

Lea Kliem, Josephin Wagner, Christopher Olk, Luisa Keßler, Steffen Lange, Tsvetelina Krachunova und Sonoko Bellingrath-Kimura

Digitalisierung der Landwirtschaft

Chancen und Risiken für den Natur- und Umweltschutz

Schriftenreihe des IÖW 222/22



i | ö | w

INSTITUT FÜR
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG



Leibniz-Zentrum für
Agrarlandschaftsforschung
(ZALF) e.V.

Lea Kliem, Josephin Wagner, Christopher Olk, Luisa Keßler, Steffen Lange, Tsvetelina Krachunova und Sonoko Bellingrath-Kimura

Digitalisierung der Landwirtschaft

Chancen und Risiken für den Natur- und Umweltschutz

Gefördert durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN)
unter dem Forschungskennzeichen 3519 84 0500.

Schriftenreihe des IÖW 222/22
Berlin, Februar 2022

ISBN 978-3-940920-26-3

Impressum

Herausgeber:

Institut für ökologische
Wirtschaftsforschung GmbH, gemeinnützig
Potsdamer Straße 105
D-10785 Berlin
Tel. +49 – 30 – 884 594-0
Fax +49 – 30 – 882 54 39
E-Mail: mailbox@ioew.de
www.ioew.de

In Kooperation mit:



Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsfor-
schung (ZALF) e. V.
Eberswalder Str. 84
D-15371 Müncheberg
Tel. +49 – 33432 – 820
E-Mail: zalf@zalf.de
www.zalf.de

Gefördert durch:



Bundesministerium für Naturschutz (BfN)
Konstantinstr. 110
D-53179 Bonn
Tel. +49 – 0228 – 8491– 0
E-Mail: info@bfm.de
www.bfn.de

Zusammenfassung

Zunehmende ökologische Herausforderungen, wie der rapide Verlust von Biodiversität oder der Klimawandel, stellen landwirtschaftliche Betriebe vor die Mammutaufgabe Arten- und Tierschutz-, Bodenschutz-, und Klimaschutzmaßnahmen mit Ertragsstabilität und der Erzeugung qualitativ hochwertiger Nahrung in Einklang zu bringen. Zur effektiven Bewältigung dieser Herausforderungen wird der Digitalisierung des Agrarsektors in Praxis und Wissenschaft häufig eine Schlüsselrolle beigemessen. Empirische Belege dafür gibt es bisher jedoch nur wenige.

Bereits jetzt kommen in Deutschland in einer Großzahl landwirtschaftlicher Betriebe digitale Technologien oder Anwendungen zum Einsatz. Hierzu zählen unter anderem Lenk- und Fahrerassistenzsysteme, vernetzte (Boden-)Sensoren, intelligente Datenmanagementsysteme, drohnenbasierte Bilderkennungssysteme und GPS-gesteuerte Agrarroboter. Die zunehmende Digitalisierung der Landwirtschaft birgt dabei sowohl Potenziale als auch Risiken für den Biodiversitätsschutz. Eine gesteigerte Ressourceneffizienz kann Düngemittel, Chemieeinsatz und Treibhausgasemissionen verringern. Auch ein verbessertes Monitoring und Tracking umweltbezogener Daten kann biodiversitätsfördernde Maßnahmen erleichtern. Kleinere Feldroboter können zudem die Bodenverdichtung verringern und komplexere Anbausysteme mit höherer Agrobiodiversität ermöglichen. Es fehlen jedoch Analysen zu der Größenordnung der Effekte die auf die Nutzung von digitalen Technologien zurückzuführen sind. Neben den Chancen, die die Digitalisierung bietet, besteht das Risiko, dass digitale Technologien zur weiteren Intensivierung von Agrarsystemen beitragen und somit eine nachhaltigkeitsorientierte Transformation der Landwirtschaft erschweren. Auch bedürfen die Produktion und Anwendung digitaler Technologien selbst Energie und Materialien. Höhere Effizienz kann zudem zu Rebound-Effekten führen, wodurch Einsparungen konterkariert würden. Darüber hinaus können die erhofften Ressourceneinsparungen in kleinen und mittelständischen Betrieben aufgrund von hohem administrativem Aufwand ausbleiben. Auf sozio-ökonomischer Ebene scheinen die Risiken bislang zu überwiegen. Insbesondere zeigt sich eine Tendenz zur Konzentration von infrastruktureller, ökonomischer und datenbasierter Macht, die auch ökologisch negative Auswirkungen wie die Homogenisierung von Anbausystemen mit sich bringen könnte.

Die Analyse zeigt, dass der Erhalt von Biodiversität und Ökosystemen aktuell kein primäres Ziel der Digitalisierung der Landwirtschaft ist, sondern lediglich einen möglichen Nebeneffekt darstellt. Insgesamt klafft eine große Lücke zwischen dem theoretisch möglichen Nutzen und dem bislang tatsächlich Beobachtbaren. Die Potenziale der Digitalisierung für Biodiversitätsschutz werden tendenziell vernachlässigt und voraussichtlich ungenutzt bleiben, weil sie bisher ökonomisch nicht rentabel sind. Außerdem ergeben sich aus der Digitalisierung wiederum neue, andersgelagerte Herausforderungen und Risiken. Technologische Entwicklungen wie Präzisionslandwirtschaft, Smart Farming und Landwirtschaft 4.0, sind daher als Werkzeuge zu verstehen, die helfen können, biodiversitätsfördernde Ansätze zu verbreiten. Sie tragen jedoch aktuell wenig dazu bei, industriell geprägte Landwirtschaftssysteme grundlegend zu transformieren und können eine größere agrarökologische Transformation gar hemmen. Eine strategische staatliche Lenkung der digitalen Transformation der Landwirtschaft zur Nutzung vielversprechender Potenziale mit Anreizen und Eindämmung potenzieller Risiken ist daher notwendig.

Abstract

Increasing ecological challenges, such as the rapid loss of biodiversity or climate change, present farms with the challenging task of reconciling species and animal protection, soil conservation and climate protection measures with yield stability and the production of high-quality food. The digitalization of the agricultural sector is often seen to play a key role in effectively meeting these challenges. However, empirical evidence of this is so far scarce.

Digital technologies or applications are already being used on many German farms. These include driver assistance systems, (ground) sensor networks, intelligent data management systems, drone-based image recognition systems and GPS-controlled agricultural robots. The digitalization of the agricultural sector holds both potentials and risks for biodiversity conservation. Increased resource efficiency can reduce fertilizer, chemical use, and greenhouse gas emissions. Improved monitoring and tracking of environmentally related data can also facilitate biodiversity-enhancing measures. Smaller field robots can reduce soil compaction and enable more complex cropping systems with higher agrobiodiversity. However, there is a lack of analysis on the magnitude of effects attributable to the use of digital applications. There is also a risk that digital technologies will contribute to the further intensification of agricultural systems and thus impede a sustainability-oriented transformation of agriculture. The production and use of digital technologies themselves also require energy and materials. Higher efficiency can lead to rebound effects, which would counteract savings. In addition, the hoped-for resource savings in small and medium-sized enterprises may fail to materialize due to high administrative hurdles. On a socio-economic level, the risks seem to outweigh the benefits. In particular, there is a tendency towards infrastructural, economic and market concentration, which may also have ecologically negative effects such as the homogenization of farming systems.

Our analysis shows that the preservation of biodiversity and ecosystems is currently not a primary goal of the digitalization of agriculture but is merely a possible side effect. Overall, there is a significant gap between the theoretically possible benefits and the empirical observation. The potentials of the digitalization for biodiversity conservation tend to be neglected and are likely to remain unused since they are so far not profitable. Furthermore, digitalization, in turn, gives rise to new, different challenges and risks. Technological developments such as precision agriculture, smart farming, and Agriculture 4.0 should hence be seen as tools that can help spread biodiversity-enhancing approaches. However, they do little to fundamentally transform industrialized agricultural systems and may even inhibit a larger agroecological transformation. Consequently, strategic governance of the digital transformation of agriculture is necessary to exploit promising potentials for biodiversity conservation and mitigate potential risks.

Die Autorinnen und Autoren

Lea Kliem ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Forschungsfeld Umweltökonomie und Umweltpolitik am Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Sie arbeitet zu den Themenschwerpunkten Saatgut, Landnutzung, Ernährungspolitik und Agrarumweltpolitik.

Kontakt: Lea.Kliem@ioew.de

Tel. +49 – 30 – 884 594 34

Josephin Wagner ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Forschungsfeld Umweltökonomie und Umweltpolitik am Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Sie beschäftigt sich mit den Themenschwerpunkten Digitaler Wandel, Ökonomie und Governance sowie sozial-ökologische Transformation.

Kontakt: Josephin.Wagner@ioew.de

Tel. +49 – 30 – 884 594 45

Christopher Olk war bis April 2021 studentischer Mitarbeiter im Forschungsfeld Umweltökonomie und Umweltpolitik am Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Er studiert zurzeit heterodoxe Ökonomik in Rom.

Kontakt: chrstphr.olk@gmail.com

Luisa Keßler ist studentische Mitarbeiterin im Forschungsfeld Umweltökonomie und Umweltpolitik am Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Am IÖW beschäftigt sie sich mit dem Zusammenhang von Digitalisierung und Nachhaltigkeit.

Kontakt: Luisa.Kessler@ioew.de

Tel. +49 – 30 – 884 594 376

Dr. Steffen Lange ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsfeld Umweltökonomie und Umweltpolitik am Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) und lehrt an der Humboldt-Universität zu Berlin. In seiner Forschung beschäftigt er sich mit dem Zusammenhang von Digitalisierung und Nachhaltigkeit, mit Konzepten für Nachhaltige Ökonomien, sowie transdisziplinären Forschungsmethoden.

Kontakt: Steffen.Lange@ioew.de

Tel. +49 – 30 – 884 5944 27

Tsvetelina Krachunova ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Programmbereich 2 „Landnutzung und Governance“ am Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V.

Kontakt: tsvetelina.krachunova@zalf.de

Tel. +49 – 33432 – 882 07

Prof. Dr. agr. Sonoko Bellingrath-Kimura ist Leiterin des Programmbereich 2 am „Landnutzung und Governance“ am Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V. und Professorin für Landnutzungssystem an der Humboldt-Universität zu Berlin.

Kontakt: Sonoko.Bellingrath-Kimura@zalf.de

Tel. +49 – 33432 – 82 310

Unter Mitarbeit von

Christopher Marples

Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Programmbereich 2 „Landnutzung und Governance“ am Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V.

und

Friederike Schwiertz

Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Programmbereich 2 „Landnutzung und Governance“ am Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V.

Inhaltsverzeichnis

1	Landwirtschaft im Wandel der Zeit.....	12
2	Konzepte für eine nachhaltige Transformation der Landwirtschaft.....	14
3	Trends der Digitalisierung in der Landwirtschaft	15
3.1	Präzisionslandwirtschaft.....	16
3.2	Smart Farming	18
3.3	Landwirtschaft 4.0	19
3.4	Internet of Things	20
3.5	Maschinelles Lernen	20
3.6	Plattformen.....	21
4	Digitale Technologien für den Biodiversitätsschutz.....	23
4.1	Digitale Landmaschinensysteme	24
4.2	Sensoren und Robotik.....	26
4.3	Drohnen	34
4.4	Farm-Management-Informationen-Systeme	36
4.5	Digitale Nachschlagewerke und Citizen Science.....	39
5	Chancen der Digitalisierung der Landwirtschaft	44
5.1	Ressourceneffizienz.....	44
5.2	Verbessertes Monitoring und Tracking umweltbezogener Daten	47
5.3	Emissionsreduktion	48
5.4	Bodenentlastung	48
5.5	Komplexere Anbausysteme	49
5.6	Chancen für die Tierhaltung.....	49
5.7	Sozio-ökonomische Chancen	50
6	Risiken der Digitalisierung der Landwirtschaft.....	51
6.1	Intensivierung der Landwirtschaft	52
6.2	Bodenverdichtung	52
6.3	Material- und Energieverbrauch.....	53
6.4	Homogenisierung der Anbausysteme	53
6.5	Auswirkungen auf die Gentechnik	53
6.6	Intensivierung und Ausweitung der Tierhaltung.....	54
6.7	Sozio-ökonomische Risiken	54
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	55
8	Literaturverzeichnis.....	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Übersicht digitaler Landmaschinensysteme.....	25
Tabelle 4.2:	Übersicht Sensoren	27
Tabelle 4.3:	Übersicht Robotik	29
Tabelle 4.4:	Übersicht Sensoren und Robotik.....	33
Tabelle 4.5:	Übersicht Drohnen (UAV).....	35
Tabelle 4.6:	Übersicht Farm-Management-Informationen-Systeme	37
Tabelle 4.7:	Übersicht Digitale Nachschlagewerke – Citizen Science	40

Abkürzungsverzeichnis

BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
CSA	Climate Smart Agriculture
DIAS	Data and Information Access Services
DSS	Decision Support Systems
EU	Europäische Union
FMIS	Farm-Management-Informationen-Systeme
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik der Europäischen Union
GIS	Geografische Informationssysteme
GNSS	Globale Navigationssatellitensysteme
GPS	Globales Positionsbestimmungssystem
IoT	Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
M2M	Maschine zu Maschine
NABU	Naturschutzbund Deutschland
NI	Nachhaltige Intensivierung
PLF	Precision Livestock Farming
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

1 Landwirtschaft im Wandel der Zeit

Die Digitalisierung ist eine der prägendsten Entwicklungen unserer Zeit. Sie durchdringt nahezu alle Lebensbereiche und ist auch aus der Landwirtschaft kaum mehr wegzudenken. Der weitreichende digitale Wandel der Landwirtschaft zeichnet sich bereits seit über zwei Jahrzehnten ab und gilt als Hoffnungsträger, negative sozial-ökologische Auswirkungen des Agrarsektors in Deutschland und weltweit zu minimieren (BMEL, 2021). Neben vielversprechenden Chancen birgt die Digitalisierung jedoch auch Risiken.

Eine der größten Herausforderungen der Landwirtschaft stellt der rapide Verlust von Arten und Ökosystemen dar, auf deren natürliche Dienstleistungen die Landwirtschaft angewiesen ist (IPBES, 2019; v.d. Decken et al., 2017). So ist beispielsweise die Biomasse von Bestäuberinsekten in Deutschland seit 1980 um bis zu 75 Prozent zurückgegangen (Segeer & Rosenkranz, 2017). In der Europäischen Union (EU) sind landwirtschaftliche Praktiken dabei für fast 50 Prozent aller Umweltbelastungen von Luft, Wasser und Böden verantwortlich (European Environment Agency, 2020).

Auch der Klimawandel stellt die Landwirtschaft in Deutschland vor neue Herausforderungen. Stellvertretend dafür stehen Ertragseinbußen aufgrund extremer Wetterereignisse und Veränderungen in Niederschlagsmengen und Temperaturen. Dies birgt Risiken für die langfristige Ertragsstabilität und erhöht die Vulnerabilität landwirtschaftlicher Betriebe (Kliem & George, 2018). Gleichzeitig ist der Landwirtschaftssektor für neun Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Das entspricht einem absoluten Ausstoß von rund 66,4 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent, wovon rund ein Viertel auf den Methanausstoß durch Tierhaltung, insbesondere von Rindern, zurückzuführen ist (Umweltbundesamt, 2020, 2021a).

Eine weitere Herausforderung ist die Degradation von Ackerböden. Weltweit sind rund 75 Prozent der Böden bereits von Degradation und Desertifikation betroffen, die primär auf intensive landwirtschaftliche Nutzung und Klimaveränderungen zurück zu führen sind (Cherlet et al., 2018). Auch in Deutschland nimmt die Bodenqualität stetig ab (Umweltbundesamt, 2015). Monokulturelle Bewirtschaftung, intensive Tierhaltung und Überdüngung stören die natürlichen Kreisläufe von Stickstoff, Kohlenstoff, Phosphat und Kalium in kritischem Maße und führen unter anderem zur steigenden Nitratbelastung des Grundwassers (Çilek et al., 2020; Steffen et al., 2015; Sutton et al., 2016).

Die Viehhaltung und insbesondere die Intensivtierhaltung in Deutschland steht ebenfalls vor besonderen Herausforderungen, zu denen neben dem Klimaschutz auch ein steigendes gesellschaftliches Bewusstsein für artgerechte Tierhaltung und faire Arbeitsbedingungen in der Fleischindustrie zählen (Erol & Schulten, 2020; Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim BMEL, 2015). Hinzu kommen sozio-ökonomische Herausforderungen wie die fortwährende Tendenz zur Aufgabe kleiner und mittelständischer Betriebe, eine wachsende Konzentration von Landeigentum und Produktionsmitteln sowie steigender Preisdruck (vgl. etwa AgrarBündnis e.V., 2019; Griepentrog et al., 2020; Schneider & Heinrich, 2017).

Landwirtschaftliche Betriebe in Deutschland stehen daher vor der Mammutaufgabe Arten- und Tierschutz-, Bodenschutz-, und Klimaschutzmaßnahmen mit wirtschaftlicher Rentabilität, Ertragsstabilität und der Erzeugung qualitativ hochwertiger Nahrung in Einklang zu bringen. Um der steigenden Nachfrage an hochwertigen Lebensmitteln gerecht zu werden, die Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Agrarhandels langfristig zu gewährleisten und gleichzeitig die Verlagerung von

Emissionsquellen in Drittstaaten zu minimieren, müssen zudem möglicherweise Ertragssteigerungen erzielt werden (Balogh & Jámbor, 2020; BMEL, 2021; Wüstemann et al., 2017).

Zur effektiven Bewältigung dieser vielschichtigen Herausforderungen wird der Digitalisierung des Agrarsektors in Praxis und Wissenschaft eine Schlüsselrolle beigemessen. Laut einer Umfrage an der 500 Landwirt*innen mit Betrieben ab 30 Hektar teilgenommen haben, kommen in Deutschland bereits jetzt in acht von zehn landwirtschaftlichen Betrieben digitale Technologien oder Anwendungen zum Einsatz (Rohleder et al., 2020). Hierzu zählen Lenk- und Fahrerassistenzsysteme, vernetzte (Boden-)Sensoren, intelligente Datenmanagementsysteme, drohnenbasierte Bildererkennungssysteme, GPS-gesteuerte Agrarroboter oder Sensoren, die beispielsweise Tiergesundheitsdaten aus den Viehbeständen übermitteln. Mit einem Verbreitungsgrad von je 40 bis 45 Prozent sind GPS-gesteuerte Landmaschinen, Agrar-Apps sowie Farm- und Herdenmanagementsysteme am weitesten verbreitet. Jeweils rund 30 Prozent der Betriebe machen zudem Gebrauch von Methoden und Technologien zur teilflächenspezifischen Ausbringung von Dünger und Pflanzenschutzmitteln sowie von Sensortechnik im Pflanzenbau und in der Tierhaltung. Robotik, Drohnen und künstliche Intelligenz (KI) werden hingegen nur von neun bis zwölf Prozent der Landwirt*innen genutzt. In weiteren zehn Prozent der landwirtschaftlichen Betriebe sind digitale Technologien und Anwendungen in Planung oder Diskussion. Grundsätzlich kommen digitale Tools mit zunehmender Betriebsgröße vermehrt zum Einsatz (Rohleder et al., 2020).

