managementstrategien, die ICT anwenden, um Informationen und Daten aus einer Vielzahl von Quellen für die Entscheidungsfindung in der landwirtschaftlichen Produktion zu nutzen (34; 29). U. a. werden Sensoren eingesetzt, um Informationen über Umwelt-, Boden- und Pflanzenzustände zu sammeln (1). Insbesondere können über Sensoren Informationen über:

- den Befall mit Unkräutern, Krankheiten sowie Schädlingen,
- die Wasser- sowie Nährstoffversorgung des Bodens und der Pflanzen,
- die organische Masse,
- den pH-Wert des Bodens und über
- die Biomasse- und Ertragsentwicklung

gesammelt werden.

Ebenfalls können Trocken-, Hagel- oder Flutschäden erfasst werden (33; 54). Dazu sammeln die Sensoren Informationen über Energie aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums, die entweder absorbiert, reflektiert oder ausgestrahlt (sichtbar, Nahinfrarot (NIR), thermal Infrarot (TIR), Mikrowellen) werden (25; 33). Auch können Sensoren mechanische, akustische oder elektrochemische Informationen verarbeiten (2)⁵. Diese Informationen ermöglichen es dem Landwirt unter Verwendung teilflächenspezifischer Techniken Inputs an den Bedarf anzupassen, um damit die Effizienz sowie Profitabilität der Erzeugung zu steigern bzw. die Kosten sowie externe negative Umwelteffekte zu verringern (3).

Gemäß Khanal et al. (25), Mulla (33) sowie Wójtowicz et al. (54) lassen sich Sensoren für den Ackerbau grundlegend in drei Kategorien unterteilen:

- bodengestützte Sensorik,
- luftgestützte Sensorik sowie
- satellitengestützte Sensorik.

Zur bodengestützten Sensorik gehören zum Beispiel Handheldgeräte sowie an Traktoren, Pflanzenschutzspritzen oder Beregnungsanlagen angebrachte Sensoren. Luftgestützte Sensorik nutzt den Einsatz von Flugzeugen und Drohnen. Satellitengestützte Sensoren setzen auf die namensgebenden Satelliten⁶.

⁵ Für einen detaillierteren Überblick siehe Adamchuk et al. (2), Zhang et al. (56), Liaghat und Balasundram (28), Abbasi et al. (1), Mulla (33) sowie Wójtowicz et al. (54).

⁶ Weitere diffizilere Kategorisierungen der Sensoren lassen sich bei Metternicht (32) finden.

Die folgende Tabelle 3 zeigt einen Überblick über die Begrifflichkeiten.

Tabelle 3:
Übersicht der grundlegenden Begrifflichkeiten der Präzisionslandwirtschaft und Sensorik

Begriff	Definition
Präzisionslandwirtschaft	Nutzung von ICT in der Landwirtschaft für die Evaluierung von einer Vielzahl von Information zur Entscheidungsfindung in der landwirtschaftlichen Produktion zur Steigerung der Effizienz und Profitabilität bzw. Reduzierung von Kosten sowie negativen externen Effekten
Sensorik	Detektor bzw. Detektoren zur Messung und Informationsweitergabe von Umwelt-, Boden und Pflanzenzuständen im Ackerbau
Bodengestützte Sensorik	Sensoren auf Treckern, Beregnungsanlagen und Pflanzenschutzspritzen; Handheld Geräte
Luftgestützte Sensorik	Sensoren auf Flugzeugen und Drohnen
Satellitengestützte Sensorik	Sensoren auf Satelliten

Quelle: Eigene Darstellung gemäß Abbasi et al. (1), Adrian et al. (3), National Research Council (34), Lindblom et al. (29), Wójtowicz et al. (54) sowie Mulla (33)

2.2 Methodik der Literaturrecherche

Die Begriffe Rebound-Effekt bzw. Jevons Paradox tauchten, wie im vorherigen Abschnitt dargelegt, im Zusammenhang mit der Untersuchung zur Energie-Effizienz auf (19; 4). Die meisten Studien zu Rebound-Effekten bzw. Jevons Paradox beschäftigen sich daher mit Energie als einzigen Inputfaktor (z. B. 8; 23)⁷. Die Energieeffizienz wird dabei als Verhältnis zwischen Output und Input gemessen (Totale Faktorproduktivität; TFP) (46; 4).

Da sich dieser Beitrag mit der Ressourceneffizienz in der Landwirtschaft beschäftigt, werden als Inputfaktoren nicht die Energie sondern Nährstoffe in Form von Düngemitteln, Pflanzenschutzmittel, Wasser sowie Ackerland, betrachtet. Die Auswahl der Ressourcen entspricht zudem den Faktoren,

⁷ Zur Effizienzanalyse in der Landwirtschaft können Düngemittel, Treibstoffe etc. auch in Energieeinheiten umgewandelt werden (36).

die in vielen Studien zur technischen Effizienz mittels Data Envelopment Analysis (DEA) und Malmquist Indizes (MI) bzw. Stochastic Frontier Analysis (SFA) verwendet werden (z. B. 57; 35; 17).

