

Innovationsreport

Ökologische Effekte smarterer Landwirtschaftsmaschinen und Software im landwirtschaftlichen Pflanzenbau



Foto: Agrotech Valley Forum e.V.

Gefördert durch



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektträger



Bundesanstalt für
Landwirtschaft und Ernährung



EXPERIMENTIERFELD
AGRO-NORDWEST

Innovationsreport

Ökologische Effekte smarterer Landwirtschaftsmaschinen und Software im landwirtschaftlichen Pflanzenbau

Experimentierfeld Agro-Nordwest

Autor*innen

Dr. Siegfried Behrendt
Kathrin Gegner

s.behrendt@izt.de
k.gegner@izt.de

15. Oktober 2022

IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
www.izt.de

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund: Experimentierfeld Agro-Nordwest	4
2	Vorgehensweise und Aufbau des Innovationsreports	6
3	Digitalisierung der Landwirtschaft – eine Einordnung	7
4	Welchen Beitrag kann die Digitalisierung der Landwirtschaft zum Ressourcen-, Klima-, Umwelt- und Naturschutz leisten? – Der Kenntnisstand.....	9
	4.1 Allgemeine Feststellungen.....	9
	4.2 Reduzierter Energieverbrauch	11
	4.3 Reduzierter Wasserverbrauch	12
	4.4 Reduzierter Düngemiteleinsatz	12
	4.5 Reduzierter Pestizideinsatz.....	13
	4.6 Verringerung von Treibhausgasemissionen.....	13
	4.7 Verbesserung der Bodenstruktur	14
	4.8 Förderung der Biodiversität.....	14
	4.9 Zusammenfassung	15
5	Welche Umweltentlastungspotenziale sind in den Schwerpunkten des Experimentierfeldes zu erwarten?	16
	5.1 NIRS-Technologie in der teilflächenspezifischen Ausbringung organischer Düngemittel.....	17
	5.2 Autonome Feldroboter zur Unkrautregulierung	18
	5.3 Drohnendaten für einen teilflächenspezifischen Pflanzenschutz	20
	5.4 Drohnendatenbasierte Entscheidungsunterstützung im Klee grasmanagement	21
	5.5 Autonome Fütterung	23
	5.6 Parallelfahrssysteme	23
	5.7 Digitale Datenerfassung zur Optimierung der Prozesskette Zuckerrübe	24
	5.8 Zusammenfassung	25
6	Unter welchen Voraussetzungen können die ökologischen Entlastungspotenziale der Digitalisierung erschlossen werden?.....	27
	6.1 Potenzielle Wirkungen auf der Makroebene einer umfassend vernetzten Landwirtschaft	27
	6.2 Ressourcen- und Energieverbrauch digitaler Agrartechnologien: Vernachlässigbar oder blinder Fleck der Forschung?	28
	6.3 Nicht-intendierte Effekte und Rebound-Effekte.....	29
	6.4 Perspektiven der Digitalisierung für die nachhaltige Transformation der Landwirtschaft	31
7	Fazit	32

1 Hintergrund: Experimentierfeld Agro-Nordwest

Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) fördert mit 14 bundesweiten digitalen Experimentierfeldern die Digitalisierung in der Landwirtschaft. Die Projekte sollen dabei helfen, digitale Technologien im Pflanzenbau und in der Tierhaltung zu erforschen und deren Eignung für die Praxis zu überprüfen, so dass sie optimal zum Schutz der Umwelt, Steigerung des Tierwohls und der Biodiversität sowie zur Arbeitserleichterung eingesetzt werden können.

Im Rahmen des Experimentierfeldes „Agro-Nordwest“, an dem zahlreiche Forschungspartner und Betriebe entlang der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette beteiligt sind (www.agro-nordwest.de), führte das IZT eine Reihe von Workshops mit Wissenschaftlern¹ aus dem Experimentierfeld Agro-Nordwest sowie anderen Experimentierfeldern und Forschungseinrichtungen, Landwirten, Verbandsvertretern, Landtechnikherstellern und Start-ups durch, die Nutzenpotenziale (für die Betriebe, aber auch für die natürliche Umwelt), die zu erwartenden Veränderungen (im Landwirtschaftssektor und in den mit ihm verbundenen Wirtschaftsbereichen) sowie auch mögliche Innovationshemmnisse und Risiken thematisieren.

¹ Ein Hinweis vorab: Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für beiderlei Geschlecht.

Abbildung 1: Themen der IZT-Workshopreihe im Projekt „Agro-Nordwest“ und Fokus dieses Innovationsreports

1.	Betrieblicher Nutzen smarter Landmaschinen, Software und Systeme: Welche Erwartungen und Erkenntnisse gibt es zum betrieblichen Mehrwert? Welchen Nutzen schätzen Landwirtschaftsbetriebe besonders?	
2.	Betriebliche Kosten und Wirtschaftlichkeit smarter Landmaschinen, Software und Systeme: Sind Investitionskosten eine zentrale Innovationshürde? Welche Rolle spielen Betriebskosten? Digitalisierung vor allem für große Landwirtschaftsbetriebe?	
3.	Ökologische Effekte smarter Landmaschinen, Software und Systeme: Erfüllen sich die Erwartungen? Gibt es nicht-intendierte Nebenfolgen?	
4.	Digitalisierte Landwirtschaft zwischen Dateneffizienz und Daten-Overload: Wie können Daten effizient und effektiv bereitgestellt und verwertet werden? Wie lassen sich Transparenz und Datensouveränität sichern?	
5.	Sicherheit und Kompatibilität smarter Landmaschinen, Software und Systeme: Welche neuen Sicherheitslösungen braucht es? Wie sind die derzeitigen Standardisierungsbemühungen zu bewerten und weiterzuentwickeln?	
6.	Neue Produktnutzungssysteme, Wirtschaftsakteure und Geschäftsmodelle im Umfeld einer digitalisierten Landwirtschaft: Wie verändern sich die Landwirtschaft und ihre Wertschöpfungskette? Entstehen neue Abhängigkeiten? Wie lässt sich Resilienz schaffen?	
7.	Zwischen Arbeitsplatzabbau und neuen, qualifizierten Arbeitsplätzen: Welche neuen Beschäftigungsprofile und Arbeitsbedingungen entstehen? Welche Handlungsbedarfe erwachsen?	
8.	Beschleunigte Digitalisierung der Landwirtschaft: Welche politischen Rahmenbedingungen sind wirksam bzw. erforderlich?	

Quelle: IZT

Entlang der Workshopthemen wurden Ansätze identifiziert und diskutiert, wie Innovationshemmnisse abgebaut und Risiken minimiert werden können, um die Nutzenpotenziale der Digitalisierung der Landwirtschaft zu erschließen. Das Ergebnis sind Innovationsreports. Sie basieren auf Literaturanalysen und Expertengesprächen und spiegeln die Diskussionen auf den korrespondierenden Workshops wider.

Der vorliegende Innovationsreport befasst sich mit den ökologischen Effekten und Potenzialen smarter Landwirtschaftsmaschinen, Software und Systeme. Im Mittelpunkt stehen folgende Fragen:

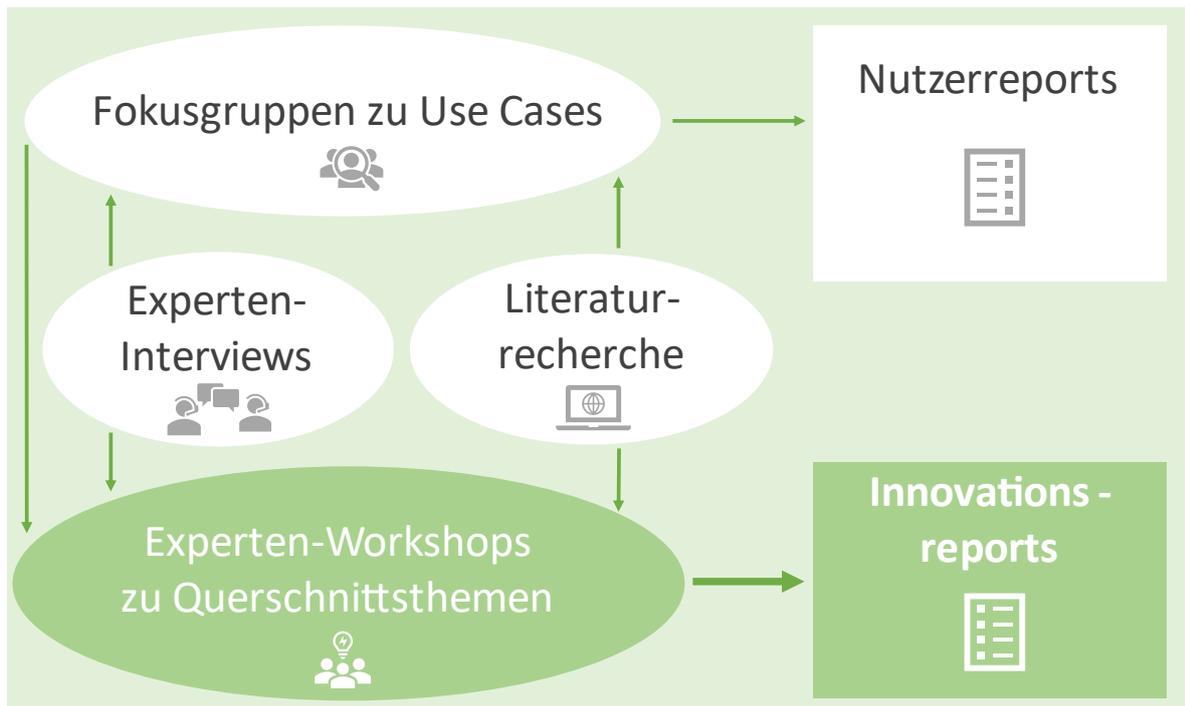
- Wie stellt sich der empirische Kenntnisstand hinsichtlich der Frage dar, welchen Beitrag die Digitalisierung der Landwirtschaft zum Ressourcen- und Umweltschutz leistet bzw. leisten kann?
- Welche Umweltentlastungspotenziale sind in den Schwerpunkten des Experimentierfeldes Agro-Nordwest zu erwarten?
- Unter welchen Voraussetzungen können die ökologischen Entlastungspotenziale der Digitalisierung erschlossen werden?

2 Vorgehensweise und Aufbau des Innovationsreports

Ausgehend von ausgewählten Anwendungsbereichen des Experimentierfeldes Agro-Nordwest² und erweitert um eine Literaturanalyse sowie Experteninterviews mit breiterem Anwendungsfokus wurde eine Auswertung der erwarteten bzw. nachgewiesenen ökologischen Effekte der Digitalisierung in der Landwirtschaft vorgenommen. Innerhalb des Experimentierfeldes Agro-Nordwest wurden außerdem Einzel- und Gruppengespräche durchgeführt und es flossen Erkenntnisse aus durchgeführten Fokusgruppen-Diskussionsrunden zur „Nutzerintegration“ mit Landwirtschaftsbetrieben und Lohnunternehmern in die Auswertung ein. Nach einer Einordnung und begrifflichen Klärung der „Digitalisierung der Landwirtschaft“, wie sie dem vorliegenden Inputpapier zugrunde liegt (Kapitel 3) wird der (potenzielle) Beitrag der Digitalisierung in der Landwirtschaft zur Ressourcen-, Klima-, Umwelt- und Naturschutz allgemein (Kapitel 4) und anhand konkreter Anwendungsfälle des Experimentierfeldes Agro-Nordwest (Kapitel 5) erläutert. In Kapitel 6 werden die Potenziale der Digitalisierung in der Unterstützung einer Transformation zur ressourcen- und umweltschonenden Landwirtschaft analysiert. Das Papier endet mit einem Fazit (Kapitel 7).

² thematischer Fokus auf Informationsgewinnung mittels Drohnen, Kameras bzw. Sensorik, teilflächenspezifische Bodenbearbeitung und GPS-gesteuerte, autonome Feldrobotik im Pflanzenbau

Abbildung 2: Einordnung der Innovationsreports in die IZT-Forschungsformate im Projekt „Agro-Nordwest“

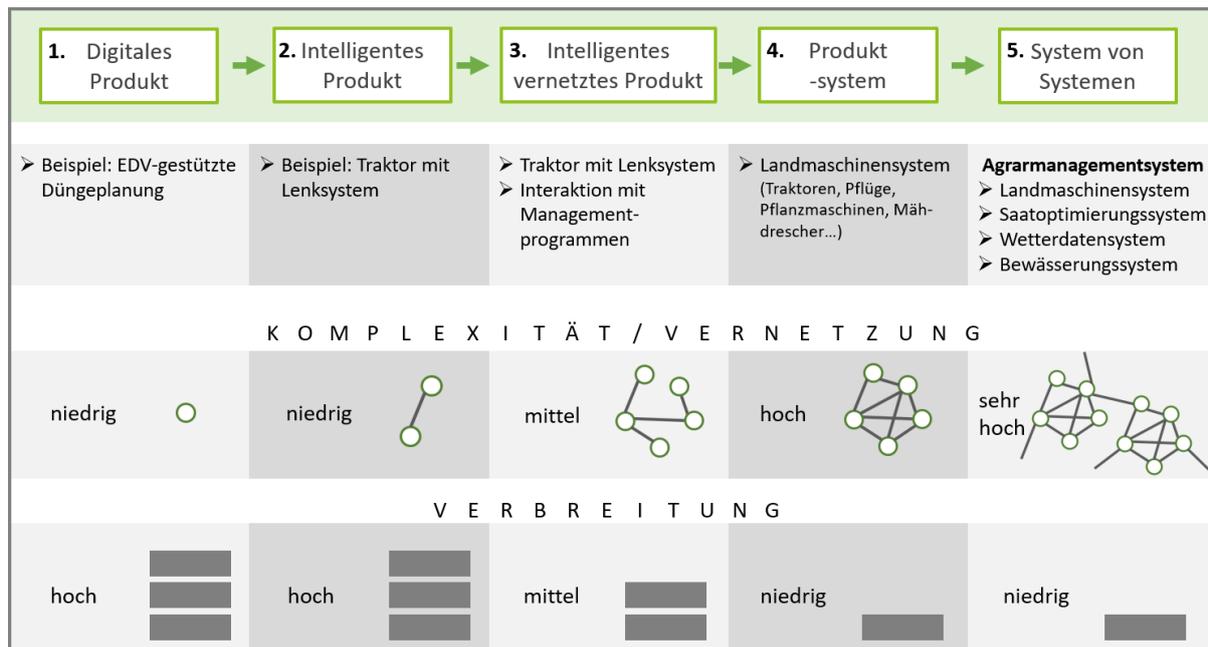


Quelle: IZT

3 Digitalisierung der Landwirtschaft – eine Einordnung

Die Digitalisierung der Landwirtschaft ist bereits seit Jahrzehnten ein Trend. Nach Porter und Heppelmann (2014) können in der Landwirtschaft grundsätzlich verschiedene Stufen der Digitalisierung unterschieden werden: Die erste Stufe umfasst die Verwendung nur eines einzelnen „digitalen“ Produktes (z. B. EDV-gestützte Düngeplanung). Die nächste Stufe beinhaltet die Nutzung smarter Produkte. Dies könnte z. B. ein Schlepper mit verschiedenen digitalen Steuerungen sein. Auf dritter Stufe steht ein smart vernetztes Produkt. Hierbei wird der Schlepper mit Managementprogrammen vernetzt, die beispielsweise verschiedene Daten empfangen und verarbeiten können. Stufe vier der Digitalisierung umfasst ein digital vernetztes Produktionssystem. Hierbei sind nicht nur einzelne Schlepper vernetzt, sondern auch die je nach Produktionssystem und Prozessen benötigten Geräte und Maschinen. Die höchste Stufe der Digitalisierung ist ein System von Systemen, wobei unterschiedliche Systeme miteinander kommunizieren (Internet of Things) (Porter und Heppelmann 2014 s. auch BMEL 2021).