Die Digitalisierung in der Landwirtschaft entwickelt sich also zunehmend zum Standard landwirtschaftlicher Praxis. Innerhalb dieses Transformationsprozesses lassen sich zwei Entwicklungspfade unterscheiden. Zum einen werden bestehende Bewirtschaftungsmethoden und Verwaltungsprozesse digitalisiert, wobei vorhandene Maschinen und Technologien um entsprechende digitale Anwendungen und technische Möglichkeiten ergänzt werden. Dies verändert die Anbaumethoden nicht grundsätzlich, kann jedoch zu einem ressourceneffizienteren Arbeiten beitragen. Zum anderen werden grundlegend neue Anbautechnologien entwickelt, wie Feldroboter oder Drohnen, die von bisher genutzten Landmaschinen grundsätzlich abweichen (Gaus et al., 2017).

Auch auf politischer Ebene gewinnt die digitale Transformation der Landwirtschaft und der damit einhergehende Lenkungsbedarf zunehmend an Relevanz. So wird die Digitalisierung des Sektors im Kontext des europäischen Grünen Deals, der „Vom Hof auf den Tisch“ Strategie und der EU-Biodiversitätsstrategie als ein zentraler Treiber zur Erreichung von Klima- und umweltpolitischen Zielen gesehen (Europäische Kommission, 2019, 2020c, 2020d). Dies ist auch in der Digitalstrategie der Kommission und der europäischen Datenstrategie reflektiert (Europäische Kommission, 2020a, 2020b). Letztere strebt beispielsweise die Erstellung eines gemeinsamen europäischen Agrardatenraumes im Sinne einer EU-weiten Datenplattform für landwirtschaftliche Daten an (Europäische Kommission, 2020a).

Auf Bundesebene fördert das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) im Kontext der Digitalisierungsstrategie Initiativen und Projekte, einschließlich 14 Experimentierfelder, auf denen transdisziplinäre Teams – unterstützt durch Expert*innen des hierfür gegründeten Kompetenznetzwerks „Digitalisierung in der Landwirtschaft“ – der Frage nachgehen, „wie digitale Techniken optimal zum Schutz der Umwelt, zur Steigerung des Tierwohls und der Biodiversität sowie zur Arbeitserleichterung eingesetzt werden können“ (BMEL, 2021, S. 21). Hierfür werden bis 2023 Fördergelder in Höhe von ca. 50 Millionen Euro bereitgestellt. Weitere 45 Millionen Euro sind für die Förderung des Einsatzes künstlicher Intelligenz (KI) in der Landwirtschaft, den ländlichen Räumen, der gesundheitlichen Ernährung und der Lebensmittelkette eingeplant (ibid.). Darüber hinaus werden landwirtschaftliche Betriebe seit Januar 2021 im Rahmen des BMEL-Investitionspro-

gramms Landwirtschaft bis 2024 mit 816 Millionen Euro bei der Investition in moderne Technologien zur Emissionsminderung, gesteigerten Ressourceneffizienz und zum Erhalt der Artenvielfalt unterstützt (ibid.).

Die Digitalisierung der Landwirtschaft bietet einerseits Chancen für den Natur- und Umweltschutz, die im Rahmen dieses Papiers unter anderem im Kontext einer Steigerung der Ressourceneffizienz, dem intelligenteren Monitoring und Tracking landwirtschaftlicher und umweltbezogener Daten, Emissionsreduktionen, reduzierter Bodenverdichtung und der Bewirtschaftung komplexerer Anbausysteme diskutiert werden. Andererseits kann die Digitalisierung der Landwirtschaft auch unbeabsichtigte und teils schwer kalkulierbare negative Nebeneffekte mit sich bringen. Derartige Risiken für Natur- und Umweltschutz werden hier unter anderem im Kontext einer möglichen Intensivierung der Landwirtschaft, in erhöhtem Material- und Energieverbrauch, in einer Intensivierung der Tierhaltung sowie in negativen sozio-ökonomischen Folgen diskutiert.

Das vorliegende Diskussionspapier skizziert zunächst zentrale Konzepte für eine nachhaltige Transformation der Landwirtschaft (Kapitel 2). Anschließend werden die aktuellen Trends der Digitalisierung beleuchtet (Kapitel 3). Vor diesem Hintergrund bietet das Diskussionspapier einen Überblick über relevante Technologien im Kontext von Biodiversitätsschutz (Kapitel 4). Anschließend werden die Chancen (Kapitel 5) und Risiken (Kapitel 6) der Digitalisierungsprozesse aus Sicht des Umwelt- und Naturschutzes diskutiert. Schließlich werden zentrale Erkenntnisse rekapituliert (Kapitel 7).

2 Konzepte für eine nachhaltige Transformation der Landwirtschaft

In politischen, wissenschaftlichen und zivilgesellschaftlichen Diskursen finden sich eine Reihe von Transformationsansätzen und -konzepten für die Landwirtschaft, die sich in ihren Schwerpunkten unterscheiden. Ansätze wie die Agrarökologie (Altieri, 1995; Wezel et al., 2009) oder die Permakultur (Krebs & Bach, 2018) streben eine grundsätzliche Abkehr von industriellen Praktiken an. Das Hauptprinzip der Agrarökologie ist dabei die Einbettung der Lebensmittelerzeugung in natürliche Ökosysteme und Kreisläufe sowie die Anpassung der Produktionsintensität an natürliche Regenerationsfähigkeiten. Hinzu kommen sozio-ökonomische Zielsetzungen wie die Ausrichtung auf kleinbäuerliche Strukturen, die Forderung nach einem freien Zugang zu (genetischen) Informationen und die Nutzung traditioneller Wissensformen. Permakultur lässt sich als eine Variante der Agrarökologie verstehen, die das intelligente Design selbsterhaltender Polykulturen in den Vordergrund stellt (Krebs & Bach, 2018). Die Ansätze der regenerativen Landwirtschaft legen einen besonderen Fokus auf den Erhalt der Bodenqualität und der Förderung der Artenvielfalt im Boden (Palm et al., 2014).

Der ökologische Landbau nimmt in Deutschland als Transformationsansatz eine zentrale Rolle ein, die insbesondere in den letzten beiden Jahrzehnten an Bedeutung gewonnen. Die grundlegenden Prinzipien des ökologischen Anbaus sind der Verzicht auf chemische Pflanzenschutzmittel und mineralische Dünger sowie Mindeststandards für artgerechtere Tierhaltung (Balzer & Schulz, 2015; Haller et al., 2020; Hirschfeld et al., 2008). An diesen Prinzipien orientieren sich gerade in Deutschland oft auch die Zielkonzepte für Veränderungen in der konventionellen Landwirtschaft. Als integrierte Produktion werden eine Reihe von Ansätzen bezeichnet, die einzelne Maßnahmen aus der Agrarökologie und dem ökologischen Landbau in die konventionelle Landwirtschaft integrieren,

ohne konventionelle Anbaumethoden vollständig auszuschließen (Campbell et al., 2014; Haller et al., 2020; Lampkin et al., 2015).

Konzepte wie nachhaltige Intensivierung (NI), Präzisionslandwirtschaft (Precision Farming) oder klimasmarte Landwirtschaft (Climate Smart Agriculture, CSA) fokussieren hingegen die Integration spezifischer, vorrangig technischer Lösungen für einzelne Problemfelder in einer weiterhin industriell ausgerichteten Landwirtschaft. Das primäre Ziel dieser Ansätze ist es, die globale Ernährungssicherheit auch unter veränderten klimatischen und ökologischen Rahmenbedingungen sicherzustellen (Altieri et al., 2017). Konzepte der nachhaltigen Intensivierung streben dabei eine Steigerung der Erträge ohne zusätzliche ökologische Belastung an. Dazu werden Maßnahmen zur nachhaltigen Ertragssteigerung umgesetzt, die teils auch auf agrarökologischen Konzepten basieren (Godfray & Garnett, 2014; Pretty & Bharucha, 2014). Präzisionslandwirtschaft setzt vor allem auf digitale Technologien, die eine möglichst spezifische und effiziente Bewirtschaftung bei geringerem Betriebsmitteleinsatz ermöglichen sollen (siehe Kapitel 3.1). Im Vordergrund von Ansätzen der klimasmarten Landwirtschaft steht die Anpassung der Landwirtschaft an die Erderwärmung, um Erträge langfristig zu sichern. Dabei sollen gleichzeitig die Produktivität gesteigert, Ressourcen effizienter eingesetzt und Treibhausgasemissionen verringert werden (FAO, 2010; Lipper et al., 2014).

3 Trends der Digitalisierung in der Landwirtschaft

Wie eingangs dargelegt, gewinnen digitale Technologien in der Landwirtschaft an Relevanz in Praxis und Politik. Im Folgenden werden zunächst die größeren Trends der Digitalisierung der Landwirtschaft herausgearbeitet und auf zwei Ebenen beschrieben. Auf Ebene der Anwendungskontexte, werden die technologischen Entwicklungen von Präzisionslandwirtschaft über Smart Farming zu Landwirtschaft 4.0. skizziert (siehe Abbildung 3.1). Anschließend werden auf Ebene der technologischen Infrastruktur das Internet of Things (IoT), maschinelles Lernen und Plattformen dargestellt. Sie ermöglichen die Entwicklung von Technologien wie Drohnen, Robotik, Sensorik, digitalen Landmaschinen, digitalen Nachschlagewerken und Farm-Management-Informationssystemen, wie in Kapitel 4 beschrieben.

Da die Digitalisierung der Landwirtschaft in wissenschaftlichen, politischen und zivilgesellschaftlichen Diskursen von diversen Akteuren aus unterschiedlichen disziplinären Perspektiven beschrieben und konzeptualisiert wird, sind die verwendeten Begriffe und Konzepte nicht immer trennscharf. So werden beispielsweise die Konzepte Smart Farming und Landwirtschaft 4.0 von einigen Autor*innen gleichgesetzt (z. B. Villa-Henriksen et al., 2020), während andere gar von einer Landwirtschaft 5.0 sprechen (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020). Außerdem ist die Digitalisierung der Landwirtschaft vom Zusammenwirken einer Vielzahl unterschiedlicher Technologien mit ebenso diversen Anwendungsmöglichkeiten geprägt. Die hier herausgearbeiteten Trends müssen im Kontext dieser Diversität betrachtet und verstanden werden.

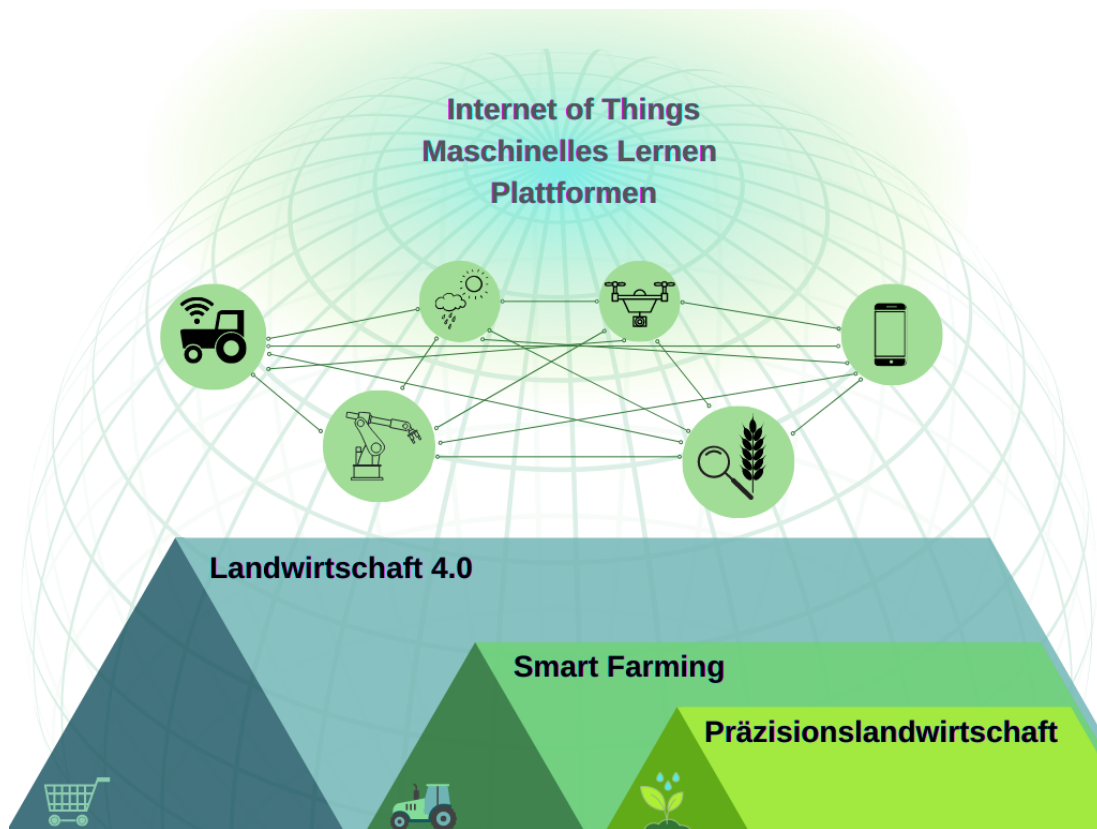


Abbildung 3.1: Trends der Digitalisierung in der Landwirtschaft
Eigene Darstellung

3.1 Präzisionslandwirtschaft

Präzisionslandwirtschaft gilt als Ursprung der Digitalisierung der Landwirtschaft. Sie beschreibt die ortsdifferenzierte, zielgerichtete und variable Ausbringung von landwirtschaftlichen Betriebsmitteln und Ressourcen wie zum Beispiel Samen, Pflanzen, Dünger, Pestizide oder Wasser auf einem Feld oder Feldabschnitt. Die auszubringende Menge der Betriebsmittel und Ressourcen ist dabei an den spezifischen Bedarf der Teilfeldzone angepasst. Die höchste Präzision wird beim sogenannten „Spot Farming“ erreicht, wo Maßnahmen in kleinsten Räumen bis hin auf die Ebene einzelner Pflanzen individuell angepasst werden können (Wegener et al., 2018). Diese Praxis zielt auf die Steigerung des Pflanzenertrags und der Pflanzenqualität bei gleichzeitiger Reduktion des Betriebsmittel- und Ressourcenverbrauchs ab. Neben Kostenreduktion, können durch den gezielten, bedarfsgerechten und damit reduzierten Einsatz von Dünger und Pestiziden Umweltbelastungen reduziert werden (Finger et al., 2019).

Die Ausbringungsmengen von Dünger, Pflanzenschutzmittel und anderen Ressourcen wie Wasser werden anhand von raumspezifischen Boden- und Pflanzendaten berechnet. Die für diese Berechnung nötigen Daten werden klassischerweise durch Technologien generiert, die auf globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS) wie dem globalen Positionsbestimmungssystem (GPS) basieren. Dafür zeichnen GNSS-Empfänger (z. B. integriert in den Bordcomputer einer Landmaschine) auf einem Feld georeferenzierte Daten auf. Mittels geografischer Informationssysteme (GIS) können diese Daten gespeichert, analysiert, manipuliert, und in Form von Karten – sogenannten

Ackerschlagskarteien – abgebildet werden (Keogh, M & Henry, 2016; Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020). Ackerschlagskarteien kommen bereits auf 59 Prozent der 500 von Rohleder et al. (2020) befragten landwirtschaftlichen Betriebe zum Einsatz. In weiteren 29 Prozent der befragten Betriebe wird ihre Einführung geplant oder zumindest in Erwägung gezogen. Die auf diesen Karten basierende Ausbringung der Betriebsmittel auf den entsprechenden Teilabschnitten der Felder erfolgt zunehmend automatisiert durch GPS-gestützte Lenksysteme für Landmaschinen. Eine spezielle Unterkategorie dieser automatisierten Lenksysteme ist das sogenannte Controlled Traffic Farming, das alle Maschinenlasten auf permanente Fahrspuren beschränkt, und damit die Bodenkompression durch schwere Landmaschinen auf eine möglichst kleine Fläche reduziert (El Bilali & Allahyari, 2018). Aktuell setzen 45 Prozent der befragten Betriebe GPS-gesteuerte Landmaschinen ein, wobei weitere 25 Prozent dies planen oder erwägen (Rohleder et al., 2020).

Moderne Präzisionslandwirtschaft kombiniert GPS-basierte Technologien mit sensorischen und bildverarbeitenden Technologien (sogenannte variable Ausbringungstechnologien) und vergrößert und diversifiziert dabei die Menge an zur Verfügung stehenden georeferenzierten Daten. Die Vernetzung zwischen Daten generierenden Geräten (z. B. Sensoren im Feld) und ausführenden Geräten (z. B. Bewässerungssystemen) durch das IoT (siehe Kapitel 3.4) ermöglicht zudem das Ausbringen von Betriebsmitteln und Ressourcen auf Basis von Echtzeitdaten, beispielsweise in Form einer kontinuierlichen Bodenfeuchteüberwachung durch Sensoren für effiziente und automatische Bewässerung. Sensortechnik wird in 28 Prozent der 500 von Rohleder et al. (2020) befragten Betriebe in der Tierhaltung oder dem Pflanzenbau eingesetzt, wobei weitere 38 Prozent einen Einsatz planen oder erwägen.

Zu den in der modernen Präzisionslandwirtschaft eingesetzten Technologien zählen darüber hinaus auch Drohnen (siehe Kapitel 4.3), die momentan von 11 Prozent der 500 befragten landwirtschaftlichen Betriebe angewandt und von weiteren 31 Prozent geplant oder diskutiert werden (Rohleder et al., 2020). Sie werden teils manuell gesteuert, teils agieren sie autonom. Neben der Ausbringung von Betriebsmitteln aus der Luft ermöglichen bildverarbeitende Drohnen in Kombination mit Objekterkennung durch maschinelles Lernen auch eine frühzeitige und präzise Erkennung von physiologischem Stress durch Trockenheit, Schädlingsbefall oder Krankheiten, wie etwa den Befall einzelner Rebstöcke mit Mehltau (Kerkech et al., 2020). Dadurch können Betriebsmittel und Wasser präzise und effizient ausgebracht werden (Librán-Embido et al., 2020). Eine besonders kleinräumige Datenquelle stellen Nanosensoren dar, die physiologische Daten in Echtzeit und punktgenau auf Ebene einzelner Pflanzen erfassen und so zur Anwendung von Spot Farming beitragen können (Moulick et al., 2020). Nanosensoren sind allerdings noch nicht weit verbreitet und eher als zukünftige Entwicklung zu verstehen. Eine ebenfalls bislang weniger prominente Rolle spielen Virtual Reality und Augmented Reality Technologien. Diese können über die Visualisierung von Daten die teilflächenspezifische Bewirtschaftung erleichtern, indem der FahrerIn eines Traktors mithilfe einer Augmented-Reality-Brille die verschiedenen Zonen des Ackers für die variable Ausbringung der Betriebsmittel angezeigt werden (de Oliveira & Corrêa, 2020; Santana-Fernández et al., 2010; Yu et al., 2010). Die Anwendungsbeispiele verdeutlichen den fließenden Übergang zwischen Präzisionslandwirtschaft und Smart Farming, wobei unter letzterem eine datengetriebene Bewirtschaftung komplexer Anbausysteme und ganzer landwirtschaftlicher Betriebe (siehe Kapitel 3.2) verstanden wird.