Aus der beschriebenen Auswahl der zu betrachtenden Ressourcen sowie der im Abschnitt 2.1 definierten Begrifflichkeiten ergeben sich folgende Suchwörter bzw. Kombinationen von Suchwörtern, die in englischer Sprache für die Literaturrecherche mittels Google Scholar[®] und Web of Science[®] verwendet wurden:

rebound effect, Jevon, Jevons paradox, agriculture, precision agriculture, remote sensing, wireless sensor networks, sensor, resource efficiency, efficiency, nutrients, fertilizer, crop protection, water und water management.

Nach dem Screening der Abstracts wurden passfähige Artikel für diesen Beitrag ausgewählt. Weitere Artikel, die nicht explizit durch die Suchwörter gefunden wurden, wurden mittels Kreuzverweisen in den ausgewählten Artikeln identifiziert.

3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden soll in den einzelnen Abschnitten auf den Einsatz der Sensortechniken zur Einsparung der Ressourcen, Nährstoffe in Form von Düngemitteln (Abschnitt 3.1), Pflanzenschutzmittel (Abschnitt 3.2), Wasser (Abschnitt 3.3) und Ackerland (Abschnitt 3.4) eingegangen werden. Danach werden mögliche Rebound-Effekte des Einsatzes der Sensortechniken diskutiert.

3.1 Ressource Nährstoffe

In der Literatur liegt der Schwerpunkt bei der sensorunterstützten Applikation von Nährstoffen auf der effizienten Ausbringung von Stickstoff (N)⁸.

Kommerzielle optische N-Sensoren wie z. B. das SPAD-Meter als Handheld Gerät oder der Yara-N-Sensor⁹ als Anbau für die Zugmaschine (33; 54) sind für Landwirte bereits seit längerer Zeit

⁸ Sensoren können neben Stickstoff auch andere Makronährstoffversorgungszustände im Boden und in der Pflanze messen (24).

⁹ N-Sensoren lassen sich in aktive und passive Sensoren unterscheiden. Passive Sensoren messen reflektiertes Sonnenlicht und aktive Sensoren haben eine eigene Lichtquelle, deren reflektiertes Licht gemessen wird (54).

verfügbar¹⁰. SPAD-Meter als Handheld-Geräte messen Werte, die mit dem Chlorophyll-Gehalt der Pflanze korrelieren. Auf Basis der Werte, die räumlich verteilt auf einem Schlag gemessen werden, kann der N-Versorgungszustand abgeleitet und die N-Applikation angepasst werden (40).

N-Sensoren auf Zugmaschinen messen das reflektierte Licht der Pflanzen bei bestimmten Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums (15)¹¹ und berechnen auf Basis dieser Informationen, die zu applizierende N-Menge, die an den Düngerstreuer oder die Pflanzenschutzspritze weitergegeben wird. Diese Kopplung der sensorbasierten Messung des Bedarfs mit einer teilflächenspezifischen Ausbringung ermöglicht eine sehr genaue Anpassung der applizierten Nährstoffmenge an den tatsächlichen Bedarf und kann damit die N-Effizienz steigern (39).

Schieffer und Dillon (44) konnten zeigen, dass die Nutzung von Technologien der Präzisionslandwirtschaft, wie automatische Lenksysteme und teilflächenspezifische Applikation, die Ausbringungsmenge an Düngemitteln steigern und es somit zu einem Rebound-Effekt kommen kann. Laut den Autoren gab es für die Landwirte einen Anreiz zum höheren Einsatz der Ressourcen infolge der verringerten Kosten (44). Dieser Effekt könnte ebenfalls beim Einsatz von Sensoren zur Verbesserung der teilflächenspezifischen Düngung auftreten.

Weiterhin kann es zu Rebound-Effekten kommen, wenn auf qualitativ sehr unterschiedlichen bzw. stark wechselnden Ackerböden (durch z.B. Tonstellen, die sehr schnell vernässen) die Düngeintensität bisher eher gering war. Die Heterogenität kann auch mit Blick auf die unterschiedlichen Nährstoffbedürfnisse der Pflanzen auf Basis der Informationen der Sensoren aufgefangen werden. Der Rebound-Effekt besteht dann darin, dass die Düngemittelintensität insgesamt steigt. Zudem kann durch die Optimierung beispielsweise des Stickstoffeinsatzes der Bedarf auch anderer Nährstoffe gemäß dem Minimumgesetz (20) ansteigen.

Durch die Möglichkeit mit Hilfe der Sensoren den Ernährungszustand der Pflanze genau zu erfassen, könnte es im Hinblick auf die angestrebte Gewinnmaximierung für einen Landwirt den Anreiz geben,

¹⁰ Auch luft- und satellitengestützte Sensoren können Anwendung finden, wobei dort ebenfalls die gleiche Messtechnik zum Einsatz kommt (33; 54).