Abbildung 3: Stufen der Digitalisierung der Landwirtschaft nach Porter und Heppelmann



Quelle: eigene Darstellung (Porter und Heppelmann 2014; Kehl et al. 2021; Gscheidle 2022)

Typisch für die Digitalisierung der Landwirtschaft generell sind folgende zwei Eigenschaften: Zum einen kann die landwirtschaftliche Produktion aufgrund der verfügbaren Datenmengen mit einer sehr hohen Präzision erfolgen. Zum anderen werden die landwirtschaftlichen Managemententscheidungen, die zuvor weitgehend von den Landwirten aufgrund ihres Wissens und ihrer Erfahrungen gefällt wurden, zunehmend von einem vernetzten System übernommen, welches selbstständig Entscheidungsparameter aus mathematischen Modellen zusammenstellt und verarbeitet (Martínez 2016, S. 14–17, unter Verweis auf Brakensiek et al. 2016; Spoerer und Streb 2013; Springer Gabler Verlag 2018).³ Das BMEL (2021, S. 7) betont zum einen die „Überführung von Informationen von einer analogen in eine digitale Speicherung“ und zum anderen die „Automation von Prozessen und Geschäftsmodellen durch das Vernetzen von digitaler Technik, Informationen und Menschen“. Bereiche der Digitalisierung umfassen demnach unter anderem die Sensorik, Robotik, Automation, künstliche Intelligenz und Big Data.

Je nach Referenzpunkt für Technologien und Anwendungen ist die Digitalisierung der Landwirtschaft sehr weit fortgeschritten oder sie steht eher erst am Anfang. So nutzen laut Rohleder et al. (2020) 82 Prozent der landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland Smart-Farming-Technologien, was auf eine große Verbreitung hindeutet. Kehl et al. (2021, S. 102) hingegen gehen davon aus, dass die Anwendung teilflächenspezifischer Bewirtschaftungsmaßnahmen noch relativ gering ist. Gleichzeitig verbindet sich mit den Möglichkeiten digitaler Agrartechnologien die Vision, „landwirtschaftliche Maschinen und Prozesse umfassend miteinander zu vernetzen, und zwar nicht nur auf Betriebsebene, sondern weit darüber hinaus – von Futtermittel- und Saatgutherstellung, über den Anbau der landwirtschaftlichen Erzeugnisse bis hin zu Lebensmittelverarbeitung und Einzelhandel. „Ziel ist letztendlich,

³ Eine andere Systematisierung der landwirtschaftlichen Entwicklung fokussiert auf die industriellen Entwicklungsstufen Industrie 1.0 bis 4.0 und leitet entsprechend die Stufen Landwirtschaft 1.0 bis 4.0 ab. Dabei entspricht Landwirtschaft 4.0 weitgehend der Digitalisierung der Landwirtschaft, wie sie im vorliegenden Papier beschrieben wird (vgl. MLR o.D.).

nicht nur einzelne Prozessabschnitte, sondern gesamte Wertschöpfungsketten zu optimieren, im Sinne einer möglichst effizienten, aber auch ressourcenschonenden Agrar- und Lebensmittelproduktion“ (Kehl et al. 2021, S. 5). Precision Farming, Smart Farming, Digital Farming und Landwirtschaft 4.0 fungieren dabei als integrative Leitkonzepte für Forschung und Entwicklung und sind ein Entwicklungsschwerpunkt vieler Hersteller von Agrarmaschinen und -techniken. Gleichzeitig liefern die Leitbilder eine Orientierung für darauf ausgerichtete, innovationspolitische Aktivitäten, die ihren Ausdruck u.a. in den Experimentierfeldern zur Digitalisierung der Landwirtschaft finden (BMEL 2019). Ziel ist es, die Landwirtschaft für die auf sie zukommenden Veränderungen „fit zu machen“. Gleichzeitig wird die Digitalisierung als Lösungsansatz angesehen, um den vielfältigen Herausforderungen an die Landwirtschaft⁴ erfolgreich zu begegnen, indem beispielsweise die Arbeitsbedingungen in der Landwirtschaft verbessert, der Arbeitskräftebedarf in unattraktiven Arbeitsbereichen verringert, Produktivitätssteigerungen erzielt und Umweltentlastungspotenziale erschlossen werden können. Hinsichtlich der Umwelteffekte, die hier interessieren, wird erwartet, dass sich mit der Weiterentwicklung und Verbreitung von digitalen Applikationen in der Landwirtschaft neue Potenziale zum Umwelt-, Ressourcen- und Klimaschutz ergeben, die den ökologischen Fußabdruck der Landwirtschaft deutlich reduzieren können (Kehl et al. 2021; Walter et al. 2017).

4 Welchen Beitrag kann die Digitalisierung der Landwirtschaft zum Ressourcen-, Klima-, Umwelt- und Naturschutz leisten? – Der Kenntnisstand

4.1 Allgemeine Feststellungen

Die Literaturrecherche zu den ökologischen Wirkungen der Digitalisierung der Landwirtschaft ergibt ein nüchternes Ergebnis. Obwohl die Erwartungen an eine Digitalisierung der Landwirtschaft zum Ressourcen-, Klima-, Umwelt- und Naturschutz vielfach sehr hoch sind (Walter et al. 2017; Finger et al. 2019; Nüssel 2018), ist bemerkenswerter Weise festzustellen, dass kaum empirische und systematische Untersuchungen bis dato darüber existieren. Dies bestätigt auch die jüngst publizierte Untersuchung des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag mit dem Titel „Digitalisierung der Landwirtschaft: gesellschaftliche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Effekte“ (Kehl et al. 2021).

„Während Ausgestaltung und Funktionsfähigkeit sowie die Wirtschaftlichkeit intensiv untersucht sind, gibt es nur eine begrenzte Anzahl wissenschaftlicher Studien zu den Umwelteffekten von Technologien der Präzisionslandwirtschaft, in der Regel basierend auf Feldversuchen oder Modellberechnungen. Die Veränderung von Umweltwirkungen durch in der landwirtschaftlichen Praxis eingeführte Technologien ist bislang fast gar nicht wissenschaftlich dokumentiert. Wenn umweltrelevante Erfahrungen aus der Praxis berichtet werden, handelt es sich oftmals um Vorträge oder

⁴ Stichworte: Wettbewerb und Preisdruck auf internationalen Märkten, Arbeitskräftemangel, natürliche Optimierungsgrenzen, Nitratbelastungen

Veröffentlichungen von Einzelergebnissen von landwirtschaftlichen Betriebsleitern bzw. Technologieanbietern, die wissenschaftlichen Standards nicht genügen. Dies bedeutet, dass die wissenschaftliche Datenbasis zu Umweltwirkungen bisher begrenzt ist.“ (Kehl et al. 2021, S. 11)

Ein weiteres Ergebnis der Literaturlauswertung ist, dass sich die vorliegenden Untersuchungen weitgehend auf die mit den Anwendungen von digitalen Agrartechnologien verbundenen Umwelteffekte auf der Mikroebene konzentrieren. Dabei geht es beispielsweise um den verringerten Einsatz von Inputressourcen, wie Dünge- und Pflanzenschutzmittel, oder den geringeren Eintrag von Stickstoff in den Boden. Zu Effekten auf der Makroebene gibt es nur wenige Untersuchungen (Gotsch et al. 2020; Kehl et al. 2021). Hier kommt es zu systemischen Effekten, die über veränderte Kosten und Nachfrage zu neuen Produktionsstrukturen führen, die wiederum Umweltwirkungen verursachen (Kehl et al. 2021). Rebound-Effekte gehören ebenfalls dazu. Rebound-Effekte sind 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“ (Weller von Ahlefeld 2019, S. 4). Zu den wenig untersuchten Aspekten gehören außerdem die Umweltwirkungen infolge der Produktion, Nutzung, Einsatz und Entsorgung von digitalen Endgeräten und Infrastrukturen (wie Telekommunikationssysteme, Netzinfrastrukturen, Rechenzentren etc.), die in der landwirtschaftlichen Praxis eingesetzt werden. Gotsch et al. (2020) nehmen an, dass im Bereich der Landwirtschaft die direkten Effekte durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechniken (IKT) als gering einzuschätzen sind. Das heißt, die „Veränderungen von Stoffströmen und dem Energieverbrauch für die Herstellung, den Betrieb und die Entsorgung der dafür eingesetzten IKT selbst sind relativ unbedeutend im Vergleich zu den Stoffströmen und Energieverbräuchen durch die indirekten Effizienz- und Ersatzwirkungen von IKT“ (Gotsch et al. 2020, S. 22). Quantitativ abgeschätzt und empirisch belegt wird dies allerdings nicht. Die Einschätzungen von Gotsch et al. (2020) fußen auf einem Stakeholder-Dialog aus dem Jahr 2018, der mit chancenbetonten Teilnehmenden stattgefunden hat. Der Einfluss neuer Entwicklungen wie dem 5G-Mobilfunkstandard auf den Energieverbrauch wird hierbei nicht abgebildet.

Insgesamt ist festzustellen, dass Makroanalysen und systemische Betrachtungen, die alle Effekt-Ebenen der Digitalisierung (Fichter et al. 2012; Weller von Ahlefeld 2019) der Landwirtschaft berücksichtigen, also First-Order-Effekte (direkte Effekte infolge der Produktion, Nutzung, Einsatz und Entsorgung von digitalen Geräten und Infrastrukturen), Second-Order-Effekte (indirekte Effekte durch Einfluss der Nutzung von digitalen Anwendungen auf die Umwelt) und Third-Order-Effekte (indirekte Umwelteffekte durch Veränderungen der Produktionsstrukturen, Wirtschaftswachstum und Rebound-Effekte) fehlen (siehe Tabelle 1). Belastbare Daten und Fakten über die systemischen Umweltwirkungen der Digitalisierung der Landwirtschaft und über das ökologische Gesamtergebnis per saldo liegen demnach bis dato kaum vor.

Tabelle 1: Heuristik und Kenntnissstand zu Umweltwirkungen der Digitalisierung der Landwirtschaft

	First-Order-Effekte (direkt Umwelteffekte)	Second-Order-Effekte (indirekte Umwelteffekte)	Third-Order-Effekte (systemische Umwelteffekte)
Beschreibung	Wirkungen infolge der Produktion, Nutzung und Entsorgung der eingesetzten	Umwelteffekte, die durch digitale Anwendungen in den	Systemische Effekte durch Veränderungen bei Produktion und Konsum

	Endgeräte, Infrastrukturen (Telekommunikation, Rechenzentren etc.)	Produktionsprozessen verursacht werden	
Beispiel	<ul style="list-style-type: none"> • Energie und Ressourcenverbrauch und seine Folgen auf die Umwelt (Global Warming Potenzial etc.) • Abfallmengen (Elektronikschrott) 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln • Wasserverbrauch • Bodenveränderungen • Veränderungen der Biodiversität 	<ul style="list-style-type: none"> • Neue Produktionsstrukturen • Verändertes Konsumverhalten • Rebound-Effekte
Studienlage	Keine Studien	Vorwiegend Einzelfallanalysen; keine Reviews und Metaanalysen	Wenige empirische Analysen

Quelle: eigene Darstellung nach Weller von Ahlefeld 2019; Kehl et al. 2021; Fichter et al. 2012

Im Folgenden richtet sich der Fokus auf den empirischen Kenntnisstand zu den erwarteten ökologischen Entlastungseffekten auf Ebene der Anwendungen digitaler Technologien und Applikationen in der Landwirtschaft. Die anderen Ebenen werden in Kapitel 6 unter offenen Forschungsfragen nochmals aufgegriffen.

4.2 Reduzierter Energieverbrauch

Potenziale zur Reduzierung des Energieverbrauchs ergeben sich u.a. durch eine teilflächenspezifische Bodenbearbeitung. Eine solche Bodenbearbeitung ermöglicht Kraftstoffeinsparungen und dadurch verringerte Treibhausgasemissionen, wobei begrenzte Ergebnisse aus Einzelversuchen eine Verallgemeinerung erschweren (Kehl et al. 2021, S. 11). Des Weiteren sind Energieeinsparungen durch den Einsatz von automatischen Lenksystemen möglich. Derartige Lenksysteme nutzen Satellitensignale zur automatischen Übernahme der Traktorsteuerung. Die hierdurch erreichbare Spurführungspräzision reduziert Doppelüberfahrten, was wiederum den Kraftstoffverbrauch (sowie Arbeitszeit und Ressourceneinsatz) bei der Feldbewirtschaftung reduziert. Relevante Kraftstoffeinsparungen durch automatische Lenksysteme im Vergleich mit manueller Traktorsteuerung können bei Systemen erreicht werden, die Real-Time Kinematic (RTK)-Korrektursignale nutzen und somit Genauigkeiten im Bereich von zwei Zentimetern in der Positionsbestimmung erreichen. Bei der Nutzung von weniger genauen Korrektursignalen ist das Energieeinsparungspotenzial geringer (Motsch et al. 2021). In einer Befragung österreichischer Landwirte gaben 21 Prozent der Befragten an, ein automatisches Lenksystem mit RTK-Korrektursignal zu nutzen, während 63 Prozent den Traktor manuell steuern. Diese Verteilung zeigt ein deutliches Energiesparpotenzial durch verstärkte Nutzung von automatischen Lenksystemen (Motsch et al. 2021, S. 225). Im Sonderkulturanbau, wo teilweise noch thermische Verfahren der Unkrautregulierung angewandt werden, könnte durch Ersatz dieser Verfahren mit mechanischer Unkrautregulierung (mittels Robotik) eine bedeutende Energieeinsparung erreicht werden (Haller et al. 2020).

4.3 Reduzierter Wasserverbrauch

Technik und Software für eine teilflächenspezifische Bewässerung sind derzeit für Kreis- und Linearberegnungsmaschinen marktverfügbar. Deren Nutzung wird von Kehl et al. (2021, S. 12) als sehr gering eingeschätzt. Die realisierbare Wassereinsparung durch eine teilflächenspezifische Bewässerung ist stark abhängig einerseits von der Heterogenität der Bodeneigenschaften und der Pflanzenbestandsentwicklung sowie andererseits vom Beregnungsbedarf in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf (Kehl et al. 2021, S. 12). Vergleichbar schätzen Meinardi et al. (2021) die Potenziale von sensorgestützten Beregnungssteuerungen ein. Bewässerungssteuerungen auf Basis von berührungslosen Messungen mit Sensoren können einen realistischen Pflanzenwasserbedarf ermitteln und sind hierbei weniger arbeitsintensiv als gravimetrische Messungen. Das ermittelte Wassereinsparpotenzial von sensorgestützter Beregnungssteuerung ist noch gering, könnte aber in Zukunft höher ausfallen, da durch die kontinuierliche Bestimmung des Wasserbedarfs Sicherheitszuschläge bei der Bewässerung entfallen können. Temperatursensoren zur Messung der Blattemperatur der Pflanzen könnten zukünftig an landwirtschaftlichen Fahrzeugen (Traktoren) oder Drohnen montiert werden.