Der Ursprung der Präzisionslandwirtschaft liegt im Pflanzen- und Ackerbau, der Ansatz findet mittlerweile jedoch auch in der Tierhaltung Anwendung. Das Ziel einer tierspezifischen Bewirtschaftung – auch Precision Livestock Farming (PLF) genannt – ist die Berücksichtigung der tierindividuellen Leistungsfähigkeiten und Bedürfnisse. Auch hier kommen die oben genannten Technologiearten zum Einsatz, zum Beispiel beim Hüten von Schafherden durch Drohnen (Al-Thani et al.,

2020) oder beim Einsatz von Nanomaterialien und -sensoren in der Tierzucht und Veterinärmedizin, etwa zur Diagnostik und Therapie verschiedener Krankheiten von Puten (King et al., 2018; Meena et al., 2018). Auch wenn es an Daten zur Verbreitung von PLF in Deutschland bisher mangelt, lässt sich aus einer Schweizer Studie darauf schließen, dass der Verbreitungsgrad von PLF Technologien stark zwischen unterschiedlichen Technologien, Tierarten und Anwendungsbereichen variiert (Groher et al., 2020).

3.2 Smart Farming

Sofern Präzisionslandwirtschaft und Smart Farming nicht gleichgesetzt werden, umfasst Smart Farming die Präzisionslandwirtschaft und geht darüber hinaus, indem der Anwendungsfokus digitaler Lösungen von der flächen- und teilflächenspezifischen Bewirtschaftung auf die Optimierung komplexer Anbausysteme sowie das Management des landwirtschaftlichen Betriebs ausgeweitet wird (Baker et al., 2017; El Bilali & Allahyari, 2018; Villa-Henriksen et al., 2020; Wolfert et al., 2014). Dies wird ermöglicht, indem durch die Vernetzung einzelner datengenerierender Geräte untereinander, sowie deren Vernetzung mit ausführenden Geräten im Internet of Things (IoT; siehe Kapitel 3.4), neben raumbezogenen Daten auch eine große Menge Echtzeit- und kontextspezifische Daten generiert werden, auf deren Basis die Managementprozesse von Landwirt*innen unterstützt und zum Teil automatisiert werden können (Mekala & Viswanathan, 2017; Villa-Henriksen et al., 2020).

Eine wichtige Grundlage der Unterstützung von landwirtschaftlichen Managementprozessen sind Farm-Management-Informationssysteme (FMIS, siehe auch Kapitel 4.4). Diese bauen auf den GIS-basierten Ackerschlagskarteien der Präzisionslandwirtschaft auf und reichern die dort gespeicherten Informationen mit weiteren Schichten räumlich variabler Daten an, die durch vernetzte Geräte im IoT generiert werden (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020). Die Unterstützung für Landwirt*innen durch FMIS kann das gesamte Aufgabenspektrum der landwirtschaftlichen Betriebsführung umfassen und zielt auf die Reduzierung von Produktionskosten ab. Einsatzgebiete sind: (i) die Kartierung von Feldern; (ii) die Automatisierung der Datenerfassung und -verarbeitung; (iii) die betriebliche Planung, sowie die Dokumentation von Produktionsraten, Gewinnen und Verlusten; (iii) das Monitoring und die Bewertung der durchgeführten Feldarbeiten, der Ressourcennutzung, der Pflanzenentwicklung, sowie den Wetter- und Anbaubedingungen; (iv) die Automatisierung von Verwaltungsaufgaben wie die Buchhaltung, sowie die Personal- oder Bestandsverwaltung; und (v) die Einhaltung von Qualitätsstandards und regulatorischen Richtlinien (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020). Eine Weiterentwicklung von FMIS sind Decision Support Systems (DSS), die Simulationen und Algorithmen nutzen, zum Beispiel zur Modellierung von Wassernutzungseffizienz der Pflanzen oder der Nährstoffverfügbarkeit, um Landwirt*innen bei betrieblichen Entscheidungen hinsichtlich komplexer Anbausysteme zu unterstützen (Zhai et al., 2020).

Die überwiegend kommerziell bereitgestellten FMIS und DSS sind in unterschiedlichen Ausführungen erhältlich, meist als Desktop-Programm, Mobile App oder browserbasiert (Abbasi et al., 2019; Rose et al., 2016). Als Basis-Software kann zum Beispiel eine digitale Ackerschlagskartei mit verschiedenen Grundfunktionen dienen, die wiederum um zusätzliche Softwarebausteine wie Maschinenstörungsdienste oder Pestizidberatung ergänzt werden kann (siehe z. B. *365 FarmNet* in Drewel et al., 2017). Vereinzelt werden FMIS auch als Open-Source-Programme mit einem offenem Zugang zu Daten entwickelt (Rhee, 2015; Trotter et al., 2018). Konkrete Beispiele für Open-Source-FMIS sind *Famos*, *Litefarm* oder die *Tanibox*.

Laut einer Studie der Universität Göttingen aus dem Jahr 2019 gaben 55 Prozent der befragten Landwirt*innen an, FMIS bereits zu nutzen. Zudem planen 48 Prozent der Landwirt*innen, die FMIS aktuell noch nicht nutzen, dies zukünftig zu tun (Schwering & Lemken, 2020). Hingegen wird bezüglich der Verbreitung von DSS eine Diskrepanz zwischen der Anzahl verfügbarer DSS und deren eher niedrige Akzeptanz und Nutzung durch Landwirt*innen beobachtet. Begründet wird dies darin, dass derartige Anwendungen oft unzureichend an die praktischen Bedürfnisse der Landwirt*innen angepasst sind (Debeljak et al., 2019; Gutierrez et al., 2017; Rose et al., 2016).

3.3 Landwirtschaft 4.0

Landwirtschaft 4.0 bezeichnet die umfassende Digitalisierung der gesamten landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette. Der Begriff spielt auf drei vorhergehende historische Umbrüche in der Landwirtschaft an: Die neolithische Revolution, den Agrarkapitalismus, der im England des 18. Jahrhunderts seinen Ausgang nahm, und die Grüne Revolution des 20. Jahrhunderts (Knierim et al., 2019; Rose et al., 2021). Landwirtschaft 4.0 fungiert zudem als Spiegelbild des Konzeptes Industrie 4.0, also die Integration industrieller Produktionssysteme und Produkte in firmeninterne und -übergreifende IoT-Netzwerke (Araújo et al., 2021). Während die digital gestützte Integration des Managements landwirtschaftlicher Prozesse, Betriebe und Wertschöpfungsketten von einigen Autor*innen bereits unter dem Konzept Smart Farming gefasst wird (Sundmaecker et al., 2016; Wolfert et al., 2014), wird Smart Farming an anderer Stelle als Baustein von Landwirtschaft 4.0 verstanden, wobei erst die Landwirtschaft 4.0 den Bogen zu den Wertschöpfungsketten und der Nachfrage der Endnutzer schlägt (Innovationsinitiative Landwirtschaft 4.0, 2016).

Dafür sollen Informationen aus der gesamten Wertschöpfungskette vernetzt werden, etwa zur Quantität von Angebot und Nachfrage oder zu Qualität und Nährstoffgehalt von Produkten sowie ethischen Standards und ökologischen Auswirkungen der Produktion. Anhand dieser Informationen können Produktion, Logistik und Vertrieb optimiert werden. Ziel ist es, durch eine erhöhte Transparenz und Flexibilisierung des Wertschöpfungsprozesses sowohl individuelle Kund*innenwünsche und Angebotsmöglichkeiten von Produzent*innen als auch weitere gesellschaftlichen Zielsetzungen, die auch Nachhaltigkeitsaspekte beinhalten können, möglichst effizient ins Gleichgewicht zu bringen (Innovationsinitiative Landwirtschaft 4.0, 2016). Beispielsweise soll das Ernährungsverhalten unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen erfasst, prognostiziert und mit Daten aus Produktion und Vertrieb sowie Informationen zu den gesellschaftlich gesetzten Anforderungen an nachhaltige, gesunde Lebensmittel verbunden werden. So soll die kosteneffiziente Bereitstellung der gefragten Lebensmittel mit hoher Qualität und bei gleichzeitiger Internalisierung von ökologischen Externalitäten gewährleistet werden. Allerdings reicht die Erhebung und Vernetzung der notwendigen Informationen dafür bislang noch nicht aus (Innovationsinitiative Landwirtschaft 4.0, 2016).

Dies soll sich durch den Einsatz neuer Technologien ändern, die Lösungen auf allen Ebenen der landwirtschaftlichen Produktion bereitstellen (Arvantis & Symeonaki, 2020). Im ersten Schritt erheben landwirtschaftliche Produktionsgeräte im IoT (siehe Kapitel 3.4) automatisiert große Mengen an Daten und kommunizieren diese an eine meist plattformartige Infrastruktur (siehe Kapitel 3.6), wo sie im nächsten Schritt ausgewertet werden, oft unter Einsatz von maschinellem Lernen (siehe Kapitel 3.5). Dieser grundsätzliche Trend zu einer multidimensionalen algorithmischen Optimierung immer komplexerer Systeme stellt den Kern des Konzepts Landwirtschaft 4.0 dar.

Neben dem IoT als Datenquelle, Plattformen als Infrastruktur und dem maschinellen Lernen als entscheidende Instanz können auch Blockchain-Technologien eine Rolle spielen, vor allem um

Transparenz entlang der Wertschöpfungskette zu gewährleisten. Der wesentliche Vorteil der Organisation von Daten in einer Blockchain, also einem distribuierten oder dezentralen System anstelle eines zentralen Servers, ist die Gewährleistung von maximaler Transparenz durch Verifizierbarkeit bei gleichzeitiger Wahrung von Anonymität (Linsner et al., 2019). Bisher werden Blockchains im Agrar- und Ernährungssektor vor allem im Handel und Transport eingesetzt, beispielsweise um Lieferketten bruchlos zu verfolgen (Kamilaris et al., 2019). Mit der Ausbreitung der Landwirtschaft 4.0 wird aber eine Diffusion der genannten Technologien auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette erwartet (Sharma et al., 2020).

3.4 Internet of Things

Das Internet of Things (IoT) ist ein Netzwerk von mit Sensoren und/oder Aktoren ausgestatteten und eindeutig adressierbaren Geräten. Es dient der Kommunikation bzw. der gegenseitigen Steuerung von Maschine zu Maschine (M2M) auf der Basis von drahtgebundenem und drahtlosem Internet oder anderen Kommunikationsprotokollen wie RFID (Radiowellen), Bluetooth oder SMS (Abbasi et al., 2019; Kim et al., 2020; Villa-Henriksen et al., 2020). Wie bereits erläutert, ermöglicht das IoT als Querschnittstechnologie die teilflächenspezifische Ausbringung von Betriebsmitteln und Ressourcen im Kontext der Präzisionslandwirtschaft und das datengestützte Management auf betrieblicher Ebene im Kontext von Smart Farming. Darüber hinaus birgt es durch die Integration firmeninterner und -übergreifender Netzwerke das Potenzial, eine große, multidimensionale und zum Teil in Echtzeit zur Verfügung stehende Menge an Daten zu generieren (Big Data). Auf deren Basis können mittels maschinellem Lernens Produktionsprozesse entlang der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette flexibilisiert und hinsichtlich ökonomischer und potenziell auch ökologischer Kriterien optimiert werden.

3.5 Maschinelles Lernen

Für die Auswertung großer Datenmengen wird zunehmend auf Verfahren des maschinellen Lernens zurückgegriffen, die oft als Künstliche Intelligenz (KI) bezeichnet werden. Im Kern bedeutet maschinelles Lernen, dass Algorithmen auf Basis großer, multidimensionaler und in Echtzeit verfügbarer Datenmengen Vorhersagen über die Wahrscheinlichkeit zukünftiger Ereignisse und die wahrscheinlichen Auswirkungen verschiedener Entscheidungen berechnen und eine nach zuvor definierten Kriterien optimale Entscheidung identifizieren. Maschinelles Lernen wird bereits in allen Teilen der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette eingesetzt (Sharma et al., 2020). Beispielsweise können im Kontext der flächenspezifischen Bewirtschaftung Erträge oder Veränderungen im Nährstoff- oder Wassergehalt des Bodens oder im Schädlingsbefall antizipiert und adäquate Maßnahmen vorgeschlagen bzw. im Fall von M2M-Interaktionen auch direkt umgesetzt werden (Pathan et al., 2020). Eine wichtige Anwendung des maschinellen Lernens ist die automatisierte Bilderkennung durch neuronale Netze, die beispielsweise zur Diagnose von Pflanzenkrankheiten eingesetzt wird. Auch das logistische Management auf Betriebsebene ist ein wichtiges Einsatzgebiet von Algorithmen, etwa um Erntezeitpunkte, Transport oder Lagerung zu optimieren. Dabei könnten neben ökonomischen auch ökologische Zielsetzungen eine Rolle spielen, etwa zur Reduktion von Emissionen bei der Verarbeitung von Getreide oder von Abfällen (Sharma et al., 2020).

3.6 Plattformen

Plattformen sind das dominierende sozio-technische und ökonomische Organisationsmodell der Digitalisierung in allen Sektoren, so auch in der Landwirtschaft. Im Kontext der Digitalisierung können Plattformen grundsätzlich aus einer technischen und einer ökonomischen Perspektive betrachtet werden. Aus technischer Sicht bieten Plattformen die Möglichkeit eine Vielzahl unterschiedlicher Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln, die auf einem festen, wiederverwendbaren Kern oder Grundstein basieren, der durch variable Elemente ergänzt wird (Baldwin & Woodard, 2009). Übertragen auf den digitalen Kontext, basieren Plattformen auf einer einheitlichen Grundlage, auf der Anwendungsprogramme ausgeführt und entwickelt werden können. In der Landwirtschaft werden beispielsweise einzelne Dienstleistungspakete für Landwirt*innen in FMIS – die als Plattformen zu verstehen sind – integriert. Als Basis-Software kann zum Beispiel eine digitale Acker-schlagskartei mit verschiedenen Grundfunktionen dienen, die wiederum um zusätzliche Softwarebausteine ergänzt werden kann (siehe Drewel et al., 2017).

Aus ökonomischer Sicht treten Plattformen als Intermediäre auf, die Wert schaffen, indem sie Transaktionen zwischen zwei oder mehreren Akteursgruppen vermitteln. Sie bilden also zwei- oder mehrseitige Märkte (Rochet & Tirole, 2003). Dabei können die über eine Plattform koordinierten Akteure sowohl miteinander in Wettbewerb als auch in einem Anbieter-Nachfrage-Verhältnis stehen. Im Kontext von FMIS finden beispielsweise Transaktionen zwischen Plattformbetreiber*innen, Hard- und Softwareanbieter*innen sowie Landwirt*innen statt. Darüber hinaus können auch weitere Akteure der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette involviert sein, etwa Lieferant*innen, Verarbeitungsbetriebe, Großhändler*innen sowie Beratungs-, Versicherungs- oder Finanzdienstleister*innen (Drewel et al., 2017; Prause et al., 2020). Beispielsweise bietet die Plattform *365FarmNet* Beratungsleistungen durch externe Expert*innen und von Dritten entwickelte Apps an. Spezifisch an Transaktionen über Plattformen ist, dass positive Netzwerkeffekte generiert werden. Das heißt, je mehr Akteure eine Plattform nutzen, desto größer ist der Nutzen für jede einzelne Nutzerin. Als Intermediäre nehmen Plattformen eine zentrale Rolle in Wertschöpfungsketten ein. Gleichzeitig bilden sie einen Knotenpunkt, an dem Daten, die aus der Anwendung der über die Plattform angebotenen digitalen Dienstleistungen generiert werden, zusammenlaufen. Diese Daten können von den Plattformunternehmen in Wert gesetzt werden, indem sie als Ware verkauft und/oder analysiert und dafür genutzt werden, Produkte zielgruppenspezifisch zu verbessern. Dabei machen sich Plattformen positive Skaleneffekte zu Nutze, denn je größer ihre Reichweite in Form von Nutzer*innenzahlen ist, desto mehr Daten werden generiert. Zusätzlich können Verbundvorteile im Angebot und/oder in der Nachfrage dafür genutzt werden, Daten auch markt- und sektorübergreifend gewinnbringend einzusetzen (Gawer, 2014; Konzernmacht beschränken, 2018; Olk, 2020). Im Landwirtschaftskontext machen Agrarunternehmen von Verbund- und positiven Skaleneffekten Gebrauch, indem sie beispielsweise die Nutzung ihrer Produkte wie Pestizide, Saatgut oder Düngemittel an die Nutzung digitaler Farmmanagementplattformen koppeln und die dabei generierten Daten nutzen, um ihre Produkte besser an die jeweiligen Anbaubedingungen anzupassen. Somit können sie einen Wettbewerbsvorteil gegenüber Anbieter*innen erzielen, deren Produktentwicklung nicht datengetrieben ist. Dabei können jedoch auch Lock-in-Effekte für Kund*innen entstehen, zum Beispiel wenn die Nutzung von Produkten nicht ohne die Nutzung der zugehöriger Plattform möglich ist oder wenn Farmmanagementplattformen nur auf bestimmte Anbausysteme oder Sorten zugeschnitten sind und damit starke Anreize für die Nutzung der Produkte des jeweiligen Agrarunternehmens setzen (Prause et al., 2020).

Neben den FMIS-Plattformen können im Landwirtschaftskontext noch weitere Typen von Plattformen unterschieden werden. Cloud-Plattformen ermöglichen die Kommunikation zwischen Maschinen und stellen gleichzeitig eine Infrastruktur für die weitere Datenverarbeitung und -verwertung dar. Im Landwirtschaftskontext geht es dabei etwa um die webbasierte Analyse von georeferenzierten Daten aus unterschiedlichen Datenquellen. Der Markt der Cloud-Plattformen wird branchenübergreifend von Amazon, Google und Microsoft dominiert (Prause et al., 2020). Eine Unterkategorie sind Plattformen, die primär den Zugang zu Daten verwalten. Für diesen Typ von Plattformen wurden und werden eine Reihe von Alternativen in öffentlicher Hand entwickelt, darunter die rheinland-pfälzische *GeoBox*, die Betrieben eine dezentrale Speicherung von Daten und dabei auch einen Austausch von Daten zwischen Betrieben ermöglichen soll (GeoBox, 2020). Auf nationaler Ebene wird vom BMEL die Einrichtung einer Agrar-Masterplattform vorbereitet (Bartels et al., 2020). Parallel baut das Bundeswirtschaftsministerium auf Basis der primär für den Industriesektor entwickelten Cloud *Gaia-X* die öffentliche Dateninfrastruktur *Agri-Gaia* speziell für den landwirtschaftlichen Sektor auf. Datenplattformen spielen auch in der Datenstrategie der EU, die wiederum Teil der europäischen Digitalstrategie ist, eine wichtige Rolle (Europäische Kommission, 2020a). So soll ein gemeinsamer europäischer Datenraum (Common European Agriculture Data Space) für landwirtschaftliche Daten aufgebaut werden. Zwei Beispiele für bereits von der EU bereitgestellte Datenplattformen sind *FaST*, ein Datenpool für Raumdaten, sowie die *Data and Information Access Services (DIAS)*, wobei das EU-Erdbeobachtungsprogramm *Copernicus* in beiden Fällen zentraler Lieferant raumbezogener Daten ist. DIAS ermöglichen europäischen Unternehmen und den Verwaltungen der EU-Mitgliedstaaten Zugang zu Satellitendaten, mit denen diese neue Analysemethoden und datenbasierte Geschäftsmodelle entwickeln bzw. die Einhaltung der Förderbedingungen im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union (GAP) kontrollieren können. Besonders an diesem Data-Governance-Modell ist, dass das „Data Clearinghouse“ (Wernick et al., 2020) nur temporär Zugang zu einem zentralen Datenpool gewährt, um die Datenanalyse durchzuführen. Dadurch sollen eine höhere Datensicherheit gewährleistet, die Informationsasymmetrien zwischen Daten-„Eigentümer*innen“ und Daten-Nutzer*innen reduziert und insgesamt größere Anreize zum Teilen von Daten geschaffen werden.