¹¹ Der zugehörige Vegetationsindex nennt sich Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI) und repräsentiert die photosynthetisch aktive Biomasse

z. B. qualitativ höherwertigeren Weizen zu produzieren als zuvor bei einer generell geringen Düngemittelintensität. Dementsprechend könnte die Nachfrage nach Dünger trotz des Einsatzes ressourcensparender Technik ansteigen.

Insgesamt erscheint es also möglich, dass es unter bestimmten Bedingungen auch bei der Verbesserung der Nährstoffeffizienz zu Rebound-Effekten kommen kann. Das Auftreten des Jevons Paradox bei der Ressource Düngemittel erscheint allerdings eher unwahrscheinlich, da es im Gegensatz zur Energieeffizienz, wo eine große Menge des Inputs Arbeit relativ leicht durch Energie ersetzt werden kann (10; 47), physiologische Grenzen (der Nährstoffaufnahme der Pflanzen) gibt, die eine Substitution von anderen Faktoren im Ackerbau durch relativ kostengünstigere Nährstoffe begrenzen.

3.2 Ressource Pflanzenschutzmittel

Zur Unterstützung im Pflanzenschutz können ebenfalls Sensoren eingesetzt werden. Zum Beispiel können TIR Sensoren pilzbedingten Stress identifizieren bevor es auf der Pflanze zu sichtbaren Symptomen kommt (25). Auch Veränderungen im Spektrum des reflektierten Lichts infolge des Befalls mit Krankheiten oder Schädlingen können mittels Sensoren identifiziert werden (54). Auf Basis von optischen Sensoren (Fotodiode) und Bilderkennung können Unkräuter von Kulturpflanzen unterschieden werden bzw. Unkräuter und Krankheiten genau erkannt werden. Vielversprechend für die Verbesserung der Ressourceneffizienz zeigt sich dabei die Möglichkeit, Unkräuter sowie befallene Pflanzen direkt mechanisch oder mit Pflanzenschutzmitteln behandeln zu können (z. B. 30; 18), wobei Systeme dafür zum Teil noch nicht kommerziell verfügbar sind.

Schieffer und Dillon (44) vermuteten das Auftreten von Rebound-Effekten bei der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln, lieferten dafür allerdings keinen empirischen Nachweis. Rebound-Effekte wären möglich, wenn von wendender auf konservierende Bodenbearbeitung umgestellt wird und somit aufgrund des höheren Unkrautdrucks ein Teil der Einsparungen an Pflanzenschutzmitteln kompensiert wird.

Zusammenfassend lässt sich also vermuten, dass das Auftreten von Rebound-Effekten beim Einsatz

von Pflanzenschutzmitteln eher unwahrscheinlich ist¹².

3.3 Ressource Wasser

Wasser ist eine der wichtigsten natürlichen Ressourcen der Welt. Insbesondere das Grundwasser, welches zumeist zur Bewässerung eingesetzt wird, nimmt eine bedeutende Position für die landwirtschaftliche Produktion ein¹³ (45).

Bewässerungstechnologien im Rahmen der Präzisionslandwirtschaft zielen darauf ab, eine bedarfsgerechte Menge zum richtigen Zeitpunkt und am richtigen Ort für die Pflanzen bereitzustellen (21). Sensortechniken können dabei Unterstützung geben, die Bewässerungseffizienz zu steigern, die sich wie folgt darstellen lässt:

$$\text{Bewässerungseffizienz [\%]} = \frac{\text{Konsumwasser}}{\text{Appliziertes Wasser}} \quad [2]$$

wobei, *Konsumwasser* die tatsächlich von den Pflanzen aufgenommene Menge an Wasser und *Appliziertes Wasser* die gesamte ausgebrachte Menge an Wasser beschreiben. Die Differenz zwischen *Konsumwasser* und *Appliziertes Wasser* fließt zurück in den Boden (37).

Der Einsatz von Sensortechniken zur Steigerung der Bewässerungseffizienz zielt darauf, die tatsächlich aufgenommene Menge an Wasser zu steigern und die applizierte Menge an Wasser zu senken. Für die Bestimmung des richtigen Zeitpunktes, des Orts und der benötigten Menge der Bewässerung sind die Bodenfeuchte und der Nutzwasserbedarf der Kultur von zentraler Bedeutung (25).

Bodensensoren könnten mittels NIR die Bodenfeuchte messen (24). Ebenfalls könnten luft- und satellitengestützte TIR-Sensoren die Bodenfeuchte, aber auch den Versorgungszustand der Pflanze messen (54; 25). TIR macht sich dabei zu Nutze, dass die Temperatur des Pflanzenschirms abhängig

¹² Zu differenzieren ist hierbei von gentechnisch manipulierten Pflanzen für die Studien einen Anstieg des Pflanzenschutzmitteleinsatz angeben (z. B. 7).

¹³ Das Umweltbundesamt nimmt z. B. für Deutschland an, dass 85 % des Wassers zur Bewässerung Grund- oder Quellwasser ist (49).

ist vom Hitze- bzw. Trockenstress der Pflanze (54)¹⁴. Auch gibt es Konzepte zur direkten Kopplung von Sensortechniken mit einer teilflächenspezifischen Bewässerung (6).