4.4 Reduzierter Düngemitelesatz

Der Düngemitelesatz kann durch verschiedene digitale Technologien und Applikationen verringert werden. Automatische Teilbreitenabschaltungen sind für Düngerstreuer und Gülleverteiler verbreitet im Einsatz. Die Einsparpotenziale bei den entsprechenden Inputs sind insbesondere abhängig von Form und Größe der Felder, der Anzahl bzw. Breite der abschaltbaren Teilsektoren, der Anzahl der Arbeitsgänge und der Höhe des Betriebsmitteleinsatzes. Mit Hilfe von UAV⁵-Befliegungen über dem Feld können Bild- und Sensordaten zur Planung teilflächenspezifischer Maßnahmen gewonnen werden. Durch Einbeziehung von betrieblichen Daten sowie Landschafts-, Standort- und Klimadaten in die Bewirtschaftungsplanung lässt sich ein Abbau von Nährstoffüberschüssen und somit ein verbesserter Grundwasser- und Erosionsschutz erreichen (Gotsch et al. 2020, S. 25). Speckle et al. (2020) gehen davon aus, dass die teilflächenspezifische Düngung einen signifikanten Beitrag zur Minderung des landwirtschaftlichen Zielkonflikts zwischen steigenden Anforderungen an ökonomische Effizienz einerseits und ökologische Nachhaltigkeit andererseits leisten kann. Es fehlen aber Informationen zur Größenordnung der Effekte. Kehl et al. (2021) rechnen bei der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung mit Online-Stickstoffsensorsystemen bei Getreide im Durchschnitt mit einem um 10 Prozent niedrigeren Stickstoffdüngeraufwand. Erwartet werden bis zu 5 Prozent höhere Erträge, verbunden mit einer verbesserten Stickstoffeffizienz und niedrigeren Stickstoffüberschüssen (Kehl et al. 2021, S. 119). Neben einer Reduktion des Stickstoffeintrags in die Umwelt (insbesondere in Gewässer) bietet die Präzisionslandwirtschaft auch die Möglichkeit, weitere Makronährstoffe pflanzenbedarfsgerecht zu applizieren und Überträge in die Umwelt zu reduzieren.

⁵ UAV = Unmanned Aerial Vehicle

4.5 Reduzierter Pestizideinsatz

Pestizide werden auf Feldern eingesetzt, um die angebauten Pflanzen vor Krankheit (Fungizide), störenden Pflanzen (Herbizide) und Schädlingen (Insektizide) zu schützen. Die Anwendung manueller oder automatischer Teilbreitenschaltung (Möglichkeit der Deaktivierung einzelner Spritzdüsensegmente) ermöglicht eine möglichst präzise Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln auf Feldern, die schmaler als die Arbeitsbreite der Feldspritze oder nicht rechteckig geformt sind (Motsch et al. 2021). Für eine teilflächenspezifische Anwendung von Pflanzenschutzmitteln sind insbesondere drohnenbasierte Online-Sensorsysteme Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen und ein Entwicklungsschwerpunkt vieler Landmaschinenhersteller. Mit Hilfe von boniturgestützten Applikationskarten können Unkräuter und Schädlinge von angebauten Kulturpflanzen unterschieden werden, so dass die Planung und Ausführung einer Pflanzenschutzmaßnahme spezifischer erfolgen kann (Gitzel und Schwarz 2021). Eine Studie aus den USA zeigt, dass ein Rückgang beim Herbizideinsatz in Höhe von 9 Prozent erreicht werden kann, wenn digitale Technik eingesetzt wird (CLAAS KGaA mbH 2021, S. 24). Laut Kehl et al. (2021) haben wissenschaftliche Untersuchungen durchschnittliche Herbizideinsparungen von rund 40 Prozent ermittelt. Die Einzelergebnisse weisen allerdings eine hohe Spannweite auf. Die Spannweite der Herbizideinsparungen bei verschiedenen Kulturen reicht von 0 bis nahezu 100 Prozent. Die höchste durchschnittliche Herbizideinsparung wurde mit 89 Prozent bei Zuckerrüben und die niedrigste durchschnittliche Einsparung mit 23 Prozent bei Wintergerste und Triticale bestimmt (Kehl et al. 2021, S. 124, unter Verweis auf Nordmeyer 2006). Bei neueren Systemen, die Unkraut- und Kulturpflanzen in Echtzeit unterscheiden können, werden Herbizideinsparungen in der Größenordnung von bis zu 90 Prozent genannt (Kehl et al. 2021, S. 12). Der Landmaschinenhersteller Claas beziffert das Einsparpotenzial bei Nutzung neuester und zukünftiger digitaler Technologien auf 15 Prozent (CLAAS KGaA mbH 2021, S. 24 unter Verweis auf AEM 2022). Zu diesen Technologien gehört die teilflächenspezifische sowie einzelpflanzenspezifische Applikation durch Einzeldüsenabschaltung über elektrische Ventile, durch Pulsweitenmodulation zur bedarfsgerechten Applikation der Einzelpflanze und durch Echtzeitdosierung von Pflanzenschutzmittel (CLAAS KGaA mbH 2021, S. 31). Was die Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten durch Ausbringung von Fungiziden anbetrifft, werden Einsparungen von bis zu 20 Prozent genannt (Kehl et al. 2021, S. 12 unter Verweis auf Dammer et al. 2009). Wenn zukünftig Sensorsysteme zur Erkennung und Quantifizierung von Befallssituationen im Pflanzenbestand oder autonome Roboter zum Pflanzenschutz praxisreif werden, ist mit deutlich höheren Einsparpotenzialen zu rechnen (Kehl et al. 2021, S. 12).

4.6 Verringerung von Treibhausgasemissionen

Durch die Landwirtschaft gelangen Treibhausgase in die Atmosphäre, Methan (CH_4) durch Rinderhaltung, Distickstoffoxid (N_2O) bei Überdüngung und Bodenverdichtung (Balzer und Schulz 2015) und Kohlendioxid (CO_2) durch den Energieverbrauch. Mittels digitaler Lösungen können Treibhausgase verringert werden. Hervorzuheben sind die automatisierte Fütterung, die zur Methanreduzierung beitragen kann, die flächenspezifische Bodenbearbeitung und Stickstoffdüngung, die die Bildung von Distickstoffoxid verringern können, sowie automatisierte Lenksysteme, die Kraftstoffeinsparungen und damit die Reduzierung von Kohlendioxidemissionen ermöglichen. Das spezifische Einsparpotenzial ist dabei jeweils von einer Vielzahl an Faktoren wie dem Mechanisierungsgrad der Landwirtschaft, regionalen Landwirtschaftsstrukturen etc. abhängig (Motsch et al. 2021). Abschätzungen zum CO_2 -

Minderungspotenzial liegen für automatische Lenksysteme vor (siehe auch oben die Ausführungen zur Energieeinsparung). Das Einsparpotenzial an CO₂-Äquivalenten durch die Nutzung automatischer Lenksysteme setzt sich, in unterschiedlichen Anteilen, zusammen aus Einsparungen in der Nutzung von Kraftstoffen, Herbiziden, synthetischen Düngern und anderer Chemikalien und ist abhängig von der jeweilig angebauten Feldfrucht. In einem Modell von Ashworth et al. (2018, S. 4) liegt das Einsparpotenzial an Emissionen von CO₂-Äquivalenten beim Anbau von 500 Hektar Soja in den USA bei 6,9 Kilogramm pro Hektar (anteilig verteilt auf die Faktoren Kraftstoffverbrauch (21 Prozent), Herbizideinsatz (13 Prozent), Düngemittel (49 Prozent) und sonstige Chemikalien (18 Prozent)) und beim Anbau von 500 Hektar Baumwolle bei 31,3 Kilogramm pro Hektar. Allerdings weisen Kehl et al. (2021, S. 11) darauf hin, dass begrenzte Ergebnisse aus Einzelversuchen eine Verallgemeinerung erschweren.

4.7 Verbesserung der Bodenstruktur

Eine Verringerung der Bodenverdichtung ist durch automatisierte Spurführungen mittels entsprechender Lenksysteme möglich. Automatische Lenksysteme sind eine der am meisten verbreiteten Anwendungen der Präzisionslandwirtschaft. Beim sogenannten Controlled Traffic Farming werden permanente Fahrspuren angelegt und genutzt. Feste Fahrspuren – so Kehl et al. (2021, S. 12) – verringern Bodenverdichtungen und tragen zu einer besseren Bodenstruktur und -gesundheit bei. Die realisierbaren Effekte sind abhängig vom Automatisierungsgrad des Lenksystems, der zuvor erreichten Fahrgenauigkeit ohne Lenkhilfe, der Feldgröße und -form sowie der Produktionsintensität. Nach Angaben von Barnes et al. (2019, S. 72) kann durch die Nutzung permanenter Fahrspuren im Controlled Traffic Farming die befahrene und dadurch verdichtete Ackerfläche auf 15 Prozent der Gesamtfläche reduziert werden.

Mit neuen technischen Möglichkeiten im Zuge der Digitalisierung könnte eine vielfältigere Auswahl z.B. im Futterpflanzenbau getroffen werden. Auch ist denkbar, dass durch eine Präzisionslandwirtschaft die Standorteigenschaften und Umfeldwirkungen besser berücksichtigt werden können und so die Widerstands- und Pufferfähigkeit der Anbausysteme erhöht werden kann. Erosionsprozesse und Runoff-Effekte (Ablauf von Pflanzenschutzmitteln durch abfließendes Wasser) könnten reduziert werden (Gotsch et al. 2020, S. 21). Kehl et al. (2021, S. 11) schätzen das Verbesserungspotenzial einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Hinblick auf den Bodenschutz durch verbesserten Erosionsschutz dagegen als eher gering ein.

4.8 Förderung der Biodiversität

Die Analyse von Kliem et al. (2022) zeigt, dass der Erhalt von Biodiversität und Ökosystemen aktuell kein primäres Ziel der Digitalisierung der Landwirtschaft ist, sondern lediglich einen möglichen Nebeneffekt darstellt. Insofern die Digitalisierung der Landwirtschaft dazu beiträgt, dass die Bodenverdichtung verringert wird, weniger Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden oder Stoffeinträge (Stickstoff etc.) reduziert werden, wird angenommen, dass dadurch indirekt die Biodiversität gefördert wird. So wird beispielsweise in dem Gutachten von Claas (2021) der Beitrag der Digitalisierung zum Artenschutz in einem möglichen Rückgang beim Herbizideinsatz gesehen. Nach dem derzeitigen Stand der Technik rechnet Claas mit rund 9 Prozent weniger Herbiziden, wenn digitale Technik eingesetzt wird. Durch Nutzung neuester und zukünftiger digitaler Technologien könnte das Potenzial größer ausfallen, so

dass ein Rückgang von 15 Prozent erreicht werden könnte (CLAAS KGaA mbH 2021, S. 24). Es fehlen aber genauere Analysen zu den Wirkmechanismen einschließlich Informationen zur Größenordnung der Effekte auf die Biodiversität, die spezifisch auf digitale Applikationen zurückzuführen sind. Diese stehen im Wechselspiel mit anderen Faktoren, wie beispielsweise der Wiederherstellung von naturnahen Lebensräumen (z. B. Hecken, Gehölze, Wegraine, Kleingewässer), eine größere Vielfalt der Landschaftsräume (z. B. kleinere Schläge, weniger enge Fruchtfolgen), eine größere Vielfalt der angebauten Fruchtarten und Sorten sowie geringere Stoffeinträge (z. B. Stickstoff, Phosphor) in den Boden. Im Konzept des Cognitive Weeding werden solche Aspekte gezielt aufgegriffen, um die Biodiversität zu fördern. Mittels drohnengestützter Sensorik werden Pflanzendaten über die Nicht-Kulturpflanzen nach Artenniveau erhoben und in einem weiteren Schritt auf deren Nutz- bzw. Schadwirkung im Kulturpflanzenbestand analysiert. Ein entsprechendes KI-System kann Empfehlungen zur mechanischen Unkrautregulierung ableiten. Beikräuter können so gezielt im Bestand erhalten werden und so als Lebensraum und Nahrungsquelle für Bienen und Insekten dienen (Trautz 2021). Potenzial bietet auch die Kombination der digitalen Technologien mit einer pfluglosen Bearbeitung oder permanent begrünten Grasstreifen (Haller et al. 2020). Mehr Biodiversität auf dem Feld kann auch durch die Weiterentwicklung und Erleichterung von Streifen- und Kontur-Anbau erreicht werden. Mithilfe von Luftbildern werden Geländeparameter erhoben und verschiedene Kulturen in regelmäßigen Abständen gesät sowie jährlich rotiert (Haller et al. 2020).

4.9 Zusammenfassung

Der Kenntnisstand zu den Umweltwirkungen der Digitalisierung der Landwirtschaft auf Ebene der Second-Order-Effekte stellt sich zusammengefasst wie folgt dar:

Tabelle 2: Umweltwirkungen digitaler Anwendungen in der Landwirtschaft auf Ebene der Second-Order-Effekte

Umweltkategorie	Umweltentlastungseffekte	Empirischer Kenntnisstand
Energieverbrauch	Reduzierung des Energieverbrauchs durch eine teilflächenspezifische Bodenbearbeitung; relevante Kraftstoffeinsparungen durch automatische Lenksysteme	Begrenzte Ergebnisse aus Einzelversuchen erschweren eine Verallgemeinerung
Wasserverbrauch	Reduzierung des Wasserverbrauchs durch teilflächenspezifische Bewässerung; das ermittelte Wassereinsparpotenzial von sensorgestützter Beregnungssteuerung ist gering, könnte aber in Zukunft höher ausfallen; die realisierbare Wassereinsparung ist abhängig von der Heterogenität der Bodeneigenschaften, der Pflanzenbestandsentwicklung und vom Beregnungsbedarf in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf	Einzelfallstudien
Düngemittelverbrauch	Ein durchschnittlich um 10 Prozent niedrigerer Stickstoffdüngeraufwand durch teilflächenspezifische Stickstoffdüngung mit Online-Stickstoffsensorsystemen; Erwartet werden bis zu 5 Prozent höhere Erträge, verbunden mit einer verbesserten Stickstoffeffizienz und niedrigeren Stickstoffüberschüssen	Fallanalysen, Metastudien

Pestizideinsatz	Durchschnittliche Herbizideinsparung von rund 40 Prozent; bei neueren Systemen, die Unkraut- und Kulturpflanzen in Echtzeit unterscheiden können, sind Einsparungen bis zu 90 Prozent möglich; das Reduktionspotenzial bei Fungiziden liegt bei 20 Prozent	Metastudie zur Herbizideinsparung: die Einzelergebnisse weisen eine hohe Spannweite auf
Treibhausgasemissionen	Verringerung von Treibhausgasen durch flächenspezifische Bodenbearbeitung und Stickstoffdüngung, automatisierte Lenksysteme. Das spezifische Einsparpotenzial ist jeweils von einer Vielzahl an Faktoren wie dem Mechanisierungsgrad der Landwirtschaft, regionalen Landwirtschaftsstrukturen etc. abhängig. Treibhausgas-Einsparpotenzial von automatischen Lenksystemen beim Anbau von 500 ha Soja in den USA liegt bei 6,9 kg/ha	Begrenzte Ergebnisse aus Einzelversuchen
Bodenverdichtung	Automatisierte Lenksysteme und Controlled Traffic Farming verringern Bodenverdichtungen und tragen zu einer besseren Bodenstruktur und -gesundheit bei; Geringes Verbesserungspotenzial einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Hinblick auf Bodenschutz	Es fehlen Informationen zur Größenordnung der Effekte
Biodiversität	Förderung der Biodiversität indirekt über Verringerung der Bodenverdichtung, weniger Pflanzenschutzmittel oder Reduzierung der Stoffeinträge (Stickstoff, Phosphor etc.); Weiterentwicklung von Streifen- und Kontur-Anbau (mithilfe von Luftbildern)	Es fehlen Analysen zu Wirkmechanismen einschließlich Informationen zur Größenordnung der Effekte

Quelle: eigene Darstellung

5 Welche Umweltentlastungspotenziale sind in den Schwerpunkten des Experimentierfeldes zu erwarten?

Im Experimentierfeld Agro-Nordwest werden neue Agrartechnologien zur Prozessautomatisierung und -optimierung, neben Wirtschaftlichkeits- und Arbeitsprozessaspekten daraufhin untersucht, wie digitale Techniken optimal zur Ressourceneffizienzsteigerung, zum Schutz der Umwelt und der Biodiversität eingesetzt werden können. Durch den praktischen Einsatz sollen die Potenziale der Digitalisierung landwirtschaftlicher Produktionssysteme im Echtbetrieb getestet und ausgewertet werden. Im Fokus stehen mehrere Use Cases, die den Einsatz von digitalen Agrartechnologien in den Kontext einer Nutzung stellen. Für diese Use Cases werden im Folgenden die erwarteten ökologische Effekte aufgezeigt.