Eine weitere Art von Plattformen sind digitale Marktplätze und E-Commerce-Plattformen. Im Landwirtschaftskontext koordinieren solche Plattformen Transaktionen über landwirtschaftliche Primärerzeugnisse und Betriebsmittel zwischen Erzeugungs- und Weiterverarbeitungsbetrieben sowie Händler*innen. Die Plattformen werden überwiegend von Start-ups, multinationalen Tech-Unternehmen (z. B. *Alibaba*) und multinationalen Lebensmittelkonzernen (z. B. *Cargill*) bereitgestellt (Prause et al., 2020). In Deutschland sind sowohl Start-ups als auch etablierte Landhandels- und Agrarkonzerne zentrale Akteure (Huchtemann et al., 2020; Schwering & Kunz, 2020). Im Produktionsbereich etablieren sich vermehrt Sharing- und Mietplattformen für Maschinen. Diese könnten eine Art digitales Update für die in Deutschland bereits seit den 1960ern etablierten genossenschaftlichen Maschinenringe darstellen (Horstmann, 2020).

Im Endkonsument*innenbereich spielen digitale Marktplätze und E-Commerce-Plattformen beim Vertrieb von landwirtschaftlichen Produkten bisher eine eher untergeordnete Rolle. Der Anteil von online vertriebenen Lebensmitteln lag 2019 bei 1,4 Prozent (Handelsverband Deutschland, 2020), was auf die anspruchsvolle Logistik von Frische- und Tiefkühlwaren sowie Gewohnheiten der Konsument*innen zurückgeführt wird (Rumscheidt, 2020). Aufgrund der Corona-Pandemie verzeichnete der Online-Vertrieb von Lebensmitteln im ersten Halbjahr des Jahres 2020 jedoch ein Umsatzwachstum von 89,4 Prozent (G. Busch et al., 2021). Als Betreiber von Online-Plattformen im Endkonsument*innenbereich traten bis vor kurzem nur das multinationale Tech-Unternehmen *Amazon* und der Lebensmittelkonzern *Rewe* auf (Scherf & Kampfmeyer, 2020). Seit Ende 2020 sind jedoch eine Reihe von neuen Lieferdiensten (*Gorillas*, *Flink*, *GoPuff*, *Weezy*, *bring.de*)

mit dem Versprechen in den Markt getreten, Online-Bestellungen von Lebensmitteln in unter 15 Minuten per E-Bike zu liefern. Zudem existieren einige Plattformen mit explizitem Nachhaltigkeitsanspruch, etwa *Too Good To Go* und *SIRPLUS*, deren Geschäftsmodell auf der Vermarktung von andernfalls unverkäuflichen Speisen bzw. Lebensmitteln basiert, oder auch *mundraub.org*, eine Website, die auf frei pflückbare Obstbäume in Städten hinweist.

4 Digitale Technologien für den Biodiversitätsschutz

Aufbauend auf der im vorherigen Kapitel skizzierten Ebene der technologischen Infrastruktur werden im Folgenden digitale Technologien und Anwendungen mit Relevanz für den Biodiversitätsschutz vorgestellt. Konkret werden die aktuell verfügbaren Technologien dargestellt und deren Anwendung in der Landwirtschaft skizziert.

Biodiversität bezeichnet die gesamte biologische und genetische Vielfalt einschließlich aller Hierarchien und Komplexitätsebenen des Lebens (Beierkuhnlein, 2003; Drenckhahn et al., 2020; Spreen, 2020; Wiegand, 2009). Sie umfasst demnach nicht nur die Artenvielfalt, sondern auch die Strukturen und Funktionen von Ökosystemen und Landschaften (Achtziger et al., 2021). Die Diversität von Tier- und Pflanzenarten in Agrarlandschaften in Deutschland geht kontinuierlich zurück (Haefeker, 2019). Hauptverantwortlich hierfür ist die zunehmende Intensivierung der Landwirtschaft sowie Landnutzungsänderungen. Der Schutz von Biodiversität ist jedoch sowohl eine Schlüsselkomponente im Bereich Naturschutz als auch eine wichtige Grundlage für den Fortbestand unserer Nahrungsmittelproduktion (Drenckhahn et al., 2020). Sie ist zudem von zentraler Bedeutung für die Bereitstellung von weiteren Ökosystemleistungen, zu denen jene Leistungen zählen, die der Mensch durch Ökosysteme bezieht (Finlayson et al., 2005).

Zum Erhalt der biologischen Vielfalt in Agrarlandschaften können Veränderungen in der Flächennutzung, im Pflanzenschutz und in der Fruchtfolge beitragen. Die Reduktion von synthetischen Pflanzenschutzmitteln, insbesondere von schwermetallhaltigen und besonders toxischen Mitteln wie Glyphosat, kann einen entscheidenden Beitrag zum Schutz der Artenvielfalt auf Äckern und Nutzflächen leisten (Balzer & Schulz, 2015; Niggli et al., 2020). Auch die Diversifizierung der Kultursorten und Arten sowie der Anbau von Mischkulturen tragen zum Agrobiodiversitätsschutz bei. Vielversprechende Mischkulturen sind beispielsweise Gemenge von Getreide und Leguminosen, etwa Mais mit Stangenbohnen, Getreide mit Leinsaat oder das traditionelle südamerikanische Milpa-System (Altieri et al., 2017; F.R.A.N.Z. Projekt, 2020).

Zudem wird die zunehmende Ausweisung von Flächen für den Schutz von Ökosystemen in Agrarlandschaften gefordert. Blühstreifen und Feldvogelinseln dienen diesem Zweck und können Nützlingen, wie zum Beispiel Bestäuberinsekten oder Lerchen, einen geschützten Lebensraum und Brutplätze bieten (Dietzel et al., 2019; F.R.A.N.Z. Projekt, 2020; Wix et al., 2018). In Agroforstsystemen bieten Baum- oder Heckenstreifen Lebensräume und schützen Äcker vor Wind und Erosion (Baudry et al., 2000; McCarthy et al., 2011; Nerlich et al., 2013). Auch hohe und späte Schnitte im Klee gras, Nutzungspausen im Grünland oder ein Verzicht auf das Pflügen und Striegeln von Ackerflächen können die Verfügbarkeit von Lebensräumen erhöhen oder verlängern (Gottwald & Stein-Bachinger, 2015).

Der Biodiversitätsschutz ist aktuell kein primäres Ziel der Digitalisierung in der Landwirtschaft, die bisher hauptsächlich als ertragssteigerndes und aufwandreduzierendes Instrument genutzt wird (Techen & Helming, 2017). Der Forschungsbedarf über die praktische Umsetzung von digitalen Technologien für den Biodiversitätsschutz ist daher groß. Digitale Technologien, die ein Potenzial zur Biodiversitätserhaltung aufweisen, können in fünf Kategorien eingeteilt werden: 1) Digitale Landmaschinensysteme, 2) Sensoren und Robotik, 3) Drohnen, 4) Farm-Management-Informationssysteme und 5) Digitale Nachschlagewerke und Citizen Science. Auf Basis von Webrecherchen wurden die momentan zur Verfügung stehenden Technologien identifiziert und gemäß ihrer Wirkung auf Biodiversität klassifiziert (siehe Tabelle 4.1 bis Tabelle 4.7). Dabei ist zwischen direkten und indirekten Wirkungsweisen der Technologien zu unterscheiden. Eine direkte Wirkungsweise weisen jene Technologien auf, die durch ihre Nutzung ohne weitere Zwischenschritte einen Beitrag zur Biodiversitätserhaltung leisten, beispielsweise durch eine Düngemittel- oder Pflanzenschutzmittelreduktion im Feld. Unter indirekter Wirkungsweise wird auf Technologien Bezug genommen, bei denen weitere Zwischenschritte notwendig sind, beispielsweise eine Datenauswertung, um einen Beitrag zum Biodiversitätsschutz zu leisten.

4.1 Digitale Landmaschinensysteme

Digitale Landmaschinensysteme sind die Pioniere der Präzisionslandwirtschaft. Ihre Funktionen basieren auf räumlichen Daten aus GIS und/oder GPS, die von Landwirt*innen zur Optimierung von Feldvorgängen eingesetzt werden (siehe Kapitel 3.1). Die Nutzung digitaler Landmaschinensysteme ermöglicht landwirtschaftlichen Betrieben eine teilautomatische Maschinenführung, die hauptsächlich zur Entlastung der Fahrer*innen und zur präziseren Arbeit eingesetzt werden. Durch den Einsatz und die Interpretation flächenspezifischer Satellitenbilder zur gesamten Vegetationsperiode, können jedoch auch Dünge- und Pflanzenmittelgabe optimiert werden (Fiorese & Guariso, 2010). Das skandinavische Projekt *CropSAT* stellt dafür beispielsweise fortlaufend Satellitenbilder von landwirtschaftlichen Flächen kostenfrei zur Verfügung (Alshihabi et al., 2020). Satellitenbilder liefern zudem Daten zur Erfassung von essentiellen Biodiversitätsvariablen wie beispielsweise zur Zusammensetzung von Biozönosen (Proença et al., 2017). Die Anschaffungskosten der Software für digitale Landmaschinensysteme sind im Vergleich zu anderen digitalen Technologien günstig, einige Dienste werden auch kostenfrei zur Verfügung gestellt (Söderström et al., 2016). Tabelle 4.1 bietet eine Übersicht über die relevanten Technologien.

Tabelle 4.1: Übersicht digitaler Landmaschinensysteme

Relevanz für den Biodiversitätsschutz	Wirkungsweise	Funktion	Name	Hersteller
Reduktion von Pflanzenschutz und Düngung Optimierung der Flächenbewirtschaftung	direkt	Gezielte Düngung und Pflanzenschutzmaßnahmen durch Visualisierung der Biomasse	CropSAT	Vantage Agrometius/DataVäxt AB
		Hilfe bei der Einstellung/Auswahl von Sprayerdistanzen	Sprayer calibrator	Farmis
Optimierung der Flächenbewirtschaftung		Reduzierung des Arbeitspensums durch präzises Fahren	FieldNavigator	
		Reduzierung des Arbeitspensums durch präzises Fahren	FieldBee	eFarmer B.V.
		Präzise Steuerung durch Einbindung von Echtzeit-Daten	JD Command Cab	John Deere Walldorf GmbH & Co. KG
		Höhere Präzision bei der Ausbringung	TrueGuide	Trimble®
		Korrekturdatendienst	CenterPoint® RTX	
		Optimierung der Flächenbewirtschaftung/ Reduktion von Düngemitteln	Ermittlung von Düngemengen basierend auf TalkingFields (Etragspotenzialkarten)	NEXT N-Manager
Erfassung von Ernterückständen/Brachland			FieldTRAKS App	FieldTRAK Solutions

4.2 Sensoren und Robotik

Sensoren sind Geräte, die Informationen durch Beobachtung sammeln (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020). Es wird grundsätzlich zwischen aktiven und passiven Sensoren unterschieden (Solari et al., 2008). Passive Sensoren reflektieren das Sonnenlicht und können keine eigene Strahlung abgeben. Ihre Messungen erfolgen im sichtbaren und im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums (Erdle et al., 2011). Aktive Sensoren können Strahlung emittieren und gleichzeitig auch empfangen. Sie senden Strahlung im Mikrowellenbereich (ibid.). Passive Sensoren helfen stationär bei der Kartierung und Bewertung von großen Landwirtschaftsflächen (Adão et al., 2017; BaoJie et al., 2017). In mobilen Tools finden passive Sensoren Anwendung bei der Reduzierung von Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln sowie bei der Bestimmung von Futterwertqualitätsmerkmalen (Noack 2018). Der Einsatz von aktiven Sensoren ist ebenfalls auf die Reduzierung von Düngemengen gerichtet. Die wahrgenommene Lichtreflektion der Pflanzenbestände gibt einen Aufschluss über die aktuelle Chlorophyllversorgung, wodurch eine bedarfsgerechte Stickstoffversorgung ermöglicht wird (Bogue, 2017; Reckleben, 2014; Tremblay et al., 2009). Ertragspotenzialkarten mit mehrjährigen Aufnahmen von Flächen während der Vegetationsperiode sind dabei als Hintergrundinformation für die richtige Kalibrierung der Sensoren notwendig (Drücker, 2018). Multispektrale Bilder aus passiven Sensoren können zudem beim Monitoring und der Bewertung von Agrarökosystemen behilflich sein (Dorigo et al., 2007; Redhead et al., 2020; Vadrevu et al., 2008).

Der Einsatz von Sensoren erfolgt oft in Kombination mit Robotik (Bellon Maurel & Huyghe, 2017; Tansey et al., 2009). Als Roboter werden autonome Maschinen bezeichnet, die im Stande sind, ihre Umwelt abzutasten, auszuwerten und daraufhin Entscheidungen zu treffen (Best 2020; Steward et al. 2019). Die Entwicklung von Robotern für die Landwirtschaft verfolgt primär das Ziel, den Arbeitsaufwand für landwirtschaftliche Betriebe zu reduzieren (Große Wortmann, 2019). Hierbei liegt ein besonderer Fokus auf der Unkrautregulierung. Unkrautregulierende Robotertechnologien unterscheiden sich in ihren Anwendungsbereichen. Computerbasierte Roboter können anhand von Kameras und Pflanzenbildern gezielte mechanische oder chemische Unkrautregulierung im Reihenbereich in Echtzeit durchführen (Arakeri et al., 2017; Lameski et al., 2018). Sensorbasierte Roboter eignen sich für die Erkennung und Bekämpfung von Unkrautarten zwischen den Reihen (Bawden et al., 2017). Erste Roboter können auch zwischen verschiedenen Pflanzenarten unterscheiden (Buddha et al., 2019). Dies ist für die Diversifizierung von Pflanzenarten auf landwirtschaftlichen Flächen relevant. Zur Biodiversitätserhaltung und -erfassung werden neben Monitoringdaten aus Großflächenaufnahmen auch andere umfassende Pflanzenmerkmale benötigt. Der mittels einer App gesteuerte Roboter *Bonirob* kann beispielsweise wichtige Merkmale wie Pflanzenlänge, Bestandsdichte, Sprossdicke und Biomasse erfassen. Solche Boniturarbeiten erfolgen zurzeit zumeist manuell und sind mit großem Aufwand verbunden (Biber et al., 2012). Der Einsatz von Robotik ist jedoch größtenteils noch in der Entwicklungsphase (ibid.). Tabelle 4.2 bis Tabelle 4.4 bieten eine Übersicht über relevante Sensorik- und Robotik-Technologien.

Tabelle 4.2: Übersicht Sensoren

Relevanz für den Biodiversitätsschutz	Wirkungsweise	Funktion	Name	Hersteller
Reduktion von Düngemitteln	direkt	Berechnung der Düngermenge anhand spektraler Messungen in den Pflanzenbeständen	Yara N-Sensor/Yara N ALS	YARA GmbH & Co. KG
		Berechnung der Düngermenge anhand spektraler Messungen in den Pflanzenbeständen	GreenSeeker-System	Trimble®
		CANopen-BUS ¹ -Sensor	OptRX Pflanzen-sensor	PH. RODEN NACHF. KG
Reduktion von Pflanzenschutzmitteln		Punktgenaue Spritzung von Unkraut	WeedSeeker 2	Trimble®
		Induktives Sensorsystem	Winkelsensor QR20	Hans Turck GmbH & Co. KG
		Erfassung des Sprühbalkenabstandes zum Boden	Ultraschall-sensor RU100U	Hans Turck GmbH & Co. KG
Reduktion von Pflanzenschutz-/ Düngemitteln		Sensor mit großer Messfrequenz	CLAAS Crop Sensor Isaria	CLAAS Vertriebsgesellschaft mbH
		Berechnung der Gaben nach Biomassenunterschiede im Bestand	NEXT GreenSeeker	FarmFacts GmbH
		Sensorsystem zur präzisen Applikation	Isaria (versch. Sensoren)	Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG
Wildtierschutz	Entdecken von Kitzen vor dem Mähen	Wildretter	isa industrieelektronik GmbH	

¹ CAN – Controller Area Network, Netzwerk zur Vernetzung von Steuergeräten in der Automobilindustrie

Relevanz für den Bio-diversitätsschutz	Wirkungs-weise	Funktion	Name	Hersteller
Datenerfassung und -auswertung	indirekt	Kartierung/Monitoring von Flächen	eCognition software, ADS40 optical sensor	DEFINIENS, Leica
		Kartierung/Monitoring von Flächen	MODIS satellite imagery	NASA
		Monitoring von Flächen	ArcView GIS	ESRI
		Monitoring von Flächen	ArcGIS	
		Monitoring von Flächen	ArcMap/NextMAP, R	
		Monitoring von Tierhaltung	GRASS GIS package	GRASS
		Monitoring von Tierhaltung	Magellan GPS 315 Collar	Magellan
		Monitoring von Tierhaltung	QuickBird	European Space Imaging
Reduktion von Düngemitteln		Monitoring von Tierhaltung	IceTag pedometers	IceRobotics
		Monitoring von Tierhaltung	BTQ1000XT GPS logger	Qstarz
Wildtierschutz		Monitoring von Flächen	Model A1 GPS tag	e-obs GmbH
		Virtual Fencing	Nofence	Nofence AS

Tabelle 4.3: Übersicht Robotik

Relevanz für den Bio-diversitätsschutz	Wirkungs-weise	Funktion	Name	Hersteller
Unkrautregulierung	direkt	Gezielte Unkrautregulierung durch Einstampfen von Einzelpflanzen	Bonirob	Amazone
		Präzises Hacken durch Kamerasteuerung	K.U.L.T. iVision PV	K.U.L.T. GmbH
		Gezielte Unkrautregulierung	See&Spray/ Blue River Technology	John Deere Walldorf GmbH & Co. KG
		Solargetriebene autonome Mähroboter	Vitirover	Vitirover
		Selektive Unkrautregulierung	AgBot II	Queensland Department of Agriculture and Fisheries
		Präzise Unkrautregulierung	Small Robot „Dick“	Small Robot Company
		Mechanische Unkrautregulierung	Anatis	Carré
		Präzise Thermo-Unkrautregulierung	Terrier	Earth Rover
		Autonome Unkrautregulierung	Oz Weeding Robot	NAÏO TECHNOLOGIES
		Autonome Unkrautregulierung	Ladybird	Australian Centre for Field Robotics
		Präzise Unkrautregulierung	Small Robot „Dick“	Small Robot Company
		Mechanische Unkrautregulierung	Anatis	Carré
Präzise Thermo-Unkrautregulierung	Terrier	Earth Rover		

Relevanz für den Biodiversitätsschutz	Wirkungsweise	Funktion	Name	Hersteller
Unkrautregulierung	direkt	Autonome Unkrautregulierung	Oz Weeding Robot	NAÏO TECHNOLOGIES
		Autonome Unkrautregulierung	Ladybird	Australian Centre for Field Robotics
		Präzises Jäten	Autonomous Vegetable Weeder	FarmWise
		Monitoring/Unkrautregulierung	Swagbot	The University of Sydney
		Elektrische Unkrautregulierung	Electroherb (x-Power)	Zasso Group AG
		Mechanische Unkrautregulierung	Robocrop Inrow Weeder	Garford Farm Machinery Ltd.
Mechanische Unkrautregulierung		Flunick	Baumschule Reichenbauch	
Flächenbewirtschaftung/ Pflanzenproduktion		Verschiedene Feldarbeiten	VR Lettuce Thinner	Vision Robotics Corporation
		Streifenbepflanzung	Lidar Strip-cropping system	SureVeg
		Verschiedene Feldarbeiten	ATC's eDrive technology	Autonomous Tractor Corporation
		Autonome Roboter für versch. Feldarbeiten	SwarmBot	SwarmFarm Robotics
		Reduzierung der Bodenverdichtung durch weniger Gewicht	Autonome Feldspritze	John Deere Walldorf GmbH & Co. KG
Optimierung der Flächenbewirtschaftung		Optimierung der Aussaat	Small Robot Harry	Small Robot Company
	Präzise Kornablage	MARS Robotik-system	Fendt	
	Pflegearbeiten Baumschule/Obstbau	Highlander V70	Rath Maschinen	