Durch eine effizientere Bewässerung ergibt sich das Paradox, dass die applizierte Wassermenge sinkt, aber gleichzeitig das Konsumwasser steigt, wodurch insgesamt die nachgefragte Wassermenge steigt (37; 45).

Gemäß Sears et al. (45) kann auch die Nährstoffverfügbarkeit bzw. der Nährstoffverbrauch durch eine bessere Bewässerung ansteigen, wodurch auch die Nachfrage nach Nährstoffen steigen könnte (siehe Abschnitt 3.1).

Empirische Nachweise für das Auftreten von Rebound-Effekten bzw. Jevons Paradox im Rahmen einer Effizienzsteigerung in der Bewässerung lassen sich dabei z. B. bei Li und Zhao (27) sowie Pfeiffer und Lin (37) finden. Die Autoren begründen ihre Befunde damit, dass Landwirte durch die effizientere Bewässerung einen Anreiz haben weiteres Ackerland zu bewässern oder wasserintensivere Kulturen anzubauen.

Zudem könnten Netzwerkeffekte zwischen Landwirten dafür sorgen, dass Landwirte, die bisher nicht bewässert haben, durch die positiven Erfahrungen anderer Landwirte mit der Bewässerung, einen Anreiz erhalten, diese ebenfalls zu nutzen. Dies konnte zum Beispiel von Brudermann et al. (13) für die Technologienutzungsentscheidung für Photovoltaikanlagen festgestellt werden.

Das Umweltbundesamt (49) erwartet zudem explizit für Deutschland, dass die Anschaffung von Beregnungsanlagen bzw. die Ausweitung der Beregnung für Landwirte immer lukrativer wird. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf den Klimawandel, welcher laut Umweltbundesamt (49) zur Verringerung der (Früh-)Sommerniederschläge führt, welche für die Ertrags- und Qualitätsbildung in vielen ackerbaulichen Kulturen von Bedeutung sind. Weiterhin sind Investitionen in Beregnungsanlagen auch in Deutschland durch EU-Gelder förderungsfähig (11).

Insgesamt lässt sich also vermuten, dass eine effizientere Beregnungstechnik bzw. eine

¹⁴ Der zugehörige Crop Water Stress Index (CWSI) basiert auf den Unterschieden zwischen der Lufttemperatur und der Pflanzenschirmtemperatur. Durch eine erhöhte Evaporation sinkt die Temperatur des Pflanzenschirms (25).

Effizienzsteigerung in der Beregnung durch den Einsatz von Sensortechniken im Ackerbau zu Rebound-Effekten bzw. sogar zum Jevons Paradox führen kann.

3.4 Ressource Ackerland

Für die Ressource Ackerland im speziellen lässt sich keine explizite Sensortechnik benennen, die die Effizienz bei der Nutzung steigern kann. Vielmehr ist es das Zusammenspiel von Sensoren, z. B. zur Unterstützung in der Düngemittel- oder Pflanzenschutzmittelapplikation, welches die Effizienz in der Nutzung von Ackerland durch eine erhöhte Produktivität und Profitabilität, steigern kann.

Intuitiv ist folgerichtig, dass eine erhöhte Produktivität und Profitabilität pro Hektar Ackerland dazu führen muss, dass weniger Land zur Herstellung von Nahrungsmitteln bzw. zur Erreichung der monetären Ziele des Landwirts gebraucht wird. Allerdings ist dieser Argumentationspfad wissenschaftlich sehr umstritten (14). Die Frage, ob durch eine gesteigerte Produktivität und Profitabilität Ackerland geschont werden kann bzw. weniger Flächen für Ackerland umgebrochen werden müssen, ist Gegenstand einer wissenschaftlichen Debatte, die sich unter dem Begriff „Borlaug vs. Jevons“ zusammenfassen lässt (36).

Gemäß Borlaug (12) würden ohne die Grüne Revolution, welche die Produktivität des Ackerlands gesteigert hat, 1,2 Milliarden Hektar Ackerland mehr bestellt werden müssen. Die daraus abgeleitete Borlaug-Hypothese¹⁵ besagt also, dass durch die gesteigerte Produktivität bzw. Profitabilität eines Hektar Ackerlandes insgesamt weniger Ackerland benötigt wird. Der mögliche Rebound-Effekt bzw. das Jevons Paradox lässt sich dagegen so beschreiben, dass ein gewinnmaximierender Landwirt infolge der gestiegenen Profitabilität des Ackerlandes durch die Ressourceneinsparung einen Anreiz hat, seine Produktion auszuweiten (42). Gemäß Rudel et al. (43) führt die elastische Nachfrage nach Agrargütern dazu, dass Landwirte aufgrund gesteigener Profitabilität einen Anreiz haben, ihre Produktion auszuweiten.