5.1 NIRS-Technologie in der teilflächenspezifischen Ausbringung organischer Düngemittel

Nutzungsszenario

Bei der teilflächenspezifischen Gülleapplikation handelt es sich um einen Anwendungsfall der Präzisionslandwirtschaft zur Ausbringung organischer Düngemittel. Zur Anwendung kommen sogenannte NIRS-Sensoren am Güllefass, die durch das indirekte Messverfahren der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) den Stickstoffgehalt (sowie weitere Nährstoffgehalte wie Phosphor und Kalium) der Gülle, bei der Befüllung des Fasses sowie bei der Ausbringung des organischen Düngers, messen. Durch die genaue Bemessung der Düngerzusammensetzung und der genauen Kartierung von Düngebedarfen auf der Ackerfläche (abhängig von Pflanzenbedarf und Bodenverhältnissen sowie dem Vorkommen von roten/nicht roten Gebieten) in Applikationskarten kann eine möglichst optimale Passung für die Nährstoffapplikation ermittelt und die Ausbringmengeneinstellung vorgenommen werden.

Nach gegenwärtigem Stand der Technik, kann der Nährstoffgehalt der Gülle während der Befüllung des Güllefasses gemessen und anhand des durchschnittlichen Stickstoffgehalts sowie eines Stickstoffsollwerts die Ausbringmenge festgelegt werden. Ebenso möglich ist die Nährstoffmessung während der Gülleausbringung, die retrospektive Daten über die tatsächlich ausgebrachten Nährstoffmengen liefert.

Die im Projekt durchgeführten Interviews sowie die Ergebnisse einer Fokusgruppe weisen darauf hin, dass die Zuverlässigkeit der NIRS-Technologie in der Nährstoffbestimmung noch nicht vollständig gegeben ist. Bei den Sensormesswerten werden hohe Schwankungsbreiten festgestellt sowie mangelnde Übereinstimmungen mit den Ergebnissen aus den Laboranalysen. Trotzdem ist die NIRS-Technologie zur Messung der Nährstoffströme am Güllefass bereits am Markt verfügbar, aber noch wenig verbreitet. Lohnunternehmer sind noch zögerlich in der Anschaffung von NIRS-Sensoren für die Gülleausbringung, da seitens der auftraggebenden Landwirte die Bereitschaft, einen Aufpreis für den zusätzlichen Technikeinsatz zu zahlen, eher gering verbreitet ist. Geschätzt wird ein gegenwärtiger Anteil von eingesetzten Güllefässern mit NIRS-Technologie von unter 5 Prozent (Experteninterview). Befragte Landwirte und Lohnunternehmer schätzen für die zukünftige Entwicklung eine weite bis sehr weite Verbreitung der Technologie in 10 Jahren, unter der Voraussetzung grundsätzlicher Verbesserungen in der Messgenauigkeit (Henseling und Willim 2022).

Erwartete ökologische Effekte

Im Rahmen des Projekts befragte Landwirte und Lohnunternehmer erwarten folgende Vorteile und Potenziale der Nutzung der NIRS-Technologie in der Gülleausbringung:

- Präzisere Anpassung der auszubringenden Nährstoffmengen an den jeweiligen Pflanzenbedarf; insbesondere bei inhomogener Gülle mit schwankender Nährstoffverteilung; infolgedessen besseres Pflanzenwachstum durch gezieltere Düngung,
- Verringerung des Eintrags von Nährstoffen in die Umwelt (v.a. ins Grundwasser) durch Vermeidung von Überdüngung,
- Echtzeit-Information darüber, wieviel von welchen Nährstoffen auf dem Feld ausgebracht werden; im Gegensatz dazu beträgt die Wartezeit auf die Ergebnisse einer Laboranalyse 10 bis 14 Tage,

- Erleichterung der Dokumentation, falls die NIRS-Technologie durch die Düngehörden des jeweilig zuständigen Bundeslandes anerkannt wird (in den meisten Bundesländern noch nicht der Fall).

Wird Gülle mit Hilfe der NIRS-Technologie gezielter ausgebracht und die ausgebrachten Mengen besser an den jeweiligen Pflanzenbedarf an Stickstoff (und andere Nährstoffe) angepasst, können Überdüngungen und damit erhöhte Nährstoffeinträge in Boden und Grundwasser bzw. in umliegende Fließgewässer reduziert werden. Weiterhin kann ein reduzierter Stickstoff- und Phosphoreintrag in die landwirtschaftlich genutzten Böden zu einer Verminderung der Treibhausgasemissionen von Landwirtschaftsflächen beitragen.

In den Befragungen zeigte sich, dass für Landwirte und Lohnunternehmer der „Umweltvorteil“ eine zusätzliche Motivation für den Einsatz der NIRS-Technologie darstellt. Damit wird die Hoffnung verbunden, dass eine bessere und transparentere Dokumentation ihrer Maßnahmen auch zu einer positiveren gesellschaftlichen Wahrnehmung („Image“) der Landwirtschaft führt. Dennoch wird ein flächendeckender Einsatz der NIRS-Technologie stark von den erreichbaren Verbesserungen in der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messergebnisse abhängen. Einen Beitrag dazu könnten bessere Datenbanken zur Kalibrierung leisten. Die befragten Lohnunternehmer und Landwirte fordern hierfür von den Sensorherstellern eine häufigere Aktualisierung der Datenbanken sowie den Aufbau einer herstellerübergreifenden Datenbank (Henseling und Willim 2022).

Ein weiterer wichtiger Faktor, der die zukünftige Nutzung der NIRS-Technologie beeinflusst, ist die Positionierung der Düngehörden zum Thema. Einerseits könnte eine Anerkennung der NIRS-Messungen die Dokumentation der Düngemittelaktivitäten für die Landwirte und Lohnunternehmer erleichtern und so eine Motivation zur Technologienutzung bieten. Andererseits würden die Düngehörden auch zunehmend Kontrolle über die Nährstoffausbringungen verlieren, wenn Messwerte aus staatlich zertifizierten Laboreinrichtungen nicht mehr zwingend notwendig sind und den Herstellern der NIRS-Sensoren die Kontrolle über die Datenbanken zur Kalibrierung überlassen wird.

Ökologische Risiken können bestehen, wenn es durch Messungenauigkeiten (falsch niedrige Nährstoffwerte) oder Fehler im Handling der neuen Technologie zu einer Überdüngung des Ackers kommt. Bei Anerkennung der NIRS-Messungen durch die zuständige Behörde entstehen neue Risiken der Manipulation von Sensordaten. Mit Verweis auf die retrospektiven Informationen über die schon ausgebrachten Nährstoffmengen, wird teilweise auch von einer Überschätzung der Nutzungspotenziale für eine teilflächenspezifische Düngung gesprochen. Zweifel herrschen auch an der technischen Machbarkeit, die Echtzeit-Messungen der Nährstoffgehalte mit einer ständigen Adaption der Ausbringmenge (nach Pflanzenbedarf etc.) zu koppeln. In Fällen von Gülleüberschüssen stellt sich weiterhin die Frage, ob eine bedarfsgerechte Düngung im Mittelpunkt der betrieblichen Entscheidungen steht oder vielmehr die Notwendigkeit, die Gülle auf dem Acker zu „entsorgen“ (Kehl et al. 2021).

5.2 Autonome Feldroboter zur Unkrautregulierung

Nutzungsszenario

Die autonome Feldrobotik hat das Potenzial, durch immer genauer arbeitende Sensoren zur Pflanzenerkennung, Echtzeitverarbeitung von Daten durch Algorithmen und zunehmend sichere Aktorik eine effektive, mechanische Unkrautregulierung zu ermöglichen. Als kommerzielle Systeme werden im

Experimentierfeld die Systeme von K.U.L.T. und Naïo Technologies in verschiedenen Größen (die Modelle Oz und Dino) auf landwirtschaftlichen Betrieben eingesetzt und entsprechend evaluiert. Des Weiteren wird der noch nicht am Markt erhältliche Feldroboter BoniRob eingesetzt und erprobt. Hierzu werden State-of-the-Art Unkrautregulierungssysteme (Traktor-Implement-Kombinationen) mit Feldrobotik-Prozesstechnologien und -verfahren verglichen. Dabei werden auch adaptive Übergangsszenarien von der Automatisierung zur Autonomie (kamerabasierte Reihenführung etc.) integriert.

Im Nutzungsszenario wird eine Umstellung der Produktionsprozesse auf eine mechanische Unkrautbekämpfung mit Hilfe von kleineren, autonom agierenden Feldrobotern angenommen. Roboter (oder mehrere im Schwarm) fahren autonom und vernetzt über das Feld und erfassen mit entsprechender Sensorik Bilddaten zur Lokalisierung und Unterscheidung von Kulturpflanzen und Unkräutern. Die generierten Bildinformationen werden entweder von einer Fachperson begutachtet (oder in einer späteren Entwicklungsphase) von einem selbstlernenden System interpretiert. Auf Basis der Datenauswertung werden im nächsten Prozessschritt die lokalisierten Unkräuter mechanisch beseitigt.

Bislang bewegt sich die autonome Feldrobotik zur Unkrautregulierung in einer Marktnische. Ein Einsatz von Feldrobotern ist gegenüber chemischen Unkrautvernichtungsverfahren in vielen Bereichen noch nicht wettbewerbsfähig. Eine zentrale Voraussetzung, damit sich die Technologie durchsetzen kann, ist die Kompatibilität mit digitalen Lösungen verschiedener Anbieter. Die Verbreitung von autonomen Feldrobotern hängt wesentlich auch davon ab, wie sie sich in bestehende Pflanzenbausysteme integrieren lassen. Im Praxiseinsatz stellen „schwierige“ Feldbedingungen wie Hanglagen und Steine im Acker noch Hürden für einen störungsfreien Einsatz der autonomen Feldrobotik dar. Aus Anwendersicht spielt eine technische Weiterentwicklung für einen zuverlässigen Einsatz der Feldroboter sowie eine einfache Bedienbarkeit eine wichtige Rolle in der zukünftigen Verbreitung. Weiterhin sind die rechtlichen Rahmenbedingungen ein bestimmender Faktor. Der momentan unklare rechtliche Rahmen wird als zentrales Hemmnis in der Technologieverbreitung gesehen. Hersteller und Anwender erhoffen sich klare rechtliche Grundlagen unter anderem im Bereich Haftung bei Unfällen sowie autonomen Fahrten auf öffentlichen Wegen.

Bis dato werden autonome Feldroboter auf spezialisierten Betrieben des Anbaus von Sonderkulturen (z.B. Gemüse- und Obstanbau) genutzt, erprobt und weiterentwickelt. Hier wird eine frühe Verbreitung der Feldrobotik erwartet. Getrieben wird das Interesse an der autonomen Feldrobotik bei potenziellen Anwendern unter anderem durch Mangel an (Saison-)Arbeitskräften sowie eine erwartete hohe Qualität des Arbeitsergebnisses. Als interessant wird die autonome Feldrobotik deshalb auch in der ökologischen Landwirtschaft gesehen (Henseling et al. 2022c).

Erwartete ökologische Effekte

Im Hinblick auf eine umweltverträglichere Landbewirtschaftung eröffnen autonome Feldroboter neue Möglichkeiten, einzelne große Landmaschinen durch viele kleinere (schwarmbasiert) zu ersetzen, die weitgehend eigenständig agieren und rund um die Uhr einsetzbar sind. Der ökologische Vorteil besteht in dem Verzicht auf chemische Pflanzenschutzmittel. Ein weiterer Vorteil ist die geringere Bodenverdichtung. Perspektivisch bietet die autonome Feldrobotik „neue Möglichkeiten einer sehr kleinräumigen, in Zukunft vielleicht sogar auf die Einzelpflanze ausgerichteten Produktionsgestaltung (Spot Farming)“ (Kehl et al. 2021, S. 202). Vorteile der autonomen Feldrobotik werden in der zuverlässigen Erkennung von Unkrautpflanzen in sehr frühen und in verschiedenen Wachstumsstadien gesehen. In Teilsätzen im Sonderkulturbereich lieferte der Feldroboter bessere Ergebnisse in der Erkennung sehr

kleiner (Unkraut-)Pflanzen als die händische Unkrautregulierung und beschädigte weniger Kulturpflanzen (Henseling et al. 2022c). Durch das geringe Gewicht der Feldroboter wird bei Überfahrten kaum Druck auf den Ackerboden ausgeübt. Bodenverdichtungen, wie sie durch Überfahrten mit konventionellen landwirtschaftlichen Maschinen verursacht werden, können vermieden werden. Dies wirkt sich wiederum positiv auf die Versickerungsfähigkeit des Bodens sowie auf die Lebensbedingungen von Bodenorganismen aus (Mahrarens et al. 2015).

Die autonome Feldrobotik bietet sowohl für die konventionelle als auch die ökologische Landwirtschaft Potenziale. Für konventionell wirtschaftende Landwirte bietet die autonome Feldrobotik eine Alternative zur Unkrautregulierung mit Herbiziden. Als Motivation werden von interessierten Landwirten Probleme mit Wuchsdepressionen in der Kulturpflanze im Zusammenhang mit Herbiziden sowie eine zukünftig geringere Verfügbarkeit chemischer Pflanzenschutzmittel genannt (Henseling et al. 2022c). Wird der Einsatz von Herbiziden zunehmend durch mechanische Methoden der Unkrautregulierung ersetzt, können negative Umweltwirkungen chemischer Unkrautvernichtungsmittel auf die Biodiversität im Feld sowie auf Gewässerökosysteme, hier besonders auf Algen (Malaj et al. 2014), vermindert werden.

Für einen Methodenwechsel im konventionellen Landbau ist die Frage nach der Wirtschaftlichkeit der robotergestützten, mechanischen Unkrautregulierung im Vergleich zur Ausbringung von Herbiziden ein wichtiger Einflussfaktor. Derzeit sei die Unkrautregulierung mittels Hacktechnik gegenüber chemischem Pflanzenschutz nicht konkurrenzfähig. Politische Steuerungsmechanismen wie die Einschränkung von Pflanzenschutzmitteln (z.B. Verbot von Glyphosat) sowie die finanzielle Förderung der mechanischen Unkrautregulierung als Umweltleistung (zum Beispiel in Wasserschutzgebieten) haben das Potenzial, die Konkurrenzfähigkeit der Hacktechnik steigern (Henseling et al. 2022c).