Relevanz für den Biodiversitätsschutz	Wirkungsweise	Funktion	Name	Hersteller
Optimierung der Flächenbewirtschaftung	direkt	Pflegearbeiten Baumschule/Obstbau	Greenbot CR12/CR18	Precision Makers
		Pflegearbeiten/Ernte/Aussaat	DOT™	Raven
		Einfache Pflegearbeiten/Monitoring	Digital Farmhand	Australian Centre for Field Robotics
		Feld- und Pflegearbeiten	Robotti (verschiedene Ausführungen)	AgroIntelli
		Roboter für den Weinbau	Bakus (verschiedene Ausführungen)	ViTiBot
		Unterstützung bei Düngen, Aussaat, Zwischensaat/chemische und mechanische Unkrautregulierung	Rowbot	Rowbot Systems
		Bodenbearbeitung	Autonomous Concept Vehicle	digital trends
		Verschiedene Feldarbeiten	NHDrive-T8 Auto Command	Lüscher - Landmaschinen und Motorgeräte GmbH
Reduktion von Pflanzenschutzmitteln		Vorbehandlung mit elektrochemischer Lösung als Ersatz für Pflanzenschutzmitteln	Hybrid Herbicide™	crop.zone GmbH
		Selektives Applikationssystem	Milar Eco Sniper	Milar Soluciones Tecnológicas INTELIGENTES
		Mechanische/chemische Unkrautregulierung	Robovator	F. Poulsen Engineering

Relevanz für den Biodiversitätsschutz	Wirkungsweise	Funktion	Name	Hersteller
Reduktion von Pflanzenschutzmitteln	direkt	Mechanische/chemische Unkrautregulierung	Robocrop Guided Hoes	Garford Farm Machinery Ltd.
		Chemische Unkrautregulierung	Robocrop Spot Sprayer	Garford Farm Machinery Ltd.
Unkrautregulierung/Reduktion von Pflanzenschutzmitteln		Energieautonomer	Ecorobotix	ecoRobotix AG
Reduktion von Pflanzenschutz-/ Düngemitteln		Automatisiertes Applikationssystem	Field Analyzer	Augmenta
Optimierung der Erntevorgänge		Autonome Ernte anhand Qualitätsmerkmalen	Retriever	Earth Rover
		Apfel-Ernte-Roboter	-	Abundant Robotics Inc.
Optimierung der Flächenbewirtschaftung und Ernte	indirekt	Automatisierung von monotonen und körperliche anstrengenden Feldarbeiten	ETAROB	FH Aachen
		Tragehilfe bei Erntearbeiten	Burro	Augean Robotics, Inc.
Datenerfassung		Geländeroboter	Grizzly RUV/ Warthog	Clearpath™ Robotics
		Monitoring/Kartierung von Flächen	Small Robot Tom	Small Robot Company
		Monitoring/Kartierung von Einzelpflanzen	Pointer	Earth Rover
Unkrautmanagement		Unkrauterfassung	Small Robot Wilma	Small Robot Company

Tabelle 4.4: Übersicht Sensoren und Robotik

Relevanz für den Biodiversitätsschutz	Wirkungsweise	Funktion	Name	Hersteller
Optimierung der Flächenbewirtschaftung	direkt	Verschiedene Feldarbeiten	Agrointelli (Robotti)	Agrointelli
Unkrautregulierung		Mechanische Unkrautregulierung für Möhren	-	naiture GmbH
		Mechanische Unkrautregulierung	-	Zauberzeug GmbH
		Mechanische Unkrautregulierung	-	Dahlia Robotics
Unkrautregulierung/ Optimierung Aussaat		Hacktechnik für Zuckerrüben	FarmDroid	FarmDroid ApS
Optimierung der Flächenbewirtschaftung/ Unkrautregulierung		Verschiedene Feldarbeiten	-	Innok Robotics GmbH
		Verschiedene Feldarbeiten	-	Lemken GmbH & Co. KG

4.3 Drohnen

Die umgangssprachliche Bezeichnung ‚Drohne‘ bezieht sich auf ein unbemanntes Luftfahrzeug (UAV – unmanned aerial vehicle), das von Menschen ferngesteuert oder durch einen integrierten Computer teilautonom gesteuert wird (Bendel, 2019; siehe auch Kapitel). Drohnen werden immer handlicher und kommen oft kostengünstiger als andere Technologien zum Einsatz. Landwirtschaftliche Betriebe nutzen Drohnen aktuell primär zur Schädlingsbekämpfung, zum Beispiel von Maiszünslern (Lutz, 2017; Rohleder et al., 2020). Im großflächigen Einsatz von Drohnen liegt jedoch auch Potenzial für den Biodiversitätsschutz (Librán-Embid et al., 2020). Teilflächenspezifische Unkrautregulierung aus drohnengestützten Multispektraldaten lässt beispielsweise Ackerbegleitflora stehen, ohne das Wachstum von Mais zu beeinträchtigen (Wittstruck et al., 2021). Drohnen werden zudem zur Kartierung, Überwachung, 3D-Modellierung oder zur akustischen Aufnahme von Flächen eingesetzt. Besonders auf Flächen bis zu einer Größe von 50 Hektar ist die zeitliche und räumliche Auflösung der Bildaufnahmen von Drohnen der Qualität von Satellitenaufnahmen weit überlegen. Weitere Vorteile von Drohnen sind ihre hohe Flexibilität und ihre Fähigkeit, viele verschiedene Arten von Sensoren auch über die Feldränder hinaus zu transportieren. Entsprechend erlaubt der Einsatz von Drohnen die Gesamtheit der floristischen und faunistischen Vielfalt auf landwirtschaftlichen Flächen und angrenzenden Habitaten detailliert zu erfassen (Librán-Embid et al., 2020). Tabelle 4.5 bietet eine Übersicht über relevante drohnenbasierte Technologien.

Tabelle 4.5: Übersicht Drohnen (UAV)

Relevanz für den Biodiversitätsschutz	Wirkungsweise	Funktion	Name	Hersteller
Reduktion von Pflanzenschutzmitteln	direkt	Unkrautscanner und Feldspritze mit punktgenauer Ausbringung	Autonome Feldspritze-Drohne	John Deere Walldorf GmbH & Co. KG
		Präzise Spritzung von Unkraut	Vandi-A1, Vandi-B1	metaRobotics Inc.
		Automatische Spritzung von Unkraut	3WQF120-12 GPS Drone	Quanfeng
Wildtierschutz		Erkennung von Vogelnestern	Phantom 3 Advanced quadcopter	YOLOv3/DJI/ FLIR
Datenerfassung und -auswertung	indirekt	Monitoring/Kartierung von Flächen	AgEagle RX-60; AgEagle RX-47	Botlink
		Monitoring/Kartierung von Flächen	Scout	American Robotics
		Monitoring/Kartierung von Flächen	DJI Matrice 600 Pro	Precision Hawk
		Monitoring/Kartierung von Flächen	eBee SQ agricultural drone	Globe Flight
		Akustische Datenerfassung von Wildtieren	AudioMoth(v1.0)	Labmaker
		Monitoring von Fläche/ Akustische Datenerfassung	Matrice 300 RTK	DJI
		3D-Modellierung von Flächen	Phantom 4 drone V2.0	DJI

4.4 Farm-Management-Informationssysteme

FMIS sind IoT-basierte Technologien, die plausible Zusammenhänge zwischen Daten aus den hier vorgestellten Technologien nutzen, um landwirtschaftliche Prozesse zu optimieren (siehe Kapitel 3.4). Damit stellen sie eine Kategorie von Plattformen da, die zunehmend maschinelles Lernen verwenden. Aus der integrierten Analyse betriebsspezifischer Daten, wie beispielsweise den Ertragsmengen, den Austragungsmengen von Dünge- und Pflanzenschutzmittel, Maschinendaten und standortspezifischer Daten, wie Wetter- oder Bodendaten, ist es möglich, Prozesse vorausschauend und bedarfsgerecht zu verbessern und effizienter zu gestalten (Kuhwald et al., 2020). So können optimierende Datenmanagementsysteme beispielsweise bei der Planung von biodiversitätsfördernden Fruchtfolgen unterstützen (Kolbe et al., 2021; Männel et al., 2020). Die Anwendung solcher Systeme ist allerdings zum Teil kostenintensiv, oft komplex, und von Inkompatibilität zwischen Geräten und Softwaretypen gekennzeichnet (Kuhwald et al., 2020; Munz et al., 2020). Tabelle 4.6 bietet eine Übersicht über relevante Technologien.

Tabelle 4.6: Übersicht Farm-Management-Informationssysteme

Relevanz für den Biodiversitätsschutz	Wirkungsweise	Funktion	Name	Hersteller
Optimierung der Flächenbewirtschaftung	direkt	Zusammenhänge zwischen verschiedenen Daten erkennen	<i>akkerweb (versch. Apps)</i>	Akkerweb/NemaDecide/WUR/Agrifirm Plant/ Vincotte ISACert/ Eurofins/ Syngenta
		Protokollierung/Datenmanagement	<i>Agrinavia (versch. Apps)</i>	Datalogisk
		Dokumentierung der Pflanzenbautätigkeiten	<i>365FarmNet (versch. Apps)</i>	365FarmNet (Partnernetzwerk)
		GIS-Daten als Planungs- und Verwaltungsgrundlage	<i>NEXT Geodaten SERVICE</i>	FarmFacts GmbH
		Verschiedene Systeme zur Maschinensteuerung	<i>HxGN AgrOn Harvesting/ Cultivation/OEM</i>	Hexagon Agriculture
		Überwachung von Ausrüstung/ Aufzeigen von Anomalien der Anbaukulturen	<i>Smart Cab- Equipment Management Solution</i>	Farmers Edge™
		Ortsunabhängiges Farmmanagement	<i>FarmCommand In-Cab Experience</i>	Farmers Edge™
Optimierung von Datenmanagement	indirekt	Kosten-Nutzenanalyse	<i>AGRI EASE Tool</i>	European Global Navigation Satellite Systems Agency (GSA)
		Erfassung von Echtzeitinformationen/ Berichterstellung	<i>FARMFLO ENTERPRISE</i>	FARMFLO

Relevanz für den Biodiversitätsschutz	Wirkungsweise	Funktion	Name	Hersteller
Optimierung von Datenmanagement	indirekt	Unterstützung bei der Betriebsplanung/ Kulturführung	<i>Conservis (versch. Software)</i>	Conservis
		Zentralisierung landwirtschaftlicher Datensätze	<i>Pairtree</i>	Partnernetzwerk
		Kontrolltool im Rahmen der Common Agricultural Policy (CAP)	<i>EGNSS4CAP</i>	European Union Agency for the Space Programme
		Protokollierung/Datenmanagement	<i>farmpilot</i>	Arvato Systems GmbH
		Protokollierung/Datenmanagement	<i>Farmer Pro/Advisor Prime</i>	Trimble®
		Protokollierung/Datenmanagement	<i>NEXT Farming (versch. Apps)</i>	FarmFacts GmbH

4.5 Digitale Nachschlagewerke und Citizen Science

Nachschlagewerke und Datenbanken sind für den Biodiversitätsschutz relevant, da Biodiversitätsindizes und die Vielfalt der Flora und Fauna zunächst erfasst werden müssen, bevor sie geschützt werden können (Fischer et al., 2020; Jones, 2020). Die Erfassung von Biodiversität ist sehr datenintensiv, weshalb Citizen Science Apps und Plattformen zum Einsatz kommen (Bowker, 2000). Nach fachlicher Überprüfung können von Laien über Apps eingereichte Beiträge in entsprechende Datenbanken eingepflegt werden (Dransch et al., 2018). Die gesammelten Daten ergeben bei der Auswertung ein Gesamtbild von Artenvorkommen und -verteilung (Wittmann et al. 2019). In Form von Bild- und/oder Ton- und Kurzaufnahmen werden diese als Grundlage für weitere Analysen sowie zur Entwicklung und Erweiterung von anderen digitalen Technologien genutzt (Steward et al., 2019). Solche Datenbanken, die oft kostenfrei zugänglich sind (z. B. *DeutschlandfloraApp*, *BirdNET*, *Pl@ntNet Pflanzenbestimmung*, *Schmetterlinge Deutschlands*) können zum Biodiversitätsschutz beitragen, wenn Landwirt*innen online einsehen können, ob seltene oder geschützte Arten auf oder in der Nähe ihrer Felder beobachtet wurden. Die Apps könnten außerdem eine Rolle bei der Vermittlung und Verbreitung von Informationen über praktische Maßnahmen zur Biodiversitätserhaltung spielen (Finke, 2014; Hennig, 2020). Der Nachteil von Citizen Science ist, dass Daten nicht systematisch erhoben werden, und teils eine niedrige Qualität aufweisen (Crall et al., 2011; Dickinson et al., 2010; Eveleigh et al., 2014; Kosmala et al., 2016). Die Datenerhebung und -erfassung befindet sich trotz der schnellen Technologieentwicklung zudem noch in einer initialen Phase (Ball-Damerow et al., 2019). Tabelle 4.7 bietet eine Übersicht über relevante Nachschlagewerke und Citizen-Science-basierte Technologien.

Tabelle 4.7: Übersicht Digitale Nachschlagewerke – Citizen Science

Relevanz für den Biodiversitätsschutz	Wirkungsweise	Technologie		Auswertung/Bereitstellung
		Funktion	Name	
Erfassung der Flora	direkt	Artenbestimmung/ bürgerwissenschaftliche Artenerfassung	DeutschlandfloraApp	Bundesamt für Naturschutz
			Flora Incognita	Technische Universität Ilmenau
			PI@ntNet Pflanzenbestimmung	Tela Botanica und 22 weitere Partner (weltweit)
	indirekt	Artenbestimmung/ Vermittlung von Grundwissen	Flora Capture	Technische Universität Ilmenau
			Flora Key App	
			Weltnaturerbe Buchenwälder	UNESCO Welterbe
			Was ist das für eine Blume?	Adrian Benko
			iFlora	Dr. Oliver Tackenberg
			Bienenpflanzen für den Garten	Naturgucker
			Feldbotanik	
			Wildpflanzen zum Genießen	
			Baumführer 2	NATURE MOBILE GmbH
Früchte sammeln und bestimmen 2				

Relevanz für den Biodiversitätsschutz	Wirkungsweise	Technologie		Auswertung/Bereitstellung
		Funktion	Name	
Erfassung der Flora	indirekt	Artenbestimmung/ Vermittlung von Grundwissen	Wilde Beeren und Kräuter 2	
			3000 Pflanzen bestimmen	naturetouch.info
			Bäume und Sträucher bestimmen	
Erfassung der Fauna	direkt	Artenbestimmung/ bürgerwissenschaftliche Artenerfassung	BirdNET: Vogelstimmen einfach erkennen	keine Angabe
			NABU-Zeit der Schmetterlinge	verschiedene regionale Datenbanken (Deutschland)
			NaturaList	diverse webbasierte faunistische Datenbanken (ornitho)
			Naturgucker.de-meldeapp	NABU
			Schmetterlinge Deutschlands	Lepiforum e.V.
			Gartenvögel	NABU
			Vogelarten Melde-App	Naturgucker
Erfassung der Fauna	indirekt	Artenbestimmung/ Vermittlung von Grundlagenwissen	Bienen-App	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
			Die Vogel App	Dörte und Torsten Krüger
			Vögel am Futterhaus	NABU

Relevanz für den Biodiversitätsschutz	Wirkungsweise	Technologie		Auswertung/Bereitstellung
		Funktion	Name	
Erfassung der Fauna	indirekt	Artenbestimmung/ Vermittlung von Grundlagenwissen	NABU Insektenwelt - Insekten Entdecken und bestimmen	
			NABU Vogelwelt - Vögel Entdecken und bestimmen	
			Nützlinge im Garten	Bundesinformationszentrum Landwirtschaft
			Vögel Europas bestimmen	Kosmos Verlag
			Vögel bestimmen	Google Commerce Ltd
			Tagaktive Schmetterlinge	Naturgucker
			Fische 2	NATURE MOBILE GmbH
			Vogelführer 2/Wilde Tiere und Spuren 2	
			Frösche, Kröten, Unke bestimmen	naturetouch.info
			Heuschrecken bestimmen	
			Igel, Hase, Fuchs bestimmen	
			Libellen bestimmen/Spinnen bestimmen	
Reptilien bestimmen				

Relevanz für den Biodiversitätsschutz	Wirkungsweise	Technologie		Auswertung/Bereitstellung
		Funktion	Name	
Erfassung der Fauna	indirekt		Vögel bestimmen/Vogelstimmen live erkennen	
Erfassung Flora und Fauna	direkt	Artenbestimmung/ bürgerwissenschaftliche Artenerfassung	ArtenFinder	
			BeachExplorer	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
			iNaturalist	California Academy of Sciences/National Geographic Society
			Map of Life	
			Praxis-App Naturgucken	NABU
	indirekt	Artenbestimmung/ Vermittlung von Grundwissen	Projekt Finde Vielfalt	Pädagogische Hochschule Ludwigsburg/Uni Bamberg/ Deutsches Jugendherbergswerk
			Naturblick	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
			Waldfibel	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

5 Chancen der Digitalisierung der Landwirtschaft

Die Digitalisierung wird häufig mit Potenzialen für die ökologische Nachhaltigkeit in Verbindung gebracht. Diese Einschätzung dominiert die politischen und akademischen Diskurse (BMEL, 2018; El Bilali & Allahyari, 2018; Rohleder & Krüsken, 2016; Schmidt, 2018). Das folgende Kapitel stellt die verschiedenen Chancen dar, geordnet nach absteigender Prominenz der Argumente in der Literatur. Da die Biodiversität einen komplexen Bezug zu mehreren Umweltaspekten hat, wird sie in den verschiedenen Umweltaspekten aufgegriffen und nicht in einem eigenen Unterkapitel diskutiert. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass belastbare empirische Daten zu den möglichen Umwelt- und Naturschutzpotentialen von digitalen Technologien bisher kaum vorliegen und viele der hier angeführten Studien sich auf Ergebnisse aus Einzelversuchen oder Fallstudien beziehen.

5.1 Ressourceneffizienz

Die Steigerung der Ressourceneffizienz durch Präzisionslandwirtschaft ist mit Abstand die am häufigsten diskutierte ökologische Chance im Kontext der Digitalisierung. Die Präzisionslandwirtschaft zielt zwar primär auf eine Verringerung der Produktionskosten ab, birgt aber auch das Potenzial positiver ökologischer Wirkungen, da sich der Einsatz von Präzisions-, Smart-Farming- und IoT-Technologien in den meisten Fällen positiv auf die Ressourceneffizienz auswirkt (Nawar et al., 2017; Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020). Dies gilt für verschiedene Ressourcen. Eine Umfrage unter 54 großen landwirtschaftlichen Betrieben in Deutschland ermittelte die im Folgenden dargestellten Einsparungen (siehe Abbildung 5.2; Bovensiepen et al., 2016).