Pellegrini und Fernández (36) konnten für die globale Pflanzenproduktion nachweisen, dass es trotz der gesteigerten Effizienz in der Ressourcennutzung zu einem Rebound-Effekt infolge erhöhter Nachfrage nach den eingesetzten Ressourcen gekommen ist.

¹⁵ Dies wird in manchen Quellen auch als Land-sparing Hypothese beschrieben (42).

Zusammenfassend lässt sich also für die Ressource Ackerland sagen, dass Rebound-Effekte durch den Einsatz von Sensortechniken möglich sind. Insbesondere die mögliche Nutzung von Skaleneffekten, die mit der Investition in Techniken der Präzisionslandwirtschaft in Verbindung stehen, könnte einen weiteren Anreiz für Landwirte bieten, die Nutzung ihrer Flächen auszuweiten z. B. durch Umbruch von Grünlandflächen oder Entwaldung (51). Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Grünlandumbruch für europäische Landwirte durch die Vorgaben der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) eingeschränkt ist (53).

4 Fazit und Ausblick

Das Ziel des Beitrags besteht darin, mögliche Einsparpotenziale und potenzielle Rebound-Effekte im Ackerbau durch die Digitalisierung in der Landwirtschaft am Beispiel des Einsatzes von Sensortechniken im Rahmen der Präzisionslandwirtschaft anhand eines Literaturüberblicks aufzuzeigen und zu diskutieren.

Der Beitrag konnte zeigen, dass Potenzial besteht, die vier betrachteten Ressourcen Ackerland, Nährstoffe in Form von Düngemitteln, Pflanzenschutzmittel und Wasser durch Einsatz von Sensortechniken zu schonen. Gleichzeitig konnten mögliche Rebound-Effekte sowie Tendenzen zum Jevons Paradox aufgezeigt werden, wodurch das Einsparpotenzial gemindert bzw. verloren geht.

Dies trifft insbesondere auf die Nutzung des Grundwassers zur Beregnung zu. Geringere Rebound-Effekte können für die Nutzung von Nährstoffen in Form von Düngemitteln und für Pflanzenschutzmittel beim Einsatz von Sensortechniken erwartet werden. Eine steigende Nachfrage nach Ackerland lässt sich insgesamt darauf zurückführen, dass z. B. durch einen effizienten Düngereinsatz mit Hilfe von Sensortechniken auch die Profitabilität pro Hektar Anbaufläche steigt und der Landwirt dadurch einen Anreiz erfährt, seine Produktion auszuweiten.

Es sollte allerdings betont werden, dass Rebound-Effekte in der Landwirtschaft nicht ursächlich auf den Einsatz von Sensoren bzw. die Digitalisierung in der Landwirtschaft zurückzuführen sind, da insbesondere das Verhalten des Anwenders eine Rolle spielt.

Trotzdem ergeben sich aus dem Beitrag folgende Implikationen: Die Entwicklung von Politikmaßnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit und des Ressourcenschutzes sowie zur Digitalisierung in der Landwirtschaft, speziell jene Maßnahmen die die Präzisionslandwirtschaft, z. B.

Sensortechniken als effektives Werkzeug zur Zielerreichung in Betracht ziehen, sollte mögliche Rebound-Effekte berücksichtigen.

Hermann et al. (22) zeigten im Rahmen eines Laborexperimentes, dass Politikmaßnahmen, z. B. Zertifikate und Subventionen zur aktiven CO₂-Speicherung in den Böden (CO₂-Sequestrierung) durch verminderte Bodenbearbeitung seitens des Landwirts beitragen können. Allerdings besteht Forschungsbedarf wie genau diese Maßnahmen, z. B. zum Grundwasserschutz, effektiv ausgestaltet werden müssen. Generell fehlt es auch noch an empirischen Nachweisen für das Auftreten von Rebound-Effekten im Rahmen der Digitalisierung in der Landwirtschaft. Um beide Forschungslücken zu schließen könnten wie bei Hermann et al. (22) Laborexperimente und Planspiele für erste empirische Ergebnisse genutzt werden.

Zusammenfassung

Rebound Effekte in der Präzisionslandwirtschaft

– Ein Kommentar

Vom Einsatz digitaler Informations- und Kommunikationstechnologien wird sich ein großer Beitrag zum Umwelt- und Ressourcenschutz versprochen. Jedoch besteht die Gefahr des Auftretens von Rebound-Effekten. Als Rebound-Effekt bezeichnet man eine Vielzahl an Mechanismen die dazu führen, dass die Einsparung einer Ressource infolge des Einsatzes einer Technologie durch eine erhöhte Nachfrage nach der Ressource kompensiert wird. Übersteigt die erhöhte Nachfrage sogar die Einsparungen spricht man vom Jevons Paradox. Jevons Paradox und Rebound Effekte gehen dabei allgemein auf das adaptive Verhalten von Konsumenten und Produzenten zurück. Informations- und Kommunikationstechnologien finden in der Landschaft durch Einsatz von Technologien im Rahmen der Präzisionslandwirtschaft z. B. durch den Einsatz der Sensortechniken Anwendung. Jedoch sind Rebound-Effekte in diesem Zusammenhang bisher wenig diskutiert. Der vorliegende Beitrag schließt diese Forschungslücke, indem potentielle Rebound-Effekte auf Basis einer Literaturrecherche für die Ressourcen Ackerland, Wasser, Nährstoffe in Form von Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln diskutiert werden. Der Beitrag zeigt, dass Rebound-Effekte vor allem dadurch entstehen, wenn der Einsatz der ressourcensparenden Technologie die Profitabilität des Ressourcen-Einsatzes steigert und somit ein Anreiz für den Landwirt entsteht, eine intensivere Nutzung der Ressource anzustreben. Der Beitrag liefert damit wichtige Implikationen für die Entwicklung von Politikmaßnahmen im Rahmen der Nachhaltigkeit und des Ressourcenschutzes in der Landwirtschaft.