Bezüglich der ökologischen Landwirtschaft, die keine Herbizide einsetzt, liegen die Vorteile in der Arbeitsentlastung und Steigerung der Produktivität. Kehl et al. (2021, S. 232) gehen davon aus, dass die Entwicklung hin zu modularen Plattformen es erlauben würde, diese zukünftig je nach Bedarf und Anwendungszweck mit Bewirtschaftungstechnik auszustatten, so dass dadurch eine höhere Auslastung erreicht werden kann. Autonome Robotersysteme könnten so perspektivisch auch für Betriebe mit geringer Flächenausstattung wirtschaftlich einsetzbar werden.

5.3 Drohnendaten für einen teilflächenspezifischen Pflanzenschutz

Nutzungsszenario

Die Nutzung von Drohnendaten für einen teilflächenspezifischen Pflanzenschutz stellt einen (im Rahmen des Experimentierfelds Agro-Nordwest untersuchten) Anwendungsfall der Präzisionslandwirtschaft dar, der mit Hilfe digitaler Technologien eine ortsdifferenzierte und zielgerichtete Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen ermöglichen kann. Die Kernidee des Anwendungsfalls besteht darin, Pflanzenschutzmittel räumlich differenziert – auf Grundlage von Drohnen-Befliegungsdaten – und lokal konzentriert nach Bedarf und Notwendigkeit einzusetzen (Spot Spraying).

Mittels an Drohnen befestigten Kamerasystemen werden bei Feldüberfliegungen Bilddaten zur Identifizierung von Unkrautnestern in einer Maiskultur aufgenommen. Anschließend erfolgt eine automatisierte Klassifikation der Bilddaten und die Übersetzung der Informationen (zur Lokalisierung der Beikrautnester) in eine maschinenlesbare Applikationskarte. Mit Hilfe der Applikationskarte und einer für

Spot Spraying geeigneten Anbaufeldspritze kann das Pflanzenschutzmittel spezifisch auf den Teilflächen mit Unkrautnestern ausgebracht werden.

Während Drohnen in der Landwirtschaft bereits Einsatz finden, zum Beispiel zur Ausbringung von Nützlingen, stellt die Unkrautkartierung mit Drohnen-Befliegungsdaten einen neuen Anwendungsfall dar. Für die Verbreitung der Anwendung wird von befragten Experten und Anwendern in den nächsten fünf Jahren ein langsames Wachstum und anschließend ein dynamischer Zuwachs – abhängig von Wissensaustausch und der Wissensvermittlung in Berufsschulen – angenommen (Henseling und Neumann 2022).

Erwartete ökologische Effekte

Durch einen auf Teilflächen konzentrierten und dadurch reduzierten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln können – verglichen mit ganzflächig ausgebrachten Pestiziden – positive ökologische Potenziale erschlossen werden. Neben Schonung von Boden und Wasser kann auch die Biodiversität auf und um die landwirtschaftlich genutzten Flächen gefördert werden.

In der Anwendung der technischen Innovationen (Drohneinsatz mit Kamerasystemen, sensorspezifisches Spot Spraying) zeigen sich enorme Einsparpotenziale für das auszubringende Spritzmittel. In einem Praxisbeispiel (eines Agrarunternehmens) der Bekämpfung von Ampfer im Grünland konnte eine vorher flächig ausgebrachte Spritzbrühe von 200 Litern auf 5 Liter reduziert werden (Henseling und Neumann 2022).

Für die weitere Verbreitung der Technologie müssen noch technische und wirtschaftliche Hürden überwunden werden. Die Datenaufnahme und -auswertung bis zum fertigen Maschinenauftrag ist zeitaufwendig (wenige Stunden bis zwei Tage, abhängig vom anbietenden Unternehmen) und teuer. Des Weiteren übersteigt der hohe Datenumfang der Maschinenaufträge die Kapazitäten gängiger Traktor-Bedienterminals. Soll die Bildaufnahme und Datenauswertung alternativ durch den Landwirt selbst durchgeführt werden (anstelle eines beauftragten Dienstleisters), ist ein hohes Maß an Know-how Voraussetzung. Während der beschriebene Anwendungsfall im „Offline-Verfahren“ arbeitet (zeitlicher Verzug zwischen Datenaufnahme, -auswertung und Maschinenauftrag), seien „Online-Verfahren“ wünschenswert, bei denen in Realzeit die Bildinformationen auf die Maschine/Düsen übertragen werden. Aus Sicht der (potenziellen) Anwender müsse vor allem die Wirtschaftlichkeit gegeben sein sowie die Datenhoheit beim jeweiligen Anwender liegen und eine Datennachbearbeitung möglich sein. Außerdem dürfe es zu keinen Qualitätseinbußen bei der Ernte im Vergleich zum herkömmlichen Herbizid-einsatz kommen (Henseling und Neumann 2022).

Abhängig vom Wirkmechanismus wird zwischen blatt- und bodenaktiven Herbiziden unterschieden. Eine Reduktion des Herbizideinsatzes durch Bildverarbeitung kann nur für blattaktive Substanzen erreicht werden. Bodenaktive Herbizide werden weiterhin großflächig ausgebracht (Henseling und Neumann 2022).

5.4 Drohnenbasierte Entscheidungsunterstützung im Klee grasmanagement

Nutzungsszenario

Auch für die Entscheidungsunterstützung im Klee grasmanagement können drohnengestützte Bildaufnahmen Anwendung finden. Der Anbau von Klee gras ist besonders im ökologischen Landbau verbreitet – als Dauergrünland sowie als Teil der Fruchtfolge. Hierbei werden die stickstofffixierenden Eigenschaften von Klee als Leguminose zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit genutzt.

Im Zentrum dieses Anwendungsfalls der digitalisierten Landwirtschaft steht die Erfassung der räumlichen Verteilung von Klee und Gras im Feld und der Nutzbarmachung dieser Information zur Optimierung der Bewirtschaftung. Hierfür werden zuerst Pflanzen- (Klee-/Grasverteilung, Bestandshöhe, Biomasse) und Bodenparameter (Bodenfeuchte) anhand exemplarischer Beprobungsflächen im Feld aufgenommen, um die Bestandseigenschaften möglichst repräsentativ abzubilden. Mittels drohnengestützter Kamerasysteme erfolgt anschließend eine Modellierung und Skalierung der aufgenommenen Felddaten auf die gesamte Klee grasfläche. Räumliche und temporale Anomalien im Feld können so im Hinblick auf die Bestandszusammensetzung, die (fraktionierte) Biomasse oder die Bestandshöhe identifiziert und ausgewiesen werden. Es wird eine breite Informationsbasis geschaffen, die dem Landwirt als Entscheidungsunterstützung für (teilflächenspezifische) Bewirtschaftungsmaßnahmen dienen soll. Die Daten können als Geoinformationslayer in Raster- oder Vektordatenformat sowohl in digitaler als auch analoger Form bereitgestellt werden.

Für eine Verbreitung der Anwendung sind Aspekte der Wirtschaftlichkeit und des Zeitaufwands sowie die Erkennbarkeit des Nutzens bei den Anwendenden bedeutend. Für die Umsetzung gibt es mehrere denkbare Optionen. Die Landwirte könnten sich Drohnen Daten als Dienstleistung zukaufen oder selbst Drohnenbefliegungen durchführen. Drohnen-Kamera-Systeme, die mit RGB⁶-Bildtechnik arbeiten, sind hierfür eine kosteneffiziente Lösung.

Erwartete ökologische Effekte

Auf Basis der Informationen zur Verteilung der Klee- und Grasanteile kann die Gesamtfläche in homogene Managementzonen untergliedert werden. Positive ökologische Wirkungen können erreicht werden, indem Bereiche mit geringem Aufwuchspotenzial zugunsten der Fauna zunächst extensiver genutzt werden (Henseling et al. 2022a).

Da Klee grasgemenge zumeist Bestandteile einer Fruchtfolge sind, kann darüber hinaus anhand der Zonierung die stickstofffixierende Wirkung des Klees für die Folgekultur effizienter genutzt werden. In Zonen mit hohem Kleeanteil wird weniger Dünger benötigt, was in einer teilflächenspezifischen Düngestrategie berücksichtigt werden kann. Weiterhin kann auch die Auswahl der nachfolgenden Kultur an die Zoneneinteilung angepasst und somit optimiert werden. Kulturen wie Weizen, die eine hohe Bodenfruchtbarkeit benötigen, können für Zonen mit hohem Ertragspotenzial vorgesehen werden, während in Niedrigertragszonen Blühstreifen angelegt werden können (Henseling et al. 2022a).

⁶ RGB: Rot-Grün-Blau Farbraum

5.5 Autonome Fütterung

Nutzungsszenario

Im Rahmen des Use Cases Fütterung wird ein autonomes System, welches den vollständigen Fütterungsprozess landwirtschaftlicher Betriebe in der Rinderhaltung abdeckt (autonomer Futtermischwagen), unter verschiedenen Rahmenbedingungen erprobt und evaluiert. Eingesetzt wird der Futtermischwagen Verti-Q der Firma Strautmann, welcher das bestehende Modell Verti-Mix SF mit Hardware- und Softwarebausteinen zur intelligenten Steuerung erweitert, um alle Arbeitsprozesse (Futteraufnahme, Transport und Futterausbringung) autonom durchführen zu lassen. Die erwarteten Vorteile des Einsatzes eines autonomen Futtermischwagens liegen im Bereich der Arbeitserleichterung und Flexibilisierung der Arbeit, da das autonome System klare Vorgaben und Anweisungen gibt und so Betriebsleiter die Arbeitsprozesse weniger selbst überwachen müssen. Zusätzlich wird die Einarbeitungszeit neuer Mitarbeiter verringert. Des Weiteren kann die Futterzusammensetzung optimiert und der Anfall von Futterresten reduziert werden (Henseling et al. 2022b).

Aus Sicht der Landwirte stellt das Ausfallrisiko der autonomen Technik ein wichtiges Hemmnis in der Verbreitung der Technologie dar. Ein Totalausfall der Technik muss kurzfristig durch eine alternative Lösung ersetzt werden können. Landwirte müssen daher aktuell immer noch eine manuelle Backup-Variante zur Fütterung vorhalten (Henseling et al. 2022b). Erst wenn ein flächendeckender Wartungs- und Reparaturservice (rund um die Uhr) gegeben ist, werden die technischen Risiken für den Landwirt kalkulier- und handhabbar. Ein wirtschaftliches Risiko besteht für die Landwirte in den hohen Investitionskosten für den Kauf eines autonomen Futtermischwagens (Henseling et al. 2022b).

Erwartete ökologische Effekte

Ein erwarteter ökologischer Effekt liegt in der Ressourcenschonung. Durch die Nutzung eines autonomen Fütterungssystems kann eine Reduktion der anfallenden Futterreste erreicht werden, da häufiger kleinere Mengen gefüttert werden können (Henseling et al. 2022b).

5.6 Parallelfahrssysteme

Nutzungsszenario

Zur Optimierung der Feldbefahrungen bieten verschiedene Hersteller Parallelfahrssysteme für Traktoren an. Die Lösungen reichen von einfacheren Lenkhilfen, die eine optimale Fahrspur am Display anzeigen, bis hin zu Lenkassistenten und Lenkautomaten, die den Lenkvorgang selbsttätig übernehmen. Parallelfahrssysteme sind schon weit verbreitet am Markt. Wesentliche Vorteile aus Anwendersicht liegen hierbei in der Arbeitserleichterung durch eine geringere erforderliche Konzentrationsleistung zum exakten Halten der Fahrspur und insbesondere in der Vereinfachung der Wendemanöver. Vorteilhaft sind auch das qualitativ hochwertige Arbeitsergebnis (hohe Präzision) sowie die Betriebsmitteleinsparungen (Saatgut, Dünger, Kraftstoff) durch eine Verringerung von Überlappungsbereichen. Des Weiteren ermöglichen automatische Lenksysteme die Anwendung bestimmter Bearbeitungsstrategien wie des Controlled Traffic Farming, bei dem die Fahrspuren einmal festgelegt und dann beibehalten werden (Gegner und Henseling 2022).

Der Use Case im Experimentierfeld betrachtet im Rahmen des Schwerpunktes „Precision Farming für jedermann“ den Einsatz und Nutzen von Parallelfahrssystemen für kleine und mittlere Betriebe. Während ein Komfortgewinn deutlich erkennbar ist, sind die ökonomischen Vorteile aus Anwendersicht schwer zu kalkulieren. Bei größeren Betrieben könne eine gute Wirtschaftlichkeit eher erreicht werden als bei kleineren (Gegner und Henseling 2022).

Erwartete ökologische Effekte

Der Einsatz automatischer Lenksysteme bietet Chancen, Strukturvielfalt in der Ackerlandschaft und Kulturpflanzendiversität im Feld zu fördern. Parallelfahrssysteme können auch weitere technische Systeme und Anbau- und Bewirtschaftungsverfahren mit Ressourcenschonungspotenzial unterstützen: Die teilflächenspezifische Aussaat von Kulturpflanzen auf Basis von Biomassekarten kann ermöglicht/unterstützt werden. Automatische Lenkfunktionen können auch in Kombination mit Section Control-Systemen (Teilbreitenschaltung) eingesetzt werden, um so Betriebsmittel wie Saatgut, Pflanzenschutzmittel, Dünger, Kraftstoff etc. einzusparen. Auch für das Direktsaatverfahren seien Parallelfahrssysteme unverzichtbar (Gegner und Henseling 2022). Die Direktsaat mit einer reduzierten Bodenbearbeitung wirkt sich wiederum positiv auf Boden und Klima aus.

5.7 Digitale Datenerfassung zur Optimierung der Prozesskette Zuckerrübe

Nutzungsszenario

Im Rahmen des Use Cases zur Zuckerrübe im Experimentierfeld Agro-Nordwest sollen möglichst umfangreich Daten gesammelt werden, um diese für die Prozessoptimierung bei der Rübenernte zu nutzen und Planungsgrundlagen zur Optimierung der Prozesskette (zum Beispiel bei der Erntelogistik) zu schaffen.

Über den normalen Arbeitseinsatz hinaus soll die geschaffene Datengrundlage (Arbeitsbreite, Fahrgeschwindigkeit, Kraftstoffverbrauch etc.) für zukünftige Teil- und Gesamtprozesssimulationen genutzt werden. Weiters werden am Markt verfügbare Ortungs- und Datenübertragungssysteme getestet und verglichen. Eine umfassende Datenaufzeichnung während der Durchführung verschiedener Arbeitsschritte dient als Grundlage zur Erstellung und Weiterentwicklung eines Simulationsmodells, das wiederum die betrachteten Prozesse hinsichtlich ökonomischer Kriterien optimieren soll. Ein zentraler Teil der Verfahrenskette ist der Ernteprozess. Werden Fahrspuren und Ausschlusszonen bereits bei der Rübenaussaat vorausgeplant und Mietenstandorte⁷ frühzeitig abgestimmt, kann dies Stillstandszeiten von Maschinen reduzieren, Leerfahrten verhindern und insgesamt das Flottenmanagement verbessern.

Möglichst genaue Ertragsprognosen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle in den Planungen der Akteure (Abfuhrunternehmen, Zuckerunternehmen etc.). Zur Bestandserfassung und Erstellung einer

⁷ eine Zuckerrübenmiete bezeichnet die Zwischenlagerung der geernteten Rüben in Form eines Haufwerks am Feldrand

Ertragsprognose wird eine Vielzahl an Schlag- und Bestandsdaten erhoben und ausgewertet (Stickstoffindex, Biomasse, Feldaufgang, Schlaggeometrie etc.) (Henseling und Gegner 2022).