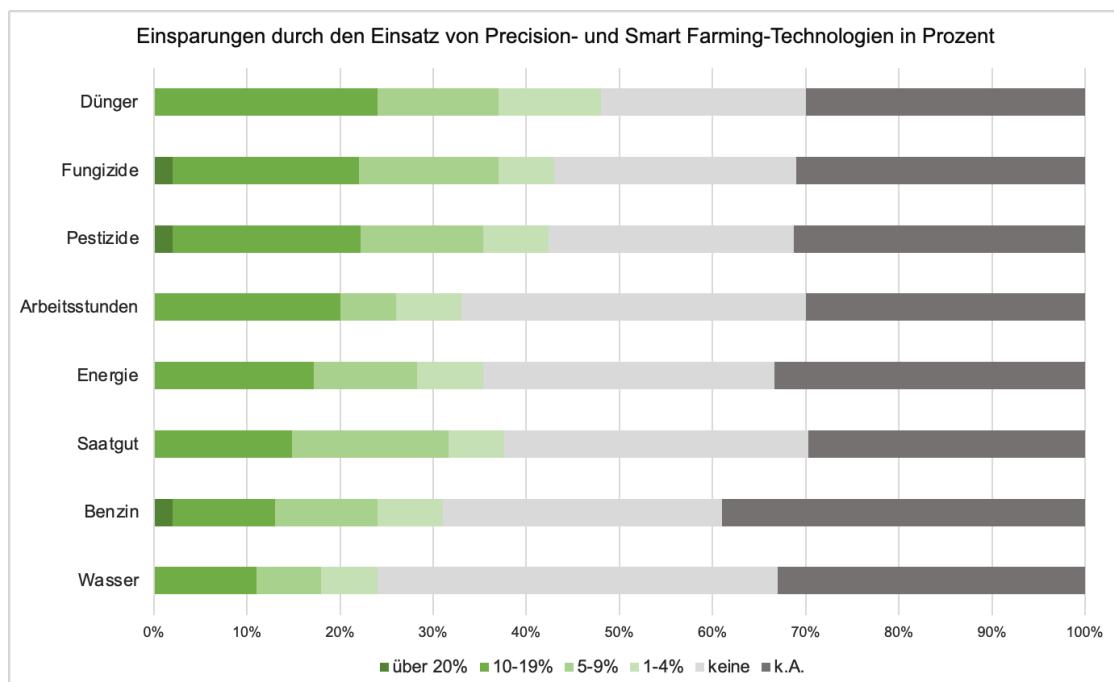


Abbildung 5.2: Ressourceneffizienz durch Digitalisierung

Eigene Darstellung nach Bovensiepen et al. 2016

Einsparpotenziale bei Düngemitteln

Am häufigsten konnten Einsparungen bei Düngemitteln beobachtet werden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen weiterer Studien (Abbasi et al., 2019; Mekala & Viswanathan, 2017; Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020; Villa-Henriksen et al., 2020). So kam eine Studie zu den Düngereinsparungen in der für Deutschland typischen Fruchtfolge Winterraps-Winterweizen-Wintergerste beispielsweise zu dem Ergebnis, dass durch automatische Lenksysteme und die Nutzung von Satelliten- und Sensordaten bei der Stickstoffdüngung signifikante Einsparungen erzielt werden können (Bieber, 2016 in: Fuchs et al., 2020).

Laut einer Meta-Studie können durch die teilflächenspezifische Ausbringung von Düngemitteln Stickstoffrückstände im Boden um 30-50 Prozent gesenkt werden (Schrijver & van Woensel, 2016). Auch die Visualisierung von Biomasse (z. B. *CropSat*, Lundström & Lindblom, 2018) oder die Nutzung von Ertragspotenzialkarten, die durch die Kombination von Pflanzenwachstumsmodellen und Satellitendaten Ertragspotenziale berechnen (z. B. *Next N-Manager*; Speckle et al., 2020), können zu einer Reduktion des Düngemittleinsatzes beitragen (Best, 2020; Haefeker, 2019). Diese ist für die Stabilisierung der natürlichen Stoffkreisläufe und für den Klimaschutz entscheidend, wirkt sich aber auch positiv auf das Bodenleben aus (Liu et al., 2017; Zeng et al., 2016). Eine präzise Phosphatdüngung könnte zudem dabei helfen, das Gleichgewicht aquatischer Ökosysteme wiederherzustellen (Drenckhahn et al., 2020; Riedel, 2020).

Das Potenzial zur Einsparung von Düngemitteln ist jedoch besonders in jenen Regionen eingeschränkt, in denen es aufgrund intensiver Tierhaltung zu einer Überproduktion von Gülle kommt. Eine Steigerung der Effizienz in der Düngung kann nicht erzielt werden, wenn die absolute Menge an Gülle und Gärresten, die lokal entsorgt werden muss, schlicht zu hoch ist (BUND, 2019). Organisiert über sogenannte „Güllebörsen“ kommt es vereinzelt bereits zum Transport von Gülle in tierärmere Regionen, der auf langen Strecken jedoch viel Energie verbraucht (Lukat & Naumann, 2016). Hier besteht das Problem also nicht in einer ineffizienten Düngung, sondern in einer zu flächenintensiven Tierhaltung.

Einsparpotenziale bei Pflanzenschutzmitteln

Das zweite große ökologische Potenzial von Präzisionslandwirtschaft und Smart Farming ist ein verringerter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (Abbasi et al., 2019; BMEL, 2018; Mekala & Viswanathan, 2017; Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020; Villa-Henriksen et al., 2020). Bei herkömmlichen Spritzmethoden treffen nur etwa zehn Prozent der ausgebrachten Pflanzenschutzmittel tatsächlich kranke Pflanzen. Pflanzenschutzmittel können zudem durch Winddrift auch umliegende Ökosysteme schädigen (FAO 2009, in: Schrijver und van Woensel, 2016). Durch größere Präzision bei der Ausbringung bis hin zu pflanzenindividuellem „Spot Farming“ können neben positiven Effekten auf Biodiversität große Einsparungen und verringerte Umweltschäden erzielt werden. Der wissenschaftliche Dienst des Europäischen Parlaments taxiert die Einsparpotenziale je nach Anwendungsfall auf bis zu 80 Prozent (Schrijver und van Woensel, 2016), wobei in Deutschland bislang nur 2 Prozent der von Bovensiepen et al. (2016) befragten Unternehmen Einsparungen von mehr als 20 Prozent erzielen.

Vereinzelt wird auch die Möglichkeit eines teilweisen oder vollständigen Ersatzes von Agrochemikalien durch digitalmechanische Technologien diskutiert, beispielsweise durch Feldroboter, die Unkraut autonom erkennen und beseitigen (BMEL, 2018; DAFA, 2019). Ein Beispiel dafür ist die robotergestützte Unkrautregulierung im Bio-Möhrenanbau (Hußmann, 2021). Damit Roboter zwischen Kultur- und ungewollten Pflanzen unterscheiden können, bedarf es jedoch eines gewissen Grades

an Maschinenintelligenz (Mathanker et al., 2010; Steward et al., 2019). Wenn eine ausreichende Datengrundlage zur Verfügung steht, könnten Roboter künftig gezielt endemische und geschützte Pflanzen sowie Unkrautpflanzen, die als Insektennahrung dienen, mithilfe maschinellen Lernens erkennen und bei der mechanischen Unkrautregulierung schonen (Shah et al., 2021).

Einsparpotenziale bei fossilen Treibstoffen und Energie

Digitale Technologien können den Verbrauch von fossilen Treibstoffen und den Primärenergieverbrauch reduzieren. Laut einer Studie von Saiz-Rubio & Rovira-Más (2020) kann der Primärenergieverbrauch im Pflanzenbau durch Präzisionslandwirtschaft und Smart Farming im Schnitt um 17 Prozent gesenkt werden. Das ist vor allem dadurch möglich, dass Spurführungstechnologien, Teilflächenbewirtschaftung und andere digital gestützte Methoden den Treibstoffverbrauch von Landmaschinen reduzieren. Darüber hinaus können elektrisch betriebene IoT-Geräte große Landmaschinen mit hohem Energieverbrauch ersetzen (Sharma et al., 2020; Villa-Henriksen et al., 2020). Manche Feldroboter werden gar durch eigene Solarzellen versorgt und verursachen in der Anwendung keine energiebedingten CO₂-Emissionen. Es wird zunehmend auch an energiesparenden IoT-Geräten gearbeitet (El Bilali und Allahyari, 2018), wenn auch nicht primär aus ökologischen Gründen, sondern aufgrund beschränkter Batteriekapazitäten (siehe Mekala & Viswanathan, 2017). Nur vereinzelt werden niedrige CO₂-Emissionen bei der Entwicklung digitaler Technologien als Ziel gesetzt (Mutchek & Williams, 2010). Der Betrieb von Maschinen und Geräten verursachen jedoch ohnehin nur einen sehr geringen Teil der Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft (Umweltbundesamt, 2020), weshalb die in Kapitel 5.3 dargestellten Potenziale zur Emissionsreduktion bedeutsamer sind.

Einsparpotenziale beim Wasserverbrauch

Die Reduktion des Wasserverbrauchs ist vor allem wichtig für die Anpassung der Landwirtschaft an die Folgen der Klimakrise, die in vielen Teilen der Welt, so auch in Deutschland, mit längeren und intensiveren Hitze- und Dürreperioden einhergeht. Durch präzisere Bewässerungstechniken (El Bilali & Allahyari, 2018; Mekala & Viswanathan, 2017; Sharma et al., 2020; Villa-Henriksen et al., 2020) basierend auf IoT-Sensoren (Tsolakis et al., 2019) und unterstützt durch DSS (Zhai et al., 2020) kann der Wasserverbrauch theoretisch gesenkt werden. Hier ist das ökologische Potenzial aber ambivalent. Zwar senkt der Einsatz von digitalen Technologien in einer Mehrheit der Fälle den direkten Wasserverbrauch, etwa laut einer Studie im Pflanzenbau um durchschnittlich acht Prozent (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020), dabei ist aber die Varianz sehr groß, und oft führt eine gesteigerte Präzision bei der Bewässerung zu Anreizen für den Anbau wasserintensiverer Kulturen oder zur Ausweitung der bewirtschafteten Fläche und somit letztlich zu einem erhöhten Wasserverbrauch (Mutchek & Williams, 2010) – ein sogenannter Rebound-Effekt.

Reduktion von Lebensmittelabfällen

Schließlich können digitale Technologien zu einer Vermeidung von Lebensmittelabfällen beitragen. Dabei kann schon eine größere Präzision in der landwirtschaftlichen Arbeit den Anteil der Lebensmittel reduzieren, die aufgrund inadäquater Bearbeitung entsorgt werden müssen. Vor allem aber kann der durch Plattformen und DSS vermittelte Austausch von Daten über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg die zeitkritische Logistik von Lebensmitteln effizienter gestalten und so zur Reduktion von Lebensmittelabfällen beitragen (Poppe et al., 2013; Zhai et al., 2020). Auf Verbraucherseite können Apps zur Planung von Einkäufen und Plattformen wie *Foodsharing* zum Teilen von übriggebliebenen Lebensmitteln und Speisen die Nahrungsmittelverschwendung verringern (Hedin et al., 2019).

5.2 Verbessertes Monitoring und Tracking umweltbezogener Daten

Durch die Erhebung von neuartigen landwirtschaftlichen und umweltbezogenen Daten durch sogenannte Environmental IoT (Abbasi et al., 2019), können Umweltwirkungen erkannt und in der landwirtschaftlichen Praxis besser berücksichtigt werden. Beispielsweise kann die Vorhersage von Bodeneigenschaften mithilfe einer Kombination aus Nanosensoren und maschinellem Lernen den Erhalt der Bodenqualität unterstützen (Obade & Gaya, 2021; Sharma et al., 2020; Walter et al., 2017). Das kann auch das Vorkommen von Kleinstlebewesen umfassen, sodass die Ausbringung von Agrochemikalien an den Erhalt dieser Mikro-Biozönose angepasst werden könnte (Baruah & Dutta, 2009; Rodrigues et al., 2017).

Sensoren können zudem die Kartierung und Bewertung von großen Landwirtschaftsflächen unterstützen (Adão et al., 2017). Dies dient der Erkennung und dem besseren Verständnis der Zusammenhänge von Ökosystemleistungen auf Agrarflächen (Redhead et al., 2020). Dafür werden derzeit Methoden und Algorithmen entwickelt, die zur Quantifizierung und Biodiversitätserhaltung beitragen könnten (Petrou et al., 2015). Hochauflösende Sensoren eignen sich beispielsweise zur Klassifizierung von Habitaten, worauf basierend die Artenvielfalt modelliert werden kann (Maskell et al., 2019; Petrou et al., 2015). Monitoringdaten landwirtschaftlicher Flächen, können so zur Entwicklung von Modellen beispielsweise zur Abundanz von Vogel- und Schmetterlingsarten genutzt werden (Sullivan et al., 2017). Potenzial besteht auch in der Möglichkeit durch Sensortechnik verschiedene Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums gleichzeitig zu erfassen und auf diese Weise unterschiedliche Pflanzenphenotypen zu erkennen. Die Datenerhebung und -auswertung hinsichtlich Biodiversitätsindizien ist allerdings als Nebenerzeugnis des Sensoreinsatzes zu betrachten und befindet sich aktuell noch in den Kinderschuhen (Adão et al., 2017).

Für den Wildschutz sind in Deutschland verschiedene Tierschutzvereine und Jäger ehrenamtlich aktiv und setzen in Zusammenarbeit mit Landwirt*innen Drohnen mit Wärmekameras ein, um die Mortalität von Rehkitzten während des Mähens zu reduzieren (Artmann, 2021; Gehrke, 2021; Pohle, 2021; van Bevern, 2021; WDR, 2021). Das BMEL fördert ein Bundesprogramm zur Kitzrettung durch Drohneneinsatz, das jährlich bis zu 100.000 Rehkitze retten soll. Auch die Kartierung von Nist- und Brutplätzen sowie von weiteren Tierarten wie Feldhamstern und Junghasen ist durch den Einsatz von Drohnen in Kombination mit Sensortechnik möglich (Ahirwar et al., 2019; Karp, 2020). Ein Beispiel bietet das Monitoring von Braunkehlchen, die ihr Brutverhalten aufgrund des Klimawandels in den letzten Jahren wesentlich verändert haben und deren Mortalität während der Grünfüttermahd im Frühjahr der letzten Jahre stark zugenommen hat (Majaura, 2016).

Mit Kameras oder Sensoren ausgestattete Drohnen werden in der Literatur zudem als potenzielle Hilfswerkzeuge bei der Kartierung von verschiedenen Biodiversitätsindizien wie der Heterogenität von Habitaten (Maskell et al., 2019), der Artenvielfalt (Librán-Embid et al., 2020; Wich & Koh, 2018), Vegetationsindexen (Putra et al., 2018), und der akustischen Aufnahme von Tierlauten (Dixon et al., 2020) eingestuft. So könnten beispielsweise Fledermauspopulationen durch akustische Drohnenaufnahmen beobachtet werden (Simon et al., 2015). Jedoch kann sich die von den Drohnen ausgehende Lärmbelästigung auch negativ auf die Biodiversität auswirken. So könnten beispielsweise Vögel beim Brüten gestört werden (Schrader, 2017).

Entscheidend für die Nutzung des ökologischen Potenzials ist, wer Zugang zu den relevanten Daten erhält und mit welchem Ziel sie genutzt werden. Umweltschutzbehörden etwa könnten die

durch digitale Technologien erhobenen Daten nutzen, um die Einhaltung von Umwelt- und Naturschutzregeln zu überwachen und durchzusetzen. Das in Kapitel 3.6 vorgestellte EU-Projekt *DIAS* und die rheinland-pfälzische *GeoBox* sind Beispiele für Plattformen, die Behörden einen Zugang zu solchen Informationen ermöglichen. Grundsätzlich ist die Bereitschaft der Landwirt*innen in Deutschland, Daten mit der öffentlichen Verwaltung zu teilen, sehr groß, insoweit dies für sie eine Verringerung des bürokratischen Aufwandes bedeutet. Demgegenüber stehen allerdings oftmals auch datenschutzrechtliche Bedenken und Unsicherheiten (Rohleder et al., 2020).

5.3 Emissionsreduktion

Der Einsatz von digitalen Technologien könnte zur Reduktion von Treibhausgasemissionen landwirtschaftlicher Betriebe beitragen (Villa-Henriksen et al., 2020). Ein Grund dafür sind die in Kapitel 5.1 erwähnten Potenziale zur Reduktion des Energie- und Treibstoffverbrauchs durch Präzision und einer Kombination aus Elektrifizierung und dem Einsatz erneuerbarer Energien. Für den Klimaschutz sind jedoch andere Effekte relevanter: Der weitaus größte Teil von über 50 Prozent der landwirtschaftlichen Emissionen fällt in Form von Methan in der Rinderhaltung an. Zur Vorhersage der Methanemissionen und zur Auswahl geeigneter Maßnahmen wird pilotmäßig auch maschinelles Lernen eingesetzt. Die derzeit erprobten Maßnahmen reichen von Masken, die das von Rindern ausgestoßene Methan absaugen, bis zu einer Abscheidung von Methan aus der Stallluft. Allerdings ist die Abscheidung energieintensiv, und Masken erschweren den Rindern das Atmen. Ein weiterer Ansatz, bei dem maschinelles Lernen zum Einsatz kommt, besteht darin, die Zusammensetzung des Futters zu optimieren, um die Methanproduktion zu verringern. Dadurch können jedoch nur marginale Verringerungen der Methanemissionen erreicht werden (Kiat et al., 2019). Eine Reduktion der Tierbestände ist daher unumgänglich, um die Klimaziele in der Landwirtschaft zu erreichen.

Einen signifikanten Teil der landwirtschaftlichen Emissionen macht auch das hochpotente und langlebige Treibhausgas Lachgas aus, das unter bestimmten Bedingungen aus Stickstoff entsteht, der in Form von Gülle oder Kunstdünger ausgebracht und nicht von Pflanzen aufgenommen wurde. Präzisionslandwirtschaft kann zum einen durch eine Reduktion der Stickstoffdüngung zu einer verringerten Entstehung von Lachgas beitragen. Zum anderen können Drohnen und Bodensensoren die spezifischen Bedingungen erkennen, die die Entstehung und Emission von Lachgas begünstigen, etwa besonders saure und feuchte Ackerflächen und gezielt darauf reagieren. Beispielsweise könnten bildverarbeitende Drohnen bereits gezielt Urinlachen auf Weideflächen erkennen und Enzyme ausbringen, die eine Nitrifikation verhindern (Rees et al., 2020).

Schließlich ist für den Klimaschutz auch die Speicherung von Kohlenstoff und Stickstoff im Boden relevant, die durch Präzisionslandwirtschaft erhöht werden kann, wenn weniger Pestizide ausgebracht werden und somit mehr Pflanzen und Mikroben im Boden überleben (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

5.4 Bodenentlastung

Eine weitere Chance der Digitalisierung der Landwirtschaft entsteht durch den Einsatz von leichteren Maschinen, Feldrobotern und Drohnen. Diese könnten in Zukunft größere und schwere Landmaschinen ersetzen (Villa-Henriksen et al., 2020). Das schiere Gewicht großer Maschinen begünstigt Bodenverdichtung und Erosion, die sich negativ auf Wasser- und Nährstoffkreisläufe, die Verfügbarkeit von Sauerstoff und folglich auf das Vorkommen von Kleinstlebewesen und damit auch

auf den landwirtschaftlichen Ertrag auswirken (Bohner et al., 2017; Johnson et al., 2017; Li et al., 2018; Umweltbundesamt, 2015). Beispielsweise wird die Aktivität von Regenwürmern, durch verdichtete Stellen im Boden stark beeinflusst, da sie einerseits in ihrer Bewegung eingeschränkt sind und andererseits unter Sauerstoffmangel leiden (Whalley et al., 1995).