Summary

Rebound effects in precision agriculture – A commentary

Information and communication technologies are expected to considerably contribute to environmental and resource protection. However, application of information and communication technologies comes with the risk of rebound effects. Rebound effects designate a multiplicity of mechanisms which result in the saving of a resource through introduction of a resource saving technology being compensated by an increase in demand for the resource.

If the increase in consumption even exceeds the potential savings of the resource this is known as Jevons Paradox. Rebound effects and Jevons paradox occur due to the adaptive behaviour of consumer and producer. Information and communication technologies are used in agriculture in the context of precision farming, for instance with sensor technologies. However, potential rebound effects in the application of precision farming technologies have hardly been an issue of discussion in literature to date. This article aims to fill this research gap by discussing the occurrence of potential rebound effects for the resources agricultural land, water, nutrients in terms of fertilizers and plant protection products, based on a literature search. The article shows that one of the main reasons for the occurrence of rebound effects are financial incentives for farmers to expand or intensify production through use of precision farming technologies if, as a result of the application of precision farming technologies, costs can be lowered, or profitability can be increased. This article therefore provides important implications for policy makers in terms of policies regarding sustainability and resource protection in agriculture.

Literatur

- [1] Abbasi, Abu Z.; Islam, Noman; Shaikh, Zubair A. (2014): A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. In: *Computer Standards & Interfaces* 36 (2), S. 263–270.
- [2] Adamchuk, Viacheslav I.; Hummel, J. W.; Morgan, M. T.; Upadhyaya, S. K. (2004): On-the-go soil sensors for precision agriculture. In: *Computers and electronics in agriculture* 44 (1), S. 71–91.
- [3] Adrian, Anne M.; Norwood, Shannon H.; Mask, Paul L. (2005): Producers' perceptions and attitudes toward precision agriculture technologies. In: *Computers and electronics in agriculture* 48 (3), S. 256–271.
- [4] Alcott, Blake (2005): Jevons' paradox. In: *Ecological Economics* 54 (1), S. 9–21.
- [5] Alexandratos, Nikoas; Bruinsma, Jelle (2012): World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. Rome, Italy: FAO.
- [6] Barker, J. B.; Heeren, Derek M.; Neale, Christopher M.U.; Rudnick, Daran R. (2018): Evaluation of variable rate irrigation using a remote-sensing-based model. In: *Agricultural Water Management* 203, S. 63–74.
- [7] Benbrook, Charles M. (2012): Impacts of genetically engineered crops on pesticide use in the US—the first sixteen years. In: *Environmental Sciences Europe* 24 (1), S. 24.
- [8] Bentzen, Jan (2004): Estimating the rebound effect in US manufacturing energy consumption. In: *Energy economics* 26 (1), S. 123–134.
- [9] Berkhout, Frans; Hertin, Julia (2001): Impacts of information and communication technologies on environmental sustainability. Speculations and evidence. Report to the OECD, University of Sussex, Brighton, Volume 21.
- [10] Berkhout, Peter H. G.; Muskens, Jos C.; Velthuisen, Jan W. (2000): Defining the rebound effect. In: *Energy policy* 28 (6-7), S. 425–432.
- [11] BMWI (2019): Agrarinvestitionsförderungsprogramm (APF). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- [12] Borlaug, Norman (2007): Feeding a hungry world. In: *Science* 318 (5849), S. 359.
- [13] Brudermann, Thomas; Reinsberger, Kathrin; Orthofer, Anita; Kislinger, Martin; Posch, Alfred (2013): Photovoltaics in agriculture. A case study on decision making of farmers. In: *Energy policy* 61, S. 96–103.
- [14] Byerlee, Derek; Stevenson, James; Villoria, Nelson (2014): Does intensification slow crop land expansion or encourage deforestation? In: *Global food security* 3 (2), S. 92–98.
- [15] Colaço, Andre F.; Bramley, Rob G.V. (2018): Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? In: *Field Crops Research* 218, S. 126–140.
- [16] EU SCAR (2012): Agricultural knowledge and innovation systems in transition. Brüssel, Belgien: EU.
- [17] Gadanakis, Yiorgos; Bennett, Richard; Park, Julian; Areal, Francisco Jose (2015): Improving productivity and water use efficiency. A case study of farms in England. In: *Agricultural Water Management* 160, S. 22–32.
- [18] Gonzalez-de-Santos, Pablo; Ribeiro, Angela; Fernandez-Quintanilla, Cesar; Lopez-Granados, Francisca; Brandstötter, Michael; Tomic, Slobodanka et al. (2017): Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture. In: *Precision agriculture* 18 (4), S. 574–614.
- [19] Greening, Lorna A.; Greene, David L.; Difiglio, Carmen (2000): Energy efficiency and consumption—the rebound effect—a survey. In: *Energy policy* 28 (6-7), S. 389–401.
- [20] Gröger, Martin (2010): Das gesetz vom minimum. Liebig oder sprengel? In: *Chemie in unserer Zeit* 44 (5), S. 340–343.
- [21] Harun, Ahmand N.; Kassim, Mohamed R. M.; Mat, Ibrahim; Ramli, Siti S. (2015): Precision irrigation using wireless sensor network. In: *Proceedings of the 2015 International Conference on Smart Sensors and Application (ICSSA) held 26-28 May 2015, Kuala Lumpur, Malaysia*.