Erwartete ökologische Effekte

Die Optimierung von Routen und Fahrwegen in der Prozesskette Zuckerrübe kann dazu beitragen, Betriebsmittel wie Dünger und Pflanzenschutz einzusparen (Henseling und Gegner 2022).

Die Feldüberfahrten von Traktoren, Rübenroder sowie LKW zum Abtransport der Zuckerrüben können aufgrund des großen Gewichts von Fahrzeug und Rüben Bodenverdichtungen verursachen. In der Anpassung von Befahr-Strategien sowie der datenbasierten Festlegung von Überladepunkten – je nach Tragfähigkeit des Bodens in diesem Bereich – liegt Potenzial zur Bodenschonung. Nach Angaben des Projektteams gibt es derzeit einige Vorhaben, die sich mit Befahr-Strategien befassen und die Belastbarkeit von Böden untersuchen. Das Thema Vermeidung von Bodenverdichtung steht allerdings noch am Anfang, u.a. fehlt es bislang an bezahlbarer Sensorik (Henseling und Gegner 2022).

5.8 Zusammenfassung

Die folgende Tabelle fasst die Umwelteffekte der verschiedenen, im Experimentierfeld verfolgten, digitalen Agrartechnologien zusammen.

Tabelle 3: Umwelteffekte digitaler Agrartechnologien (Experimentierfeld Agro-Nordwest)

Digitale Anwendung	Umwelteffekte	Voraussetzungen
NIRS-Technologie	<ul style="list-style-type: none"> • Gewässerschutz durch gezieltere Gülleausbringung • Bodenschutz durch gezieltere Gülleausbringung / Vermeidung von Überdüngung • Verminderung der Treibhausgasemissionen bei der Bearbeitung von Landwirtschaftsflächen 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung bei Messgenauigkeiten und Datenbanken zur Kalibrierung • Anerkennung durch die jeweilige Düngebehörde • Lösungen für Gülleüberschüsse
Autonome Feldrobotik	<ul style="list-style-type: none"> • Bodenschutz durch verringerte Bodenverdichtung • Bodenschutz, Gewässerschutz und Schutz der Biodiversität durch Reduktion des Pestizideinsatzes zur Unkrautregulierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung: einfache Bedienbarkeit • Bodenbedingungen: plan, kaum Steine • Feldbedingungen: keine Hangneigungen • Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu chemischem Pflanzenschutz

		<ul style="list-style-type: none"> • Rechtliche Rahmenbedingungen: Haftungsfragen, Fahren auf öffentlichen Wegen
Drohnen­daten zum teil­flächenspezifischen Pflanzenschutz	<ul style="list-style-type: none"> • Gewässerschutz und Schutz der Biodiversität durch Reduktion des Pestizideinsatzes zur Unkrautregulierung • Reduktion der Bildung von Resistenzen durch verminderten Pestizideinsatz • Einsparpotenzial beschränkt sich auf blattaktive Herbizide 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion des Zeitaufwands (z.Z. zeitaufwendiger Arbeitsprozess im „Offline-Verfahren“) • Übertragbarkeit auf Traktor-Bedienterminals (z.Z. zu hoher Datenumfang für gängige Terminals) • Wirtschaftlichkeit: angemessene Kosten für Drohnenüberflug und Datenauswertung
Drohnen­datenbasierte Entscheidungs­unterstützung im Klee­gras­management	<ul style="list-style-type: none"> • Extensive Bewirtschaftung von Teilflächen mit geringem Aufwuchspotenzial • Optimierung der Düngelplanung 	<ul style="list-style-type: none"> • Akzeptabler Zeitaufwand in der Anwendung • Wirtschaftlichkeit (z.B. Möglichkeiten zur Nutzung eines Low-Cost-Systems)
Autonome Fütterung	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion von Futterresten 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausfallsicherheit • Rechtssicherheit • Wirtschaftlichkeit
Parallelfahrssysteme	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung von Anbauverfahren mit höherer Kulturpflanzendiversität • Unterstützung von bodenschonenden Verfahren wie Direktsaat • Betriebsmitteleinsparung durch reduzierte Überlappungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Wirtschaftlichkeit • Software-Kompatibilität • einfache Bedienbarkeit
Prozess­kette Zuckerrübe	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion von Bodenverdichtung durch Optimierung der Überladepunkte • Betriebsmitteleinsparungen (Dünger, Pflanzenschutz...) 	<ul style="list-style-type: none"> • Kompatibilität von Geräten und Software

	durch optimierte Routen und Fahrwege	
--	--------------------------------------	--

Quelle: eigene Darstellung

6 Unter welchen Voraussetzungen können die ökologischen Entlastungspotenziale der Digitalisierung erschlossen werden?

6.1 Potenzielle Wirkungen auf der Makroebene einer umfassend vernetzten Landwirtschaft

Bei der Abschätzung möglicher Umweltentlastungen durch Digitalisierung der Landwirtschaft handelt es sich um Potenziale. Umweltentlastungen können nur insoweit eintreten, wie die entsprechenden Technologien in der Landwirtschaft genutzt werden. Repräsentative und gesicherte Daten über die aktuelle Verbreitung bzw. Nutzung digitaler Agrartechnologien in Deutschland fehlen aber (Kehl et al. 2021, S. 156). Die aktuelle Verbreitung smarter Landwirtschaftstechnologien im Gebiet der Europäischen Union wird als niedrig eingestuft – insbesondere im Hinblick auf die höheren Erwartungen (Bacco et al. 2019, unter Verweis auf Soto et al. 2018). Noch größer werden die Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen technischen Entwicklung und Nutzung der Technologien in der Landwirtschaft (Kehl et al. 2021, S. 102). Hohe Investitionskosten für Technologien der Präzisionslandwirtschaft in Verbindung mit Unsicherheit über die Wirtschaftlichkeit der Investition stellen ein relevantes Hemmnis in der Verbreitung der digitalen Landwirtschaftstechnologien dar (Barnes et al. 2019).

Des Weiteren hängt die Realisierung von möglichen Umweltentlastungspotenzialen von verschiedenen Faktoren ab, insbesondere von der Ausgangslage vor der Einführung neuer digitaler Agrartechnologien und von den betrieblichen Bedingungen. Je nach ihrer Ausgestaltung haben die verschiedenen Agrartechnologien ein jeweils unterschiedliches Potenzial bezüglich der Umweltwirkungen in der Landwirtschaft (Kehl et al. 2021, S. 104). Einen Beitrag zur Reduktion bzw. Vermeidung negativer Umwelteffekte kann die Digitalisierung in den Arbeitsschritten Fruchtfolge- und Anbauplanung, Bodenbearbeitung und Aussaat, Düngemittelapplikation, Pflanzenschutz, Ernte und Bewässerung leisten (Lieder 2022). Außerdem spielen die naturräumlichen Bedingungen und die Beschaffenheit der Betriebsflächen, des Pflanzenanbaus und der pflanzenbaulichen Systeme eine wichtige Rolle bei der Realisierung möglicher Umweltentlastungspotenziale. In der teilflächenspezifischen Landwirtschaft kann eine hohe Präzision insbesondere dann erreicht werden, wenn die Landwirte über entsprechendes Wissen zur Anwendung der (Präzisions-)Technologien verfügen. Der Aus- und Weiterbildung kommt hier eine zentrale Rolle zur Unterstützung der Praxisakteure zu.

Die Bemessung der potenziellen Wirkungen einer umfassend vernetzten, digitalisierten und automatisierten Landwirtschaft auf der Makroebene ist in der wissenschaftlichen Literatur strittig. Gotsch et al. (2020) sehen in ihrer Studie für das Umweltbundesamt, ein erhebliches Potenzial für den Umweltschutz durch die Digitalisierung der Landwirtschaft. Erstens weil sich Stoffeinträge reduzieren und

Betriebsprozesse optimieren lassen, zweitens weil sich die präzisere, auf besserer Datenbasis fundierte Bewirtschaftung positiv auf die Ökologie des landwirtschaftlichen Umfelds auswirken. Außerdem würden die Auswirkungen auf ein positives Transformationspotenzial hinsichtlich nachhaltiger Betriebs- und Konsumstrukturen hinweisen, wofür jedoch bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein müssen (Gotsch et al. 2020). Die Aussagen aus der Studie stützen sich im Wesentlichen auf einen Dialog mit Stakeholdern und deren Bewertungen. Es fehlen Informationen zur Größenordnung der Effekte. Entsprechende Quantifizierungen von Umweltwirkungen sind notwendig. Zur Messung von Umweltoutcomes können digitale Technologien Anwendung finden. (Betriebs-)Daten von Maschinen und Geräten liefern hilfreiche Erkenntnisse für den Umweltschutz und die Erfassung von Umweltschutzpotenzialen. Unklar ist jedoch noch, wo diese Daten erhoben, gebündelt und ausgewertet werden sollen. Weiterhin besteht Bedarf, Methodiken zur Messung von Umweltwirkungen zu entwickeln bzw. zu verfeinern.

Deutlich zurückhaltender bewerten Kehl et al. (2021, S. 14) die Realisierung der Umweltentlastungspotenziale digitaler Agrartechnologien auf der Makroebene. Ihnen zufolge können digitale Agrartechnologien und darauf aufgesetzte Anwendungen infolge einer höheren Produktionseffizienz in unterschiedlichem Umfang den Einsatz von Betriebsmitteln verringern und in der Folge Umweltentlastungen bewirken. Dabei wird betont, dass die Größenordnung der in der landwirtschaftlichen Praxis erzielbaren Entlastungseffekte in vielen Fällen unklar ist (Kehl et al. 2021, S. 14). Zukünftig rechnen Kehl et al. damit, dass mit der technischen Weiterentwicklung und durch Vernetzung größere positive Umweltwirkungen zu erwarten sind. Die Effekte erscheinen aber dennoch auf der Makroebene nicht ausreichend bzw. teilweise nicht geeignet zu sein, um einige wichtige Umweltprobleme der landwirtschaftlichen Produktion zu beheben (Kehl et al. 2021, S. 150). Dazu gehört insbesondere die Stickstoffproblematik. Die Stickstoffüberschüsse in Deutschland sind insgesamt zu hoch. In bestimmten Gebieten mit hohem Viehbesatz und Anbau von Sonderkulturen kommt es aufgrund des hohen Anfalls organischer Düngemittel (Wirtschaftsdünger und Gärreste aus Biogasanlagen) zu Überschreitungen der Stickstoffobergrenze für organische Dünger und zu hohen Stickstoffüberschüssen gemäß der Düngeverordnung (UBA 2022). Bisher ist nicht ersichtlich, dass sich die praktizierte flächenspezifische Stickstoffdüngung auf den nationalen durchschnittlichen Stickstoffüberschuss auswirkt. Nach Kehl et al. (2021, S. 119) „kann nicht beurteilt werden, ob dies an einer bisher geringen Verbreitung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung, an in der Praxis geringen Entlastungseffekten durch die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung oder Kompensationseffekten durch andere Entwicklungen liegt“.

6.2 Ressourcen- und Energieverbrauch digitaler Agrartechnologien: Vernachlässigbar oder blinder Fleck der Forschung?

Generell wird angenommen, dass die direkten Effekte der Digitalisierung im Bereich der Landwirtschaft vernachlässigbar sind. Gotsch et al. (2020) kommen zu der Einschätzung, dass

„[...] die Veränderungen von Stoffströmen und dem Energieverbrauch für die Herstellung, den Betrieb und die Entsorgung der dafür eingesetzten IKT selbst relativ unbedeutend sind im Vergleich zu den Stoffströmen und Energieverbräuchen durch die indirekten Effizienz- und Ersatzwirkungen von IKT (Energieverbrauch für Landmaschinen, Düngemittel- und Pflanzenschutzmitteleinsatz pro Ertragseinheit, etc.). Im Vergleich der ökologischen Belastungen während Herstellung, Betrieb und Entsorgung schneiden Kleinstroboter vergleichbar ab, wie heute im Einsatz befindliche Großmaschinen. Ansonsten ist bei den direkten Effekten wie in anderen Anwendungsfeldern zunächst mit

einer negativen Umweltwirkung zu rechnen. Bei den indirekten Effekten sind jedoch deutliche Effizienzgewinne zu vermerken. Diese ergeben sich durch mögliche Einsparungen bei Düngemitteln und Pestiziden, da ein zielgenaueres Arbeiten ermöglicht wird.“ (Gotsch et al. 2020, S. 22)

Es fehlen aber Informationen zur Größenordnung der Effekte. Belastbare Daten und Berechnungen über die Umweltwirkungen auf der First-Order-Ebene liegen bis dato nicht vor. Ein bislang vernachlässigter Faktor ist die Datenmenge, die in digitalen Nutzungssystemen erhoben, übertragen, verarbeitet und gespeichert werden müssen. Berücksichtigt werden müssten die Auswirkungen der vernetzten Geräte und Systeme auf den Energieverbrauch nicht nur in den Landmaschinen, Drohnen etc., sondern auch in den Netzwerken und Infrastrukturen, die am Datenaustausch und Datenverarbeitung beteiligt sind – von WLAN und Mobilfunk bis zu Rechnerstationen (Mobile Edge Computing) und Infrastrukturanlagen (wie Satelliten, Rechenzentren). Beispielsweise scannen autonome Feldroboter mittels Sensorik permanent ihre Umgebung. Hinzu kommen weitere Datenflüsse für das GPS, das Radar und die Sensoren zur Abstandsmessung. Alle Informationen, die die Roboter für die Feldarbeit im Schwarm brauchen, holen sie sich „Over-the-Air“ aus der Cloud. Je mehr Kommunikation zwischen Landmaschinen und Infrastruktur sowie zwischen Landmaschinen und Datenplattform notwendig ist, desto höher ist der daraus resultierende Energieverbrauch. Nach Angaben der Mobilfunkbetreiber (Gajek 2019) und bestätigt durch weitere Untersuchungen (Höfer et al. 2019) liegt der Energieverbrauch bei der Übertragung von Daten über das 4G Netz bei 3,5 Wattstunden pro übertragenes Gigabyte an Daten und bei 5G bei 1 Wattstunde pro Gigabyte übertragener Daten. In welcher Größenordnung der aus Datenübertragung und -verarbeitung resultierende Energieverbrauch und die damit verbundenen Umweltwirkungen (insbesondere CO₂-Emission) liegen, wurde bis dato nicht berechnet. Bisher überwiegt die vage Erwartung, dass der Datenverkehr keine kritische Größe darstellt. Es müsste aber geprüft werden, ob dies auch noch für eine so weitgehende Vision einer umfassend vernetzten Landwirtschaft mit elektronischen Komponenten und autonomen Systemen, die immer und überall eingeschaltet sind und miteinander kommunizieren (Internet of Things), zutrifft. Also für das Szenario: „Jede Maschine, jedes Feld, jede Kuh und jeder Hühnerstall generiert Daten und sendet diese in die Cloud“ (Niggli 2021, S. 97).

6.3 Nicht-intendierte Effekte und Rebound-Effekte

Die Digitalisierung eröffnet der Landwirtschaft neue Möglichkeiten für mehr Ressourceneffizienz, Klima-, Umwelt- und Naturschutz. Durch die mit der Digitalisierung einhergehenden Veränderungen können auch nicht-intendierte Nebenfolgen in unbekanntem Ausmaß auftreten. Die Risiken beziehen sich auf Befürchtungen über eine weitervorschreitende Reduktion der Biodiversität, mögliche negative Auswirkungen auf Bodenstrukturen und Bodenfruchtbarkeit sowie mögliche unvorteilhafte Veränderungen der gewachsenen Kulturlandschaften und mögliche negative Auswirkungen auf die Ressourcen- und Ökobilanz (Reichel et al. 2021, S. 164–165). Zu den nicht-intendierten Nebenfolgen gehört beispielsweise die Befürchtung, dass die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln mit Hilfe von Drohnen ein Risiko von Winddrift und Spritzschäden auf Nachbarfeldern bewirkt, was insbesondere bei ökologisch bewirtschafteten Flächen problematisch werden könnte. In der wissenschaftlichen Literatur finden sich kaum Arbeiten zu nicht-intendierten Nebenfolgen der Digitalisierung der Landwirtschaft, inwieweit die fortschreitende Digitalisierung zu negativen ökologischen Effekten führen kann und unter welchen Randbedingungen diese möglich sind (Reichel et al. 2021, S. 166).