Deutschlandweit liegen auf ungefähr der Hälfte der gesamten Ackerfläche Eigenschaften vor, die bei einer Verdichtung zu einer Beeinträchtigung der Bodenfunktionen führen (Umweltbundesamt, 2015). Zwar kann auch schon eine automatisierte und besser auf aktuelle Wetterbedingungen abgestimmte Steuerung von Maschinen die Bodenverdichtung reduzieren, zum Beispiel indem überflüssige und fehlerhafte Feldfahrten verringert werden (Schrijver & van Woensel, 2016), maßgeblich könnten aber vor allem kleine Feldroboter, die nur einen Bruchteil des Gewichtes großer Landmaschinen auf die Waage bringen, zur Schonung landwirtschaftlicher Böden beitragen.

5.5 Komplexere Anbausysteme

Generell bieten neuartige, leichte und flexible Maschinen wie Feldroboter, Drohnen und IoT-Sensoren die Chance, kleinräumigere Anbausysteme mit größerer Vielfalt zu bewirtschaften (King, 2017). Einzelne Wissenschaftler*innen sehen den Einsatz von Feldrobotern sogar als notwendige Voraussetzung für kleinräumigere, vielfältigere Anbausysteme (Gaus et al., 2017). Neben Feldrobotern können auch neue Sensoren und maschinelles Lernen dabei helfen, der höheren Komplexität polykultureller Anbausysteme gerecht zu werden und diese dadurch möglicherweise in Zukunft wirtschaftlich attraktiver zu machen. Beispielsweise könnte eine Kombination von Sensoren und neuronalen Netzen die optimale Zufuhr von Stoffen im Hydroponik-Anbau berechnen (Mehra et al., 2018).

5.6 Chancen für die Tierhaltung

Auch in der Tierhaltung bietet die Digitalisierung ökologische Chancen. Beim Virtual Herding werden die virtuellen Grenzen eines Weidegebietes mithilfe von Drohnen erkannt und durch akustische und elektrische Signale über Halsbänder markiert. Dies macht Zäune überflüssig, was sich positiv auf das Landschaftsbild und die Biodiversität auswirken kann (Anderson et al., 2014). Aus Tierwohlperspektive ist der Einsatz solcher Signale jedoch umstritten.

Möglicherweise können Virtual Herding und Weidemanagementsysteme die wirtschaftliche Attraktivität, der aus ökologischer Sicht günstigeren Weidehaltung, gegenüber der Stallhaltung erhöhen. Dies kann eine angemessenere Flächenbindung der Tierhaltung begünstigen, die für eine Reduktion des Gülleaufkommens und damit der Stabilisierung von Stoffkreisläufen essenziell ist. Anhand neuer digitaler Daten könnte zudem die ökologische Tragekapazität genauer und unter Einbeziehung zusätzlicher Parameter berechnet werden, beispielsweise dem Vorkommen von Wildtieren oder Mikroben (Anderson et al., 2014). Auch die Erfassung von Informationen über das Verhalten grasender Tiere durch Drohnen oder Sensoren könnte ein für das Tierwohl günstigeres Weidemanagement ermöglichen (BUND, 2019).

Auch im Stall bringen digitale Datenquellen Potenziale für das Tierwohl. Nanosensoren, die Gesundheitsdaten von einzelnen Tieren erfassen, können einen tierindividuellen und damit stark reduzierten Einsatz von Arzneimitteln ermöglichen (Benning, 2020; Rodrigues et al., 2017; Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim BMEL, 2015). Das verringert die Gefahr der Entwicklung von

multiresistenten Keimen und die Belastung der Umwelt etwa durch über die Gülle ausgebrachten Antibiotika.

5.7 Sozio-ökonomische Chancen

Neben den ökologischen Potenzialen werden in der Literatur auch diverse sozio-ökonomische Chancen der Digitalisierung für die Landwirtschaft diskutiert, die jedoch keinen direkten Nutzen für den Erhalt der Biodiversität aufweisen. An prominenter Stelle des politischen und wissenschaftlichen Diskurses steht die Ernährungssicherheit, da die landwirtschaftliche Produktion mittels digitaler Anwendungen produktiver und planbarer gestaltet werden kann (Lutz, 2017; Nüssel, 2018). Ebenfalls häufig angeführt, wird das Potenzial einer gesteigerten Ressourceneffizienz, die auf Kostenreduktionen, verbesserte Wettbewerbsfähigkeit und damit verbundene Profitsteigerungen abzielt. Neben Kostenersparnissen durch den reduzierten Einsatz von Produktionsmitteln, bieten digitale Technologien in der Landwirtschaft das Potenzial, Arbeitskosten zu reduzieren (Rotz et al., 2019; Walter et al., 2017). Präzisions- und IoT-Technologien automatisieren landwirtschaftliche Prozesse, wie die Ausbringung von Betriebsmitteln. Smart Farming Technologien wie FMIS unterstützen bzw. automatisieren landwirtschaftliche Managementprozesse und könnten zu Zeitersparnissen führen (Rotz et al., 2019).

Neben Kostenreduktionen können Präzisions- und Smart Farming-Technologien durch optimierte Bewirtschaftung die Verbesserung der Produktqualität ermöglichen. Dies kann zu Profitsteigerungen führen, etwa wenn durch die digital gestützte Bestimmung der optimalen Fruchtichte in Obstplantagen die Menge an Antioxidantien in Früchten gesteigert und dadurch ein höherer Verkaufspreis erzielt werden kann (Walter et al., 2017). Zahlungsbereitschaften von Endkonsument*innen können zudem erhöht werden, wenn die im Konzept der Landwirtschaft 4.0 skizzierte Integration landwirtschaftlicher Produktionssysteme in betriebsübergreifende IoT-Netzwerke dafür genutzt wird, Informationen über Produkteigenschaften und Produktionsbedingungen entlang der Wertschöpfungskette zu generieren und die Transparenz darüber für Endkonsument*innen mithilfe von Apps und Blockchain-Technologien zu erhöhen (Hou et al., 2019; Svenfelt & Zapico, 2016; Walter et al., 2017). Die entlang der Wertschöpfungskette generierten Informationen könnten auch die Internalisierung von in der landwirtschaftlichen Produktion externalisierten ökologischen Kosten ermöglichen, wenn Endverbraucher*innen die „wahren“ Produktpreise in Verbindung mit entsprechenden Informationen zu ökologischen Auswirkungen der Produktion angezeigt, und somit informierte Kaufentscheidungen begünstigt würden (DAFA, 2019).

Mit potenziellen Profitsteigerungen durch Kostenreduktionen und verbesserte Produktqualität auf der einen Seite und Zeitersparnissen durch Automatisierung auf der anderen Seite, bieten digitale Technologien in der Landwirtschaft die Chance auf Entlastung der Landwirt*innen. Eine Reduktion bzw. der Wegfall von monotonen oder gefährlichen Routinetätigkeiten und eine Erhöhung des Arbeitskomforts sowie der Arbeitsflexibilität können letztlich zu einer gesteigerten Arbeitszufriedenheit sowie erhöhten Lebensqualität führen (Rotz et al., 2019). Dies wiederum kann landwirtschaftliche Berufe attraktiver für junge Nachwuchskräfte machen (Bahrs, 2018; Reinecke, 2015). Auch die mit der Digitalisierung der Landwirtschaft einhergehende Veränderung des Aufgaben- und Anforderungsprofils für Landwirt*innen hin zu neuen Fähigkeiten im Umgang mit digitalen Geräten und großen Datenmengen wird häufig als Potenzial genannt, die Attraktivität des Berufs zu steigern und eine Verjüngung des Agrarsektors einzuleiten (Schrijver & van Woensel, 2016).

Eine durch GPS- und IoT-Technologien verbesserte Datenbasis zu Produktionsbedingungen bietet zudem die Chance einer verbesserten landwirtschaftlichen Beratung durch Behörden und Beratungsdienstleister (Drewel et al., 2017). Auch der Informationsaustausch zwischen Landwirt*innen könnte mittels im landwirtschaftlichen IoT generierter Daten und digitaler Kommunikationskanäle gestärkt werden. Social-Media-Plattformen und Initiativen wie *AirFarm* oder *iCow* können Netzwerke von Landwirt*innen dabei auch über Ländergrenzen hinweg stärken (Walter et al., 2017).

Schließlich argumentieren einige Wissenschaftler*innen, dass die Digitalisierung des landwirtschaftlichen Sektors zu einer Diversifizierung landwirtschaftlicher Produktionssysteme beitragen kann, da digitale Anwendungen Landwirt*innen durch datenbasierte Managementempfehlungen beim Anbau von zuvor von ihnen noch nicht angebaute Kulturen unterstützen können (Walter et al., 2017). Dieser Diversifizierungsthese stehen jedoch einige Risiken entgegen, die in den Kapiteln 6.4 und 6.7 weiter ausgeführt werden. Darüber hinaus besteht die Chance, dass alternative Organisationsformen im Landwirtschafts- und Ernährungssektor gestärkt und verbreitet werden, indem Initiativen digitale Werkzeuge für ihre Zwecke nutzen. Espelt und Moreira (2019) zeigen auf, wie agrarökologisch wirtschaftende Organisationen digitale Plattformen nutzen. *OpenOlior* und *Solawi.ch* sind Beispiele für Plattformen, die eine Vernetzung der Akteure in der Solidarischen Landwirtschaft und damit eine regionale, nach dem Prinzip der Solidarität organisierte Direktvermarktung ermöglichen (Benning, 2020). Die *Foodsharing*-Bewegung, die überschüssige Lebensmittel aus Privathaushalten und Betrieben wie Bäckereien oder Lebensmittelgeschäften einsammelt und unter ihren Mitgliedern verteilt, organisiert sich bereits seit einigen Jahren über eine simple Web-basierte Plattform. Start-ups wie *Too Good To Go* haben das Prinzip erfolgreich kommerzialisiert und skaliert. Genossenschaftlich organisierte Maschinenringe, Genossenschaftsbanken und andere Formen der kooperativen Produktion sind in der Landwirtschaft in Deutschland traditionell verankert und bieten das Potenzial, an die weltweit wachsende Bewegung des Plattformkooperativismus anzuschließen (siehe Scholz, 2016). Kooperativen können als demokratische Organisationsformen die Bedürfnisse ihrer Mitglieder und Kund*innen dabei möglicherweise ressourceneffizienter und nachhaltiger erfüllen als klassische Unternehmen, die Gewinn- und Wachstumszwängen unterliegen (Elsen, 2014; Schröder & Walk, 2014; Soto Alarcón et al., 2020).

6 Risiken der Digitalisierung der Landwirtschaft

Umfassende Transformationen sozio-technischer Systeme sind neben den beabsichtigten und erwünschten Effekten typischerweise mit unbeabsichtigten, schwer kalkulierbaren Effekten verbunden, von denen einige als Risiko zu bewerten sind. Die meisten Risiken sind nicht für alle relevanten Akteure gleichermaßen bedrohlich, sondern verschaffen typischerweise einzelnen einen Vorteil auf Kosten anderer. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die potenziellen Risiken der Digitalisierung in der Landwirtschaft, wobei potenziell negative ökologische Auswirkungen, insbesondere im Kontext vom biodiversitätsverlust, im Vordergrund stehen. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass der wissenschaftliche Diskurs primär auf die Chancen der Digitalisierung der Landwirtschaft fokussieren und die Risiken der digitalen Technologien bisher kaum in den Blick nimmt. Für die Erstellung des folgenden Abschnitts wurde daher auch graue Literatur von Nichtregierungsorganisationen und weiteren zivilgesellschaftlichen Organisationen zurückgegriffen.

6.1 Intensivierung der Landwirtschaft

Ein wesentliches Risiko liegt darin, dass Techniken der Präzision und Automatisierung bisher primär zur Intensivierung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung genutzt werden. Damit werden Effizienzsteigerungen nicht für eine Reduktion der Inputs, also etwa Agrochemikalien und Düngemittel, sondern für eine Vergrößerung des Outputs genutzt – ein Rebound-Effekt (Santarius, 2015). Solche Rebound-Effekte werden bei der Digitalisierung der Landwirtschaft befürchtet (Zscheischler et al., 2021) und vereinzelt auch nachgewiesen (für eine Übersicht siehe von Ahlefeld, 2019). So kann die Tatsache, dass trotz der Verbreitung einzelner Präzisionslandwirtschaftstechnologien in den letzten 20 Jahren der Einsatz von Agrochemikalien in Deutschland nahezu konstant geblieben ist (Umweltbundesamt, 2021b) als Hinweis auf das tatsächliche Vorliegen eines Rebound-Effektes gewertet werden (Benning, 2020).

Schieffer und Dillon (2015) konnten zeigen, dass die Nutzung von Präzisionslandwirtschaftstechnologien wie automatischen Lenksystemen und teilflächenspezifischen Applikationen wegen der kosteneffizienteren Ausbringung einen Anreiz für einen insgesamt höheren Einsatz von Düngemitteln schafft. Rebound-Effekte können auch auftreten, wenn heterogene Flächen bislang großflächig mit einer geringen Intensität gedüngt wurden und dank Präzisionslandwirtschaft nun einzelne Teilflächen intensiver gedüngt werden können (von Ahlefeld, 2019). Ein dritter möglicher Grund für Rebound-Effekte bei Düngemitteln ist das sogenannte „Minimumgesetz“, demzufolge das Pflanzenwachstum von den jeweils knappsten Nährstoffen begrenzt wird (Gröger, 2010). Eine effizientere Stickstoffdüngung kann deshalb beispielsweise eine erhöhte Gabe von Phosphor oder Kalium profitabel machen, die vormals keinen zusätzlichen Nutzen gehabt hätte (von Ahlefeld, 2019). Das kann Anreize zur Überdüngung schaffen, die die natürlichen Kreisläufe dieser Stoffe weiter unter Druck setzen.

Bei der Bewässerung gibt es klare empirische Hinweise auf das Auftreten von Rebound-Effekten, die dadurch begründet werden, dass Landwirt*innen durch die effizientere Bewässerung einen Anreiz haben, weiteres Ackerland zu bewässern oder wasserintensivere Kulturen anzubauen (Li und Zhao, 2018; Pfeiffer & Lin, 2014).

Ein grundsätzlicher Rebound-Effekt betrifft die erhöhte Präzision durch digitale Technologien. Beispielsweise bieten Feldroboter und Drohnen gerade wegen ihrer Flexibilität, Autonomie und Präzision die Möglichkeit, auch marginale Standorte wie Saumstrukturen und Nischenflächen zu bewirtschaften, die bisher teils brach lagen. Diese für die Biodiversität wichtigen landwirtschaftlichen Restflächen könnten, sofern sie nicht unter Schutz stehen oder ihr Erhalt als ökologische Vorrangflächen durch die GAP kompensiert wird, mit digitalen Technologien so effizient bearbeitet werden, dass ihre Bewirtschaftung profitabel wird. Dadurch können ökologische Nischen verloren gehen, was häufig mit einem Biodiversitätsverlust einhergeht. Gebremst wird dieser Effekt möglicherweise jedoch durch die hohen Kapitalkosten dieser Technologien, welche eine hohe Rendite erfordern, die auf solchen marginalen Standorten nicht unbedingt gewährleistet ist (Reichel et al., 2021).

6.2 Bodenverdichtung

Wenn der Trend hin zu kleineren Feldrobotern marginal bleiben sollte, droht das Risiko einer weiteren Bodenverdichtung, denn bislang zeigt sich empirisch tatsächlich eher eine digitale Aufrüstung immer größerer Landmaschinen (Reichel et al., 2021). Ob langfristig der Trend zu leichteren oder

zu schwereren Maschinen überwiegen wird, ist bislang empirisch noch nicht abzusehen. Dafür entscheidend werden neben politischen Rahmenbedingungen und den Kosten für Roboter und Drohnen, auch die Entwicklungen auf dem Arbeitsmarkt sein, die beeinflussen, wie kostenattraktiv der Einsatz von Feldrobotern und Drohnen im Vergleich zu menschlicher Arbeitskraft ist (Gaus et al., 2017).

6.3 Material- und Energieverbrauch

Eine Betrachtung der ökologischen Risiken der Digitalisierung muss auch den Material- und Energieverbrauch digitaler Geräte und Anwendungen umfassen (Fromhold-Eisebith et al., 2019; Zscheischler et al., 2021). Mit der Produktion und Nutzung von digitalen Geräten sind Treibhausgasemissionen (Popli et al., 2018) sowie Ökosystemschäden verbunden, die sowohl durch den Abbau von Erzen und seltenen Erden als auch durch die überwiegend umweltschädlichen und global ungerechten Entsorgungspraktiken verursacht werden. Der Anteil der Produktion und Nutzung landwirtschaftlicher digitaler Technologien am globalen Energie- und Ressourcenverbrauch ist empirisch unklar, dürfte jedoch im Vergleich etwa mit dem Bereich der Unterhaltungselektronik eher gering sein (Reichel et al., 2021). Auch die Größenordnung des Energieverbrauch von Cloud Lösungen und anderer digitaler Infrastruktur die für den Einsatz digitaler Technologien in der Landwirtschaft notwendig ist wurde bisher nicht beziffert.

6.4 Homogenisierung der Anbausysteme

Weil digitale Systeme typischerweise den Anbau bestimmter Kulturen optimieren, setzen sie grundsätzlich einen Anreiz für Landwirt*innen, sich auf wenige Hohertragsorten zu spezialisieren, anstatt diversifizierte Anbausysteme zu fördern. Dieses Risiko wird durch die starke Konzentration im Markt für digitale Anbausysteme gesteigert. Der wachsende wirtschaftliche Druck begünstigt eine Spezialisierung auf wenige, besonders profitable Kulturen. Mit der Sortenvielfalt schwindet tendenziell auch die Artenvielfalt. Die in 6.1 umrissenen Gefahren, wie der Verlust von Saumstrukturen und Nischenflächen, könnten deshalb statt bloß einzelner Äcker rasch gesamte Agrarlandschaften verändern. Der durch die Digitalisierung verstärkte Strukturwandel und die mögliche Homogenisierung von Anbausystemen könnte somit beträchtliche negative Konsequenzen für die Biodiversität und die ökologische Resilienz der Landwirtschaft haben.

6.5 Auswirkungen auf die Gentechnik

Die Auswirkungen der Gentechnik sind insbesondere in Deutschland gesellschaftlich und politisch hoch umstritten. Die möglichen Risiken der Gentechnik könnten durch neue Möglichkeiten der digitalen Genomanalyse und der Bearbeitung einzelner Gene vergrößert werden. Eine solche Ausweitung der gentechnischen Anwendungen in der Züchtung bringt aus Sicht von Kritiker*innen Risiken für die Agrobiodiversität und die Resilienz von Anbausystemen. Dazu gehört die weit verbreitete Züchtung herbizidresistenter Pflanzen, die den Einsatz von Totalherbiziden erfordert, welche für die Biodiversität verheerend sind. Die Kontrolle über die Entwicklung und den Einsatz von Gentechnologien liegt bei relativ wenigen privaten Unternehmen mit großer Marktmacht (BUND, 2019). Immaterialgüterrechte an genetischen Informationen sind aus Sicht von Kritiker*innen sehr breit definiert, was die massive Ausweitung und Konzentration der Eigentumsrechte an Pflanzen, Tieren und Saatgut ermöglicht. Diese Gefahr wird durch die Digitalisierung weiter verstärkt, weil Innovation in der Gentechnik zunehmend auf der Analyse von Big Data basiert, die sich in der Hand weniger Konzerne befinden. Ob und wie eigentumsartige Rechte auch an digitalen Daten eingeführt

und durchgesetzt werden könnten oder sollten und was mögliche Konsequenzen im Bereich der Gentechnik sein könnten, ist dabei Gegenstand einer andauernden politischen und juristischen Debatte (Wernick et al., 2020).

6.6 Intensivierung und Ausweitung der Tierhaltung

Grundsätzlich könnten die durch die Digitalisierung verstärkten Skaleneffekte in der Nutztierhaltung auch den bisherigen Trend zu immer größeren Tierbestandsgrößen verstärken. Dadurch würde auch das Risiko der Entwicklung und Verbreitung neuer Krankheitserreger steigen (Fromhold-Eisebith et al., 2019). Dies treibt den positiven Feedbackloop von erhöhtem Antibiotikaeinsatz und der Entwicklung immer resistenterer Keime weiter voran.

Insoweit digitale Technologien die Produktionskosten von Fleisch senken, können sie zudem einer Ausweitung der Fleischnachfrage beitragen, was sich negativ auf das Klima sowie auf lokale Stoffkreisläufe, Landnutzungskonflikte und Ökosysteme in Deutschland, aber auch in futtermittelexportierenden Regionen auswirken würde. Da die Vieh- und insbesondere die Rinderhaltung den weitestgehend größten Teil der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen verursacht, und eine Entkopplung der Tierhaltung von den Emissionen mittelfristig nur sehr eingeschränkt möglich sein wird, ist die Reduktion des Fleisch- und Milchkonsums für einen effektiven Klimaschutz jedoch unumgänglich (Hedenus et al., 2014).

Schließlich könnte eine fortschreitende Robotisierung in der Tierhaltung den Kontakt zwischen Nutztieren und Landwirt*innen weiter reduzieren. Tierschützer*innen argumentieren, dass sich dies negativ auf das Tierwohl auswirken würde (BUND, 2019). Fatale Auswirkungen auf das Tierwohl kann auch ein möglicher Ausfall automatisierter Systeme haben, etwa wenn defekte Melkroboter einen Milchstau verursachen (Gräff et al., 2016).

6.7 Sozio-ökonomische Risiken

Der Status Quo der digitalen Ökonomie ist grundsätzlich geprägt von Organisationsmodellen und technischen Infrastrukturen, die eine Machtkonzentration begünstigen. Insbesondere Plattformunternehmen und KI-Firmen weisen aufgrund einer Reihe von Netzwerk-, Skalen- und Lock-in-Effekten eine quasi-natürliche Tendenz zur Monopolisierung auf (Srnicek, 2017). Die Extraktion, exklusive Aneignung und Verarbeitung von Daten kann daher asymmetrische Machtstrukturen auf Kosten landwirtschaftlicher Betriebe ermöglichen. Die ohnehin stark konzentrierten oligopolistischen Marktstrukturen im Agrarsektor werden durch die Verzahnung von Agrochemie-, Landmaschinen-, Finanz- und Versicherungskonzernen mit den großen IT-Konzernen weiter verstärkt. Das zeigt sich in einer Reihe von Übernahmen, Fusionen und Joint Ventures, in kartellartigen Praktiken, etwa wenn Datenportabilität nur zwischen wenigen großen Plattformen gewährt und kleinere Wettbewerber von Datenstandards ausgeschlossen werden. Wesentliche Teile der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette sind in Oligopolen organisiert. Drei Konzerne (Deere & Company, CNH Industrial, AGCO) teilen über 50 Prozent des weltweiten Marktes für Landmaschinen unter sich auf. Ebenso werden über die Hälfte der kommerziell entwickelten Saatgutsorten von drei Unternehmen (Bayer/Monsanto, Corteva, Syngenta) und 70 Prozent von nur zehn Firmen umgesetzt (Chemnitz et al., 2017). Im Zuge der Digitalisierung ist eine zunehmende horizontale Integration zu beobachten, etwa in Form zahlreicher Übernahmen kleiner Start-ups durch große Konzerne, aber auch

durch neue Kooperationen zwischen Letzteren. Beispielsweise arbeiten AGCO und der Pestizidhersteller DuPont sowie CNH und Monsanto jeweils gemeinsam an der Entwicklung von Farmmanagementsystemen, die jeweils Daten aus beiden Konzernen verbinden (ibid.).

Das Geschäftsmodell von Plattformen basiert wesentlich auf der exklusiven Aneignung möglichst großer Datenmengen. Diese Entwicklung von datenbasierten Extraktions- und Machtverhältnissen, wird in Anlehnung an die (neo-)koloniale Praxis des Landgrabbing als „Data Grabbing“ bezeichnet (Fraser, 2019). Durch diese einseitige Kontrolle über die Daten, die starke Marktmacht und den technologischen Lock-in entsteht eine starke ökonomische Asymmetrie. Dadurch könnten sich Agro- und Plattformkonzerne einen größeren Teil der Wertschöpfung in Form von Monopolrenten auf Kosten von Landwirt*innen aneignen. So könnte die Digitalisierung die Aufgabe von kleinen Höfen und die Konzentration der landwirtschaftlichen Strukturen in Deutschland weiter beschleunigen (BUND, 2019; Fromhold-Eisebith et al., 2019). Mit Blick auf Datenschutz und die Wahrung der Privatsphäre kann auch die Vision einer Landwirtschaft 4.0, in der im großen Stil Daten über das Ernährungsverhalten von Konsument*innen erhoben werden, kritisch diskutiert werden.

Ein weiteres Risiko ist eine stärkere Abhängigkeit der Landwirt*innen von Einführungs-, Reparatur-, Automatisierungs- und Beratungsdienstleistungen. Die hohen fixen Investitionskosten vieler digitaler Technologien könnten vor allem kleinere bäuerliche Betriebe zwingen, Wertschöpfungsbereiche an Dienstleister auszulagern oder aber an Wettbewerbsfähigkeit zu verlieren. Durch die starke vertikale und horizontale Integration digitaler Dienstleistungen werden diese von nur wenigen Konzernen angeboten, was die Auswahlmöglichkeiten, aber auch die Transparenz einschränkt. Diese Informationsasymmetrie wird durch die veränderten Anforderungen an Landwirt*innen noch verstärkt. Denen fehlt es oftmals noch an technischen Fähigkeiten und digitalen Basiskompetenzen, sowie an Rechtssicherheit etwa in Bezug auf Daten, und an einem Bewusstsein für die eigene Handlungsfähigkeit und Verhandlungsmacht (INKOTA, 2020; Zscheischler et al., 2021).

Darüber hinaus besteht die Befürchtung, dass die Automatisierung und die Einführung datenbasierter Managementsysteme zum Downskilling landwirtschaftlicher Arbeit führen. Besonders für abhängig Beschäftigte droht außerdem eine weitere Prekarisierung und Verdichtung der Arbeit, auch im Zusammenhang mit der möglichen Verbreitung von digitalen Überwachungstechnologien, die im industriellen Bereich bereits weit verbreitet sind (INKOTA, 2020).

Auch der Nichtgebrauch und der damit zunehmende Verlust von Erfahrungswissen im Umgang mit der lokalen natürlichen Umwelt kann sich negativ auswirken (BUND, 2019). Womöglich können Landwirt*innen landwirtschaftliches Erfahrungswissen nicht mehr hinreichend aufbauen, wenn algorithmenbasierte Systeme an ihrer Stelle Managemententscheidungen treffen, die sie unter Umständen nicht nachvollziehen können (Goller et al., 2020; INKOTA, 2020). Insbesondere in ökologischen Ausnahmesituationen übersteigt die Komplexität der agrar-ökologischen Zusammenhänge oft die Fähigkeiten von Algorithmen und erfordert praktisches Erfahrungswissen (AgrarBündnis e.V., 2020; Zscheischler et al., 2021). Solche Ausnahmesituationen, etwa Extremwetterereignisse oder die Migration von Schädlingen, werden im Kontext der Klimakrise an Häufigkeit und Bedeutung zunehmen.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die ökologischen Herausforderungen für die Landwirtschaft sind umfassend: die weltweite Ernährungssicherheit muss gewährleistet werden; die Klimakrise, bei gleichzeitiger Anpassung an ihre

Konsequenzen, gelöst werden; der Verlust von Biodiversität gestoppt; und Ökosystemleistungen von Agrarökosystemen gefördert werden.

Parallel zu diesen globalen ökologischen Herausforderungen hat die Digitalisierung einen umfassenden, wenn auch bislang ungleichmäßig verbreiteten Transformationsprozess der Landwirtschaft in Gang gesetzt. Innerhalb dieses Transformationsprozesses wurden im vorliegenden Diskussionspapier sechs Trends unterschieden. Zunächst sind drei aufeinander aufbauende Trends auf der Ebene der Anwendungskontexte hervorzuheben: Präzisionslandwirtschaft, Smart Farming und Landwirtschaft 4.0. Diese überschreiben grob die für die Landwirtschaft zentralen technologischen Entwicklungen. So läutete die Präzisionslandwirtschaft den Prozess der Digitalisierung in der Landwirtschaft ein. Präzisionslandwirtschaft bezeichnet die gezielte, ortsangepasste und bedarfsgerechte Ausbringung von Betriebsmitteln und Ressourcen auf Feldebene. Smart Farming geht über Präzisionslandwirtschaft hinaus, indem es den Anwendungsfokus digitaler Lösungen von der flächen- und teilflächenspezifischen Bewirtschaftung auf die Optimierung komplexer Anbausysteme und des gesamten Betriebsmanagements erweitert. Hierbei können landwirtschaftliche Prozesse unterstützt und teils automatisiert werden, indem datengenerierende und ausführende Technologien miteinander verknüpft werden. Seit gut zehn Jahren zeichnet sich nun ein grundlegender Paradigmenwechsel ab, weg von punktuellen Anwendungen digitaler Technologien in der Landwirtschaft hin zu einer ganzheitlich neuen Art der landwirtschaftlichen Wertschöpfung – die Landwirtschaft 4.0. Hierbei ist die zentrale Vision, Daten von Angebot und Nachfrage qualitativ hochwertiger landwirtschaftlicher Produkte verzahnt zu betrachten und gleichzeitig ökologische Externalitäten zu internalisieren. Die intelligente Vernetzung etablierter und aufstrebender Technologien soll dabei eine effiziente, transparente und flexible landwirtschaftliche Wertschöpfung ermöglichen. Die übergeordneten Digitalisierungstrends – das Internet of Things (IoT), maschinelles Lernen und Plattformen – bilden hierfür auf der Ebene der technologischen Infrastruktur das Fundament, auf dem die zuvor beschriebene Entwicklung von Präzisionslandwirtschaft über Smart Farming hin zur Landwirtschaft 4.0 genannten Trends fußt.

Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Landwirtschaft

Die Digitalisierung der Landwirtschaft bringt ökologische Chancen und Risiken mit sich. Grundsätzlich bieten die genannten Trends und Technologien einerseits Chancen zu Effizienzsteigerungen, die vor allem Düngemittel, Chemieeinsatz und Treibhausgasemissionen verringern. Das primäre Ziel ist die effiziente Nutzung von Ressourcen, welche aber zugleich zum Schutz von Biodiversität und anderen Ökosystemleistungen beitragen könnten, zum Beispiel durch die Nutzung von Daten für biodiversitätsfördernde Maßnahmen und Monitoring. Kleinere Feldroboter könnten zudem die Bodenverdichtung verringern und komplexere Anbausysteme mit höherer Agrobiodiversität ermöglichen. Es bestehen auch technologiespezifische Entwicklungsrichtungen. Während Technologien wie Roboter primär auf die Arbeitsentlastung landwirtschaftlicher Betriebe ausgerichtet werden, werden Drohnen primär im Bereich Monitoring und Kartierung von Habitaten genutzt, was gegenwärtig jedoch nur von wenigen Landwirtschaftsbetrieben eingesetzt wird.

Neben den Chancen, die die Digitalisierung bietet, besteht das Risiko, dass digitale Technologien zur weiteren Intensivierung von Agrarsystemen beitragen und somit eine nachhaltigkeitsorientierte Transformation der Landwirtschaft erschweren. Auch bedürfen die Produktion und Anwendung digitaler Technologien selbst Energie und Materialien. Höhere Effizienz kann zudem zu Rebound-Effekten führen, wodurch Einsparungen konterkariert würden. Darüber hinaus besteht das Risiko, dass besonders in kleinen und mittelständischen Betrieben aufgrund eines erhöhten administrativen Aufwands und mangelnden Wissens erhoffte Ressourceneinsparungen und damit eine nachhaltigere Betriebsführung ausbleiben, weil Daten nicht adäquat erfasst, ausgewertet, geteilt und

genutzt werden. Auf sozio-ökonomischer Ebene scheinen die Risiken bislang zu überwiegen. Insbesondere zeigt sich eine Tendenz zur Konzentration von infrastruktureller, ökonomischer und datenbasierter Macht, die auch ökologisch negative Auswirkungen wie die Homogenisierung von Anbausystemen mit sich bringen könnte.

Der Erhalt von Biodiversität und Ökosystemen ist bisher kein primäres Ziel der Digitalisierung der Landwirtschaft, sondern stellt lediglich einen möglichen Nebeneffekt dar. Solange keine konkreten Anreize für den Schutz von Biodiversität und Ökosystemleistungen geschaffen werden, bleibt bei der Digitalisierung der Landwirtschaft die Steigerung der Produktivität im Fokus und Umwelt- und Naturschutzpotenziale unausgeschöpft. Insgesamt klafft eine große Lücke zwischen dem theoretisch möglichen Nutzen und dem bislang tatsächlich Beobachtbaren. Beispielsweise kommt die Meta-Studie von Schrijver und van Woensel (2016) zu dem Schluss, dass Präzisionslandwirtschaft bis zu 80 Prozent der Pestizide einsparen könnte, während in der empirischen Studie von Bovenstiepen et al. (2016) bislang nur 2 Prozent der Landwirt*innen in Deutschland Einsparungen von über 20 Prozent erzielen. Das tatsächliche Ausmaß vieler positiver und negativer Auswirkungen ist zudem empirisch noch nicht abzusehen und stellt eine große Forschungslücke dar (siehe auch KLU, 2019). Dabei ist auch die Ausgestaltung der Politik noch offen und hat großen Einfluss auf zukünftige Entwicklungspfade.

Hemmende Faktoren für die Digitalisierung in der Landwirtschaft

Sowohl die Chancen als auch die Risiken werden durch eine Reihe von Faktoren eingeschränkt, welche die Nutzung und Verbreitung digitaler Tools bislang hemmen. Das größte Nutzungshemmnis besteht in der unklaren Profitabilität vieler Technologien, verbunden mit hohen Investitionskosten. Dabei besteht ein Zusammenhang zwischen der Rentabilität einer ressourcenschonenden Technologie und der Wahrscheinlichkeit eines Rebound-Effekts, da Investitionen in effizienzsteigernde Maßnahmen oft vor allem durch eine Steigerung des Outputs und damit einem gesteigerten Erlös rentabel werden. Das hat zur Konsequenz, dass gerade die komplexeren Technologien mit den größten ökologischen Potenzialen wie etwa Feldroboter weniger verbreitet sind als simple, effizienzsteigernde Anwendungen der Präzisionslandwirtschaft wie etwa automatische Spurführungssysteme.

Ein weiteres Nutzungshemmnis ist die Notwendigkeit für Landwirt*innen, neue Fähigkeiten und Informationen zu erlangen, beispielsweise was den Umgang mit Daten betrifft (Pesce et al., 2019). Weil besonders jüngere Landwirt*innen solche Fähigkeiten erlernen und neuere Technik eher einsetzen, wirkt sich auch das grundsätzliche Nachwuchsproblem in der Landwirtschaft hemmend auf die Verbreitung der Digitalisierung aus. Abhilfe schaffen könnten hier angepasste Aus- und Weiterbildungsangebote, Plattformen für den Informationsaustausch sowie eine grundsätzliche Stärkung der Attraktivität landwirtschaftlicher Berufe. Landwirt*innen werden zunehmend eine Doppelrolle zwischen Lebensmittelproduktion und Naturschutz einnehmen und digitale Kompetenzen aufweisen müssen. Das wirft Fragen nach der Aus- und Weiterbildung von Landwirt*innen auf und weist gleichzeitig auf die Notwendigkeit einer integrierten politökonomischen Strategie zur Gestaltung der Digitalisierung hin. Es bestehen zudem juristische und technische Unklarheiten bezüglich Dateneigentum, Sicherheit und Privatsphäre. Hier wird in der Literatur ein klarer Handlungsbedarf bei Aufsichts- und Regulierungsbehörden gesehen. Mehr Transparenz in der Daten-Governance könnte dazu beitragen, dass Landwirt*innen Vertrauen zu Anbietern entwickeln können.

Schließlich sind die Chancen und Risiken der Digitalisierung nicht nur weltweit, sondern auch innerhalb Deutschlands geografisch ungleich verteilt. Ein „Digital Divide“ wird allein schon durch den

sehr ungleichmäßigen Breitbandausbau verursacht, der für die Nutzung vieler Technologien unabdingbar ist. Ein entscheidender Faktor für die Verbreitung digitaler Landwirtschaft ist und bleibt daher der Breitbandausbau in ländlichen Regionen. Die in Deutschland traditionell stark divergierende Agrarstruktur mit großen Betrieben im Norden und Osten und kleineren Betrieben im Süden und Westen trägt ebenfalls zu einer regionalen Ungleichzeitigkeit der Digitalisierung bei (Agrar-Bündnis e.V., 2020). Große Betriebe investieren eher in größere Maschinen, weil sie dank positiver Skaleneffekten profitabler sind. Dies kann ebenjene Skaleneffekte weiter verstärken. Auf der anderen Seite sind Apps und Informationszugang betriebsgrößenunabhängig und werden auch von kleineren Betrieben angenommen. Ein Unterschied in den genutzten digitalen Technologien könnte den Unterschied zwischen Betriebsformen noch weiter vergrößern.

Ungenutztes Potenzial für die ökologische Transformation

Es fällt auf, dass die eingangs diskutierten ökologischen Transformationskonzepte nicht unbedingt im Einklang mit den Möglichkeiten der Digitalisierung stehen. Dabei werden Ertragssteigerungen und Nachhaltigkeit häufig als komplementär und nicht als Gegenstand eines möglichen Trade-Offs betrachtet, wobei Ertragssteigerungen tendenziell priorisiert werden. Die Wahrnehmung ökologischer Potenziale der Digitalisierung wird dabei überproportional von den beiden Transformationskonzepten klimasmarte Landwirtschaft (CSA) und nachhaltige Intensivierung (NI) geprägt. Agrarökologische Konzepte wie Polykulturen, Agroforstsysteme oder Permakultur-Prinzipien finden nur bedingt Eingang in die Entwicklung digitaler Tools. Damit bildet die Digitalisierung der Landwirtschaft nur einen Teil der möglichen Transformationspfade ab. Konzepte wie CSA und NI, die stark auf marginalen technischen Verbesserungen entlang bestehender Technologiepfade basieren, werden jedoch teils grundsätzlich kritisiert, weil sie eine Fortsetzung industrieller, kapitalintensiver und nicht an lokale Umweltbedingungen angepasste landwirtschaftliche