- [22] Hermann, Daniel; Sauthoff, Saramena; Musshoff, Oliver (2017): Ex-ante evaluation of policy measures to enhance carbon sequestration in agricultural soils. In: *Ecological Economics* 140 (Oktober 2017), S. 241–250.
- [23] Herring, Horace; Roy, Robin (2007): Technological innovation, energy efficient design and the rebound effect. In: *Technovation* 27 (4), S. 194–203.
- [24] Hummel, John W.; Sudduth, Kenneth A.; Hollinger, Steven E. (2001): Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor. In: *Computers and electronics in agriculture* 32 (2), S. 149–165.
- [25] Khanal, Sami; Fulton, John; Shearer, Scott (2017): An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. In: *Computers and electronics in agriculture* 139, S. 22–32.
- [26] Khazzoom, J. Daniel (1980): Economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances. In: *The energy journal* 1 (4), S. 21–40.
- [27] Li, Haoyang; Zhao, Jinhua (2018): Rebound effects of new irrigation technologies. The role of water rights. In: *American Journal of Agricultural Economics* 100 (3), S. 786–808.
- [28] Liaghat, Shohreh; Balasundram, Siva Kumar (2010): A review. The role of remote sensing in precision agriculture. In: *American journal of agricultural and biological sciences* 5 (1), S. 50–55.
- [29] Lindblom, Jessica; Lundström, Christina; Ljung, Magnus; Jonsson, Anders (2017): Promoting sustainable intensification in precision agriculture. Review of decision support systems development and strategies. In: *Precision agriculture* 18 (3).
- [30] Lottes, Philipp; Hörferlin, Markus; Sander, Slawomir; Stachniss, Cyrill (2017): Effective Vision-based Classification for Separating Sugar Beets and Weeds for Precision Farming. In: *J. Field Robotics* 34 (6), S. 1160–1178.
- [31] Lowenberg-DeBoer, James; Erickson, Bruce (2019): Setting the record straight on precision agriculture adoption. In: *Agronomy Journal*. DOI: 10.2134/agronj2018.12.0779.
- [32] Metternicht, Graciela (2008): Remote Sensing. In: Karen Kemp (Hg.): *Encyclopedia of geographic information science*. New York: Sage Publications, S. 365–368.
- [33] Mulla, David J. (2013): Twenty five years of remote sensing in precision agriculture. Key advances and remaining knowledge gaps. In: *Biosystems engineering* 114 (4), S. 358–371.
- [34] National Research Council (1997): *Precision Agriculture in the 21st Century. Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. Washington, DC: The National Academies Press. Online verfügbar unter <https://www.nap.edu/catalog/5491/precision-agriculture-in-the-21st-century-geospatial-and-information-technologies>, zuletzt geprüft am 18.06.2019.
- [35] Odeck, James (2009): Statistical precision of DEA and Malmquist indices. A bootstrap application to Norwegian grain producers. In: *Omega* 37 (5), S. 1007–1017.
- [36] Pellegrini, Pedro; Fernández, Roberto J. (2018): Crop intensification, land use, and on-farm energy-use efficiency during the worldwide spread of the green revolution. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (10), S. 2335–2340.
- [37] Pfeiffer, Lisa; Lin, C-Y. Cynthia (2014): Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 67 (2), S. 189–208.
- [38] Polimeni, John M.; Mayumi, Kozo; Giampietro, Mario; Alcott, Blake (2008): *The Jevons paradox and the myth of resource efficiency improvements*. London: Earthscan.
- [39] Raun, William R.; Solie, John B.; Johnson, Gordon V.; Stone, Marvin L.; Mullen, Robert W.; Freeman, Kyle W. et al. (2002): Improving Nitrogen Use Efficiency in Cereal Grain Production with Optical Sensing and Variable Rate Application. In: *Agronomy Journal* 94 (4), S. 815.
- [40] Ravier, Clémence; Quemada, Miguel; Jeuffroy, Marie-Hélène (2017): Use of a chlorophyll meter to assess nitrogen nutrition index during the growth cycle in winter wheat. In: *Field Crops Research* 214, S. 73–82.