Zu den nicht-intendierten Folgen gehören auch Rebound-Effekte. Bedingt werden Rebound-Effekte durch adaptives Verhalten von Produzenten und Konsumenten. Sie kommen insbesondere dadurch zustande, dass Effizienzverbesserungen preissenkende und einkommensstärkende und daher konsumsteigernde Wirkungen haben können. Häufig führen Effizienzsteigerungen auch zu höheren Leistungsanforderungen, so dass sich nicht der Ressourcen-Input pro Produktionseinheit reduziert, sondern der Leistungs-Output erhöht. Volkswirtschaftliche Systeme reagieren im Allgemeinen auf Effizienzerhöhungen mit einer Nachfrageausweitung. Bislang weiß man recht wenig über Rebound-Effekte im Kontext der Digitalisierung der Landwirtschaft, entsprechend groß ist die Unsicherheit bei der Abschätzung der Auswirkungen von Ressourceneffizienzgewinnen. Technologische Verbesserungen im Allgemeinen können Einsparungen von Ackerfläche ermöglichen, garantieren diese aber nicht, sondern machen sogar gegenteilige Entwicklungen im Kontext eines weitgehend offenen Marktes wahrscheinlich (Lieder 2022 unter Verweis auf Pellegrini und Fernández 2018).

Untersuchungen liegen insbesondere zu Rebound-Effekten hinsichtlich von Modernisierungen von Bewässerungssystemen vor. Demzufolge wurde festgestellt, dass die Verbesserung der Bewässerungseffizienz bei der einzelnen bewässerten Kultur bzw. Feld zwar zu spezifischen Wassereinsparungen führt, jedoch nicht zwangsläufig zu einem geringeren Wasserverbrauch im landwirtschaftlichen Betrieb oder in der Bewässerungsregion (Kehl et al. 2021, S. 150). Effizientere Bewässerungssysteme schaffen unter Umständen Anreize für die Ausweitung der bewässerten Fläche oder den Anbau wasserintensiverer Kulturen (Li und Zhao 2018; Kliem et al. 2022).

Reichel et al. (2021) und (Kliem et al. 2022) berichten, dass smarte Landmaschinen und -roboter aufgrund ihrer Flexibilität, Autonomie und Präzision die Bewirtschaftung kleiner (Rand-)Flächen und Saumstrukturen erleichtern, und infolge auch zu einer Ausweitung der landwirtschaftlich intensiv genutzten Fläche führen können. Ökologische Nischen würden verloren gehen und das Risiko eines Verlustes an Biodiversität steigen. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wird es aber als relativ unwahrscheinlich angesehen, dass der teurere Einsatz smarterer Landtechnik auf kleinen Restflächen erfolgen wird. Weiterhin könnte die Verbreitung digitaler landwirtschaftlicher Technologien mit einer Erhöhung der Schlaggrößen und auch hier mit einem Verlust an Biodiversität einhergehen (Reichel et al. 2021).

Nach Weller von Ahlefeld können Rebound-Effekte insbesondere bei der Bewässerung auftreten. Geringere Rebound-Effekte können für die Nutzung von Nährstoffen in Form von Düngemitteln und für Pflanzenschutzmittel beim Einsatz von Sensortechniken erwartet werden. Verwiesen wird u.a. auf Schieffer und Dillon. Sie konnten zeigen, dass die Nutzung von Technologien der Präzisionslandwirtschaft, wie automatische Lenksysteme und teilflächenspezifische Applikation, die Ausbringungsmenge an Düngemitteln steigern kann, und es für die Landwirte einen Anreiz zum höheren Einsatz der Ressourcen infolge der verringerten Kosten gab (Weller von Ahlefeld 2019, S. 10). Weiterhin sind nach Weller von Ahlefeld Rebound-Effekten möglich,

„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 ansteigen“. (Weller von Ahlefeld 2019, S. 10)

Mögliche Rebound-Effekte können sich bei Verbreitung der NIRS-Technologie für eine teilflächenspezifische Ausbringung von organischen Düngemitteln ergeben. So äußern Landwirte die Erwartung (Henseling und Willim 2022), dass sie sich durch die zielgenauere Ausbringung noch weiter an die gesetzlich erlaubten Maximalmengen annähern können. Darüber hinaus besteht die Erwartung, dass durch die Möglichkeit der sehr gezielten Gülleausbringung und einer genauen Aufzeichnung der ausgebrachten Mengen mit Hilfe der NIRS-Technologie der Gesetzgeber überzeugt werden kann, Umweltauflagen (besonders in roten Gebieten) zu lockern und den Landwirten mehr Handlungsspielraum zu gewähren. Die Landwirte würden sich insbesondere eine gesetzliche Regelung wünschen, die die Einhaltung eines gemittelten (Stickstoff-)Grenzwertes über mehrere Jahre erlaubt, statt in jedem Jahr den gleichen Grenzwert vorzugeben. Dies würde eine Anpassung der Düngestrategie an die Witterungsverhältnisse im jeweiligen Jahr ermöglichen.

Insgesamt ist feststellen, dass negative ökologische Nebenfolgen der Digitalisierung vermutet werden. Auch Rebound-Effekte sind zu erwarten. Über die Größenordnungen liegen bis dato keine belastbaren Daten vor.

6.4 Perspektiven der Digitalisierung für die nachhaltige Transformation der Landwirtschaft

Eine weitere zentrale, offene Frage im Diskurs über die Digitalisierung der Landwirtschaft ist, wie die Digitalisierung eine nachhaltige Transformation der Landwirtschaft fördern kann. Dies zielt auf eine Agrarwirtschaft, die die Rentabilität von Betrieben mit einer klima-, umwelt- und biodiversitätsfreundlichen Bewirtschaftung verbindet. Mit Blick darauf kommen Gotsch et al. (2020) zu der Einschätzung, dass Digital Farming „unter den jetzigen Rahmenbedingungen eher eine Fortsetzung und Optimierung bestehender landwirtschaftlicher Prozesse“ fördert. „Einen Agrarstrukturwandel wird die Digitalisierung der Landwirtschaft alleine, aus heutiger Sicht, weder auslösen, noch wesentlich beschleunigen“ (Gotsch et al. 2020, S. 33). Effizienzgewinne im Einzelnen erreichen keine Überwindung der vorhandenen Pfadabhängigkeiten. Entscheidend sind vielmehr politische Interventionen, die eine Agrarwende einleiten. Dazu hat die Zukunftskommission Landwirtschaft jüngst erste Entwicklungspfade beschrieben, in denen sich die Transformation bewegen müsste (Zukunftskommission Landwirtschaft 2021). Demzufolge müsste „zunächst das Agrar- und Ernährungssystem darauf hin angelegt sein, dass die Vermeidung schädlicher Effekte sowie die Steigerung positiver Wirkungen auf Klima, Umwelt, Biodiversität, Tierwohl und menschliche Gesundheit im unternehmerischen Interesse der landwirtschaftlichen Produzenten liegen“ (Zukunftskommission Landwirtschaft 2021, S. 1). Digitalisierung ist dabei für alle landwirtschaftlichen Produktionsweisen relevant, also konventionelle, integrierte, agrarökologische oder biologische. Für die konventionelle Produktionsweise, weil digitale Agrartechnologien (im Zusammenspiel mit anderen Maßnahmen) dazu beitragen können, die Stoff- und Nährstoffeinträge zu reduzieren, um sich tendenziell einem nachhaltigen Niveau zu nähern. Für integrierte, agrarökologische und biologische Produktionsweisen können digitale Agrartechnologien helfen, die Produktivität und den Ertrag zu steigern, oder umgekehrt formuliert, die Ertragsschwäche zu reduzieren. Im Mittel fällt der Ertrag einer biologischen Bewirtschaftung gegenüber einer konventionellen um 20 Prozent geringer aus. Das ist kein Problem für eine Produktion, die eine Qualitätsnische abdeckt (Niggli 2021, S. 69), aber sehr wohl für eine flächendeckende nachhaltige Ökologisierung, die soziale Fragen für Hersteller und Verbraucher einschließt. Technologien der digitalisierten und automatisierten Landwirtschaft, beispielsweise Feldroboter mit Hacktechnik zur Unkrautbekämpfung oder die Nutzung von

Drohnen­daten zur Entscheidungsunterstützung im Klee­gras­management haben hier, eingesetzt im Sinne einer nachhaltigen Intensivierung, ein hohes Potenzial für den ökologischen Landbau.

Finger et al. (2020) sehen insbesondere in der kohärenten Verbindung von Präzisionslandwirtschaft und Umweltschutzmaßnahmen („precision conservation“ (Capmourteres et al. 2018)) – gefördert beispielsweise durch Direktzahlungen – eine Möglichkeit die Bedeutung und Attraktivität von Precision Farming zu steigern und ökologische Vorteile bei möglichst geringen ökonomischen (Opportunitäts-) Kosten zu generieren, beispielsweise durch die Anlage von Blühstreifen in Niedrigertragszonen des Feldes.

Zur Nutzung der Potenziale der Digitalisierung für eine nachhaltige Transformation der Landwirtschaft kommt der Politik die Aufgabe zu, durch die Initiierung von Forschungsprogrammen stärker Innovationsakzente zu setzen. Eine technikgetriebene, an der Effizienzsteigerung orientierte Innovation der Agrarproduktion ist nicht ausreichend. Vielmehr werden vermehrt Forschungs- und Entwicklungsprogramme benötigt, welche sich stärker an agrarökologischen Prinzipien orientieren (Kehl et al. 2021, S. 231). Dabei sollten die Innovationsanstrengungen bei digitalen Technologien enger verknüpft werden mit anderen angestrebten Veränderungen im Ackerbau, z. B. Erweiterung des Kulturpflanzen­spektrums und der Fruchtfolgen, Polykulturen, Permakulturen oder Agroforstsysteme.

7 Fazit

Die Analyse macht mehrere Dinge deutlich:

Erstens, belastbare Daten und Fakten über die Umweltwirkungen der Digitalisierung der Landwirtschaft liegen bis dato kaum vor. Auf Ebene der First-Order-Effekte existieren grobe Abschätzungen, die zum Ergebnis kommen, dass die direkten Effekte relativ gering sind. Nicht untersucht wurde bisher die Bedeutung des über den Datentransfer erzeugten Energieverbrauchs. Auf der Second-Order Ebene existieren viele Einzelfalluntersuchungen, aber nur wenige Reviews und Metastudien, so dass sich aus den gewonnenen Ergebnissen kaum Verallgemeinerungen treffen lassen. Auf der Third-Order Ebene finden sich Hinweise auf nicht-intendierte Nebenfolgen und Rebound-Effekte. Die Risiken beziehen sich auf Befürchtungen über eine fortlaufende Reduktion der Biodiversität, mögliche negative Auswirkungen auf Bodenstrukturen und Bodenfruchtbarkeit sowie mögliche negative Auswirkungen auf die Ressourcen- und Ökobilanz. Rebound-Effekte konnten u.a. bei Modernisierungen von Bewässerungssystemen und im Bereich des Precision Farming nachgewiesen werden. Auf allen Ebenen fehlen Informationen zur Größenordnung der Effekte. Hier herrscht erheblicher Forschungsbedarf.

Zweitens, die beschriebenen Ansatzpunkte der Digitalisierung zeigen die Vielfalt und Potenziale für Ressourceneffizienz, Klima-, Umwelt- und Naturschutz. Ob die jeweiligen digitalen Agrartechnologien tatsächlich zu ökoeffizienteren und umweltentlastenden Lösungen führen (können), hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Die Ausgangsbedingungen der Betriebe spielen ebenso eine Rolle bei der Realisierung möglicher Umweltentlastungspotenziale wie naturräumliche Bedingungen, die Beschaffenheit der Betriebsflächen oder Pflanzenanbausysteme. Je nach ihrer Ausgestaltung haben die verschiedenen Agrartechnologien ein jeweils unterschiedliches Verbesserungspotenzial im Hinblick auf Umweltwirkungen der Landbewirtschaftung.

Drittens, mit der technischen Weiterentwicklung und durch Vernetzung der Agrartechnologien sind größere positive Umweltwirkungen zu erwarten. Die Effekte scheinen aber nicht ausreichend zu sein, um zentrale Umweltprobleme der landwirtschaftlichen Produktion zu beheben. Dazu gehören beispielsweise Stickstoffüberschüsse der Landwirtschaft. Unter den jetzigen agrarwirtschaftlichen, -politischen und -rechtlichen Rahmenbedingungen fördert die Digitalisierung eher eine Optimierung bestehender landwirtschaftlicher Prozesse. Eine nachhaltige Transformation wird die Digitalisierung der Landwirtschaft allein nicht wesentlich voranbringen. Notwendig ist daher die Einbettung der Digitalisierung in einen, auf Nachhaltigkeit ausgerichteten, Agrarstrukturwandel.

Literaturverzeichnis

AEM (2022): The Environmental Benefits of Precision Agriculture quantified. Hg. v. Association of Equipment Manufacturers. Online verfügbar unter <https://www.aem.org/news/the-environmental-benefits-of-precision-agriculture-quantified>, zuletzt geprüft am 22.02.2022.

Ashworth, A.; Lindsay, K.; Popp, M.; Owens, P. (2018): Economic and Environmental Impact Assessment of Tractor Guidance Technology. In: *Agricultural and Environmental Letters* 3. DOI: 10.2134/ael2018.07.0038.

Bacco, M.; Barsocchi, P.; Ferro, E.; Gotta, A.; Ruggeri, M. (2019): The Digitisation of Agriculture: a Survey of Research Activities on Smart Farming. In: *Array* 3-4, S. 100009. DOI: 10.1016/j.array.2019.100009.

Balzer, F.; Schulz, D. (2015): Umweltbelastende Stoffeinträge aus der Landwirtschaft. Möglichkeiten und Maßnahmen zu ihrer Minderung in der konventionellen Landwirtschaft und im ökologischen Landbau. Hintergrund März 2015. Unter Mitarbeit von G. Wechsung, H. Madrenes und S. Matezki. Hg. v. Umweltbundesamt.

Barnes, A. P.; Soto, I.; Eory, V.; Beck, B.; Balafoutis, A. T.; Sanchez, B. et al. (2019): Influencing incentives for precision agricultural technologies within European arable farming systems. Online verfügbar unter <https://pure.sruc.ac.uk/ws/portalfiles/portal/14983924/14996.pdf>, zuletzt geprüft am 18.07.2022.

BMEL (2019): Digitale Experimentierfelder – ein Beitrag zur Digitalisierung in der Landwirtschaft. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/digitalisierung/digitale-experimentierfelder.html>, zuletzt geprüft am 21.02.2022.

BMEL (2021): Digitalisierung in der Landwirtschaft. Chancen nutzen - Risiken minimieren. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/Shared-Docs/Downloads/DE/Broschueren/digitalpolitik-landwirtschaft.pdf>, zuletzt geprüft am 22.09.2022.

Brakensiek, S.; Kießling, R.; Troßbach, W.; Zimmermann, C. (Hg.) (2016): Grundzüge der Agrargeschichte. Köln.

Capmourteres, V.; Adams, J.; Berg, A.; Fraser, E.; Swanton, C.; Anand, M. (2018): Precision conservation meets precision agriculture: A case study from southern Ontario. In: *Agricultural Systems* 167, S. 176–185. DOI: 10.1016/j.agsy.2018.09.011.

CLAAS KGaA mbH (2021): Landwirtschaft 4.0 – Chancen und Herausforderungen am Standort Nordrhein-Westfalen. Gutachten im Auftrag des Landtags von Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter https://www.landtag.nrw.de/files/live/sites/landtag-r20/files/Internet/I.A.1/EK/17._WP/EK%20V/CLAAS_Gutachten_Version_210621.pdf, zuletzt geprüft am 22.02.2022.

Dammer, K.-H.; Thöle, H.; Volk, T.; Hau, B. (2009): Variable-rate fungicide spraying in real time by combining a plant cover sensor and a decision support system. In: *Precision Agriculture* 10 (5), S. 431–442. DOI: 10.1007/s11119-008-9088-7.

Fichter, K.; Hintemann, R.; Beucker, S.; Behrendt, S. (2012): Gutachten zum Thema „Green IT - Nachhaltigkeit“ für die Enquete-Kommission Internet und digitale Gesellschaft des Deutschen Bundestages. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH (IZT). Online verfügbar unter <https://www.izt.de/fileadmin/downloads/pdf/green-it-nachhaltigkeit-enquete-kommission-internet-und-digitale-gesellschaft.pdf>, zuletzt geprüft am 22.02.2022.

Finger, R.; Huber, R.; Wang, Y.; Späti, K.; Ehlers, M.-H. (Hg.) (2020): How digital innovations can lead to more sustainable agricultural systems. Unter Mitarbeit von Karl Behrendt und Dimitrios Pappas. Online verfügbar unter <https://www.researchgate.net/publication/344578989>, zuletzt geprüft am 12.09.2022.

Finger, R.; Swinton, S. M.; El Benni, N.; Walter, A. (2019): Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment. In: *Annual Review of Resource Economics* 11 (1), S. 313–335. DOI: 10.1146/annurev-resource-100518-093929.

Gajek, H. (2019): Vodafone: 5G braucht deutlich weniger Strom. Online verfügbar unter <https://www.teltarif.de/5g-4g-technik-stromverbrauch-mack-vodafone/news/79091.html>, zuletzt geprüft am 21.02.2022.

Gegner, K.; Henseling, C. (2022): Parallelfahrssysteme - Einschätzungen und Anforderungen aus Sicht der Nutzer. Nutzerreport. Experimentierfeld Agro-Nordwest. IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH.

Gitzel, J.; Schwarz, J. (2021): Pflanzenschutzmitteleinsparung durch boniturgestützte Applikationskarten – BoniPS. In: A. Meyer-Aurich, M. Gandorfer, C. Hoffmann, C. Weltzien, S. Bellingrath-Kimura und H. Floto (Hg.): Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft. Fokus Informations- und Kommunikationstechnologien in kritischen Zeiten: Referate der 41. GIL-Jahrestagung 08.-09. März 2021, Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V., Potsdam. Bonn: Gesellschaft für Informatik (GI-Edition. Proceedings, 309), S. 115–120.

Gotsch, M.; Erdmann, L.; Eberling, E. (2020): Digitalisierung ökologisch nachhaltig nutzbar machen. Entwicklung von Handlungsempfehlungen zu den wichtigsten umweltpolitischen Maßnahmen in ausgewählten Trendthemen der Digitalisierung mittels der Durchführung von Stakeholderdialogen. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_171-2020_digitalisierung_oekologisch_nachhaltig_nutzbar_machen.pdf, zuletzt geprüft am 22.09.2022.

Gscheidle, M. (2022): Strukturwirkung der Digitalisierung in der Landwirtschaft. Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft, Aktuelle Beiträge. DOI: 10.12767/buel.v100i1.374.

Haller, L.; Moakes, S.; Niggli, U.; Riedel, J.; Stolze, M.; Thompson, M. (2020): Entwicklungsperspektiven der ökologischen Landwirtschaft in Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-03-17_texte_32-2020_oekologische-landwirtschaft.pdf, zuletzt geprüft am 20.06.2022.

Henseling, C.; Behrendt, S.; Gegner, K.; Willim, Z. (2022a): Drohnendaten für das Klee grasmanagement – Einschätzungen und Anforderungen aus Sicht der Nutzer. Nutzerreport. Experimentierfeld Agro-Nordwest. IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH.

Henseling, C.; Behrendt, S.; Linsmaier, S. (2022b): Autonome Fütterungssysteme - Einschätzungen und Anforderungen aus Sicht der Nutzer. Nutzerreport. Experimentierfeld Agro-Nordwest. IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH.

Henseling, C.; Gegner, K. (2022): Digitale Datenerfassung zur Optimierung der Prozesskette Zuckerrübe – Einschätzungen und Anforderungen aus Sicht der Nutzer. Nutzerreport. Experimentierfeld Agro-Nordwest. IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH.

Henseling, C.; Gegner, K.; Behrendt, S. (2022c): Autonome Feldrobotik – Einschätzungen und Anforderungen aus Sicht der Nutzer. Nutzerreport. Experimentierfeld Agro-Nordwest. IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH.

Henseling, C.; Neumann, J. (2022): Drohnendaten für den teilflächenspezifischen Pflanzenschutz – Einschätzungen und Anforderungen aus Sicht der Nutzer. Nutzerreport. Experimentierfeld Agro-Nordwest. IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH.

Henseling, C.; Willim, Z. (2022): NIRS-Technologie zur Ausbringung organischer Düngemittel – Einschätzungen und Anforderungen aus Sicht der Nutzer. Nutzerreport. Experimentierfeld Agro-Nordwest. IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH.

Höfer, T.; Bierwirth, S.; Madlener, R. (2019): C15 – Energie-Mehrverbrauch in Rechenzentren bei Einführung des 5G Standards. Studie der RWTH Aachen für EON. Online verfügbar unter https://www.eon.com/content/dam/eon/eon-com/Documents/de/5G-Standard%20und%20Rechenzentren_11.12.2019.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2022.

Kehl, C.; Meyer, R.; Steiger, S. (2021): Digitalisierung der Landwirtschaft: gesellschaftliche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Effekte. Teil II des Endberichts zum TA-Projekt. TAB-Arbeitsbericht Nr. 194. Hg. v. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin. Online verfügbar unter <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000142951/146338637>, zuletzt geprüft am 25.07.2022.

Kliem, L.; Wagner, J.; Olk, C.; Keßler, L.; Lange, S.; Krachunova, T.; Bellingrath-Kimura, S. (2022): Digitalisierung der Landwirtschaft. Chancen und Risiken für den Natur- und Umweltschutz. Schriftenreihe des IÖW 222/22. Hg. v. Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung. Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung; Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V. Berlin. Online verfügbar unter https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/Schriftenreihen/IOEW_SR_222__Digitalisierung_der_Landwirtschaft.pdf, zuletzt geprüft am 12.09.2022.

Li, H.; Zhao, J. (2018): Rebound Effects of New Irrigation Technologies: The Role of Water Rights. In: *American Journal of Agricultural Economics* 100 (3), S. 786–808. DOI: 10.1093/ajae/aay001.

Lieder, S. (2022): Chancen und Risiken der Digitalisierung für eine Ökologisierung einzelner Arbeitsschritte der ackerbaulichen Produktion. In: Frank Fuchs-Kittowski, Andreas Abecker und Friedhelm Hosenfeld (Hg.): *Umweltinformationssysteme - Wie trägt die Digitalisierung zur Nachhaltigkeit bei?* Tagungsband des 28. Workshops "Umweltinformationssysteme (UIS 2021)" des Arbeitskreises

„Umweltinformationssysteme“ der Fachgruppe „Informatik im Umweltschutz“ der Gesellschaft für Informatik (GI). 1st ed. 2022. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Vieweg (Springer eBook Collection), S. 127–148. Online verfügbar unter <https://online-library.wiley.com/doi/pdf/10.1111/wre.12307>, zuletzt geprüft am 12.09.2022.

Mahrrens, S.; Schmidt, S.; Frauenstein, J.; Mathews, J.; Bussian, B.-M.; Penn-Bressel, G. et al. (2015): Bodenzustand in Deutschland. zum "Internationalen Jahr des Bodens". Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/bodenzustand_in_deutschland_0.pdf, zuletzt geprüft am 16.02.2022.

Malaj, E.; Ohe, P. C. von der; Grote, M.; Kühne, R.; Mondy, C. P.; Usseglio-Polatera, P. et al. (2014): Organic chemicals jeopardize the health of freshwater ecosystems on the continental scale. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (26), S. 9549–9554. DOI: 10.1073/pnas.1321082111.

Martinéz, J. (2016): Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Landwirtschaft - die rechtliche Dimension. In: *Przeegląd Prawa Rolnego/Agricultural Law Review* (19), S. 13–44. Online verfügbar unter <http://cejsh.icm.edu.pl/cejsh/element/bwmeta1.element.desklight-4ae5f9fa-478e-4ea1-be57-e45200688bab>, zuletzt geprüft am 20.09.2021.

Meinardi, D.; Schröder, J.; Riedel, A.; Röttcher, K.; Kraft, M.; Grocholl, J.; Dittert, K. (2021): Sensorgestützte Beregnung von Kartoffeln. Entwicklung des Crop Water Stress Index für Nordostniedersachsen. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen Working Paper 179). Online verfügbar unter https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-workingpaper/ThuenenWorkingPaper_179.pdf, zuletzt geprüft am 14.02.2022.

MLR (o.D.): Landwirtschaft 4.0 - nachhaltig.digital. Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg. Online verfügbar unter <https://mlr.baden-wuerttemberg.de/de/unsere-themen/landwirtschaft/landwirtschaft-40/landwirtschaft-40/>, zuletzt geprüft am 23.09.2022.

Motsch, V.; Hauser, L.; Schuster, J.; Bauer, A.; Bauer, T.; Brunner, M. et al. (2021): Dissemination of precision farming technologies in Austria in the context of energy savings potential. A survey on the mechanization of Austrian arable farms. In: A. Meyer-Aurich, M. Gandorfer, C. Hoffmann, C. Weltzien, S. Bellingrath-Kimura und H. Floto (Hg.): Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft. Fokus Informations- und Kommunikationstechnologien in kritischen Zeiten: Referate der 41. GIL-Jahrestagung 08.-09. März 2021, Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V., Potsdam. Bonn: Gesellschaft für Informatik (GI-Edition. Proceedings, 309), S. 223–228.

Niggli, U. (2021): Alle satt? Ernährung sichern für 10 Milliarden Menschen. Salzburg, Wien: Residenz Verlag (Leben auf Sicht).

Nordmeyer, H. (2006): Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz – Beitrag der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung. In: *Nachrichtenblatt Deutscher Pflanzenschutzdienst* 58(12), S. 317–322.

Nüssel, M. (2018): Landwirtschaft 4.0 – die Waffe gegen Hunger und Umweltzerstörung? In: Christian Bär, Thomas Grädler und Robert Mayr (Hg.): Digitalisierung im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Recht. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 343–363.

Pellegrini, P.; Fernández, R. 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 of the United States of America* 115 (10), S. 2335–2340. DOI: 10.1073/pnas.1717072115.

Porter, M. E.; Heppelmann, J. E. (2014): Wie smarte Produkte den Wettbewerb verändern. In: *Harvard Business Manager* (Sonderdruck aus Heft 12/2014), S. 1–28. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/12324512-Wie-smarte-produkte-den-wettbewerb-veraendern.html>, zuletzt geprüft am 22.02.2022.

Reichel, C.; Pascher, P.; Scholz, R. W.; Berger, G.; Brunsch, R.; Strobel-Unbehaun, T. et al. (2021): Agrarökologische Auswirkungen der Digitalisierung. Supplementarische Information (SI 4.1) zum Kapitel 4: Landwirtschaft, Digitalisierung und digitale Daten. In: Roland W. Scholz, Markus Beckedahl, Stephan Noller und Ortwin Renn (Hg.): DiDaT Weißbuch. Verantwortungsvoller Umgang mit digitalen Daten – Orientierungen eines transdisziplinären Prozesses: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG. Online verfügbar unter https://didat.eu/files/pdf/vernehm/WBK04/SI4_1_Agraroeologische_Auswirkungen.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2021.

Rohleder, B.; Krüsken, B.; Reinhardt, H. (2020): Digitalisierung in der Landwirtschaft 2020, 2020. Online verfügbar unter https://www.bitkom-research.de/system/files/document/200427_PK_Digitalisierung_der_Landwirtschaft.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2022.

Soto, I.; Barnes, A.; Eory, V.; Beck, B.; Balafoutis, A.; Sanchez, B. et al. (2018): Which factors and incentives influence the intention to adopt precision agricultural technologies? International Association of Agricultural Economists. Vancouver, British Columbia (2018 Conference, July 28 - Aug 2).

Speckle, J.; Angermair, W.; Brohmeyer, F.; Brüggemann, L.; Spicker, A.; Pauli, S. A. (2020): Teilflächen-spezifische Düngung als Reaktion auf wachsende gesellschaftliche Anforderungen und als Beitrag zur Entspannung des Widerspruchs zwischen Ökonomie und Ökologie. In: Markus Gandorfer, Andreas Meyer-Aurich, Heinz Bernhardt, Franz Xaver Maidl, Georg Fröhlich und Helga Floto (Hg.): Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft. Fokus: Digitalisierung für Mensch, Umwelt und Tier. 40. GIL-Jahrestagung. Freising, 17.-18. Februar 2020 (Lecture Notes in Informatics (LNI) - Proceedings, 299).

Spoerer, M; Streb, J (Hg.) (2013): Neue deutsche Wirtschaftsgeschichte des 20. Jahrhunderts. München.

Springer Gabler Verlag (Hg.) (2018): Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: Automatisierung. Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/automatisierung-27138/version-250801>, zuletzt geprüft am 21.11.2021.

Trautz, D. (2021): Ökologischen Landbau 4.0 Neueste Entwicklungen und aktuelle Forschungsfragen. Osnabrück. Online verfügbar unter https://de.agrardialog.ru/files/prints/trautz_d_okologischer_landbau_4_0_neueste_entwicklungen_und_aktuelle_forschungsfragen_juli_2021.pdf, zuletzt geprüft am 20.06.2022.

UBA (2022): FAQs zu Nitrat im Grund- und Trinkwasser. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/grundwasser/nutzung-belastungen/faqs-zu-nitrat-im-grund-trinkwasser#was-ist-der-unterschied-zwischen-trinkwasser-rohwasser-und-grundwasser>, zuletzt geprüft am 22.02.2022.

Walter, A.; Finger, R.; Huber, R.; Buchmann, N. (2017): Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114 (24), S. 6148–6150. DOI: 10.1073/pnas.1707462114.

Weller von Ahlefeld, P. J. (2019): Rebound Effekte in der Präzisionslandwirtschaft - ein Kommentar. In: *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* 97 (3), S. 1–21. Online verfügbar unter <https://buel.bmel.de/index.php/buel/article/view/247/pdf>, zuletzt geprüft am 25.10.2021.

Zukunftskommission Landwirtschaft (2021): Zukunft Landwirtschaft. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/abschlussbericht-zukunftskommission-landwirtschaft.pdf>, zuletzt geprüft am 23.09.2022.

www.izt.de