- [41] Rivera, Miriam Börjesson; Håkansson, Cecilia; Svenfelt, Åsa; Finnveden, Göran (2014): Including second order effects in environmental assessments of ICT. In: *Environmental Modelling & Software* 56, S. 105–115.
- [42] Rodriguez Garcia, V.; Meyfroidt, P.; Gaspart, F. (2018): Agricultural intensification and land use change. A panel cointegration approach to test induced intensification, land sparing and rebound-effect. In: *Proceedings of the 30th Conference of Agricultural Economist. July 28th - August 2nd, Vancouver, Kanada*.
- [43] Rudel, Thomas K.; Schneider, Laura; Uriarte, Maria; Turner, Billie Lee; DeFries, Ruth; Lawrence, Deborah et al. (2009): Agricultural intensification and changes in cultivated areas, 1970–2005. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (49), S. 20675–20680.
- [44] Schieffer, Jack; Dillon, Carl (2015): The economic and environmental impacts of precision agriculture and interactions with agro-environmental policy. In: *Precision agriculture* 16 (1), S. 46–61.
- [45] Sears, Louis; Caparelli, Joseph; Lee, Clouse; Pan, Devon; Strandberg, Gillian; Vuu, Linh; Lin Lawell, C-Y (2018): Jevons' paradox and efficient irrigation technology. In: *Sustainability* 10 (5), S. 1590.
- [46] Sorrell, Steve (2009): Jevons' Paradox revisited. The evidence for backfire from improved energy efficiency. In: *Energy policy* 37 (4), S. 1456–1469.
- [47] Sorrell, Steve; Dimitropoulos, John (2008): The rebound effect. Microeconomic definitions, limitations and extensions. In: *Ecological Economics* 65 (3), S. 636–649.
- [48] Špicka, Jindřich (2015): Changes in the energy efficiency of crop production in EU countries. In: Asta Raupelienė und Judita Černiauskienė (Hg.): *Proceedings of the 7th International Scientific Conference Rural Development 2015. Rural Development 2015. Aleksandras Stulginskis University, Lithuania, 19.11.2015 - 20.11.2015*.
- [49] Umweltbundesamt (2015): Landwirtschaftliche Berechnung. Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den deutschen Klimawandel. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/lw-r-6-das-indikator#textpart-1>, zuletzt geprüft am 18.06.2019.
- [50] Valin, Hugo; Sands, Ronald D.; van der Mensbrugge, Dominique; Nelson, Gerald C.; Ahammad, Helal; Blanc, Elodie et al. (2014): The future of food demand. Understanding differences in global economic models. In: *Agricultural Economics* 45 (1), S. 51–67.
- [51] Villoria, Nelson B.; Byerlee, Dereck; Stevenson, James (2014): The Effects of Agricultural Technological Progress on Deforestation. What Do We Really Know? In: *Applied Economic Perspectives and Policy* 36 (2), S. 211–237.
- [52] Walter, Achim; Finger, Robert; Huber, Robert; Buchmann, Nina (2017): Opinion. Smart farming is key to developing sustainable agriculture. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (24), S. 6148–6150.
- [53] Weller von Ahlefeld, Paul Johann; Michels, Marius (2019): Die Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik 2013—Ein Literaturüberblick zur Umsetzung und Effektivität der Greening-Maßnahmen. In: *Berichte über Landwirtschaft-Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* 97 (1), S. 1–26.
<http://dx.doi.org/10.12767/buel.v97i1.232>
- [54] Wójtowicz, Marek; Wójtowicz, Andrzej; Piekarczyk, Jan (2016): Application of remote sensing methods in agriculture. In: *Communications in Biometry and Crop Science* 11 (1), S. 31–50.
- [55] York, Richard; McGee, Julius Alexander (2016): Understanding the Jevons paradox. In: *Environmental Sociology* 2 (1), S. 77–87.
- [56] Zhang, Naiqian; Wang, Maohua; Wang, Ning (2002): Precision agriculture—a worldwide overview. In: *Computers and electronics in agriculture* 36 (2-3), S. 113–132.
- [57] Zhu, Xueqin; Lansink, Alfons Oude (2010): Impact of CAP subsidies on technical efficiency of crop farms in Germany, the Netherlands and Sweden. In: *Journal of Agricultural Economics* 61 (3), S. 545–564.

Autorenanschrift

Paul Johann Weller von Ahlefeld
Department für Agrarökonomie und RURale Entwicklung
Arbeitsbereich Landwirtschaftliche Betriebslehre
Georg-August-Universität Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 5
37073 Göttingen
E-Mail-Adresse: paul.weller-von-ahlefeld@uni-goettingen.de

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Oliver Mußhoff und Herrn Marius Michels für wertvolle Hinweise bei der Finalisierung dieses Beitrags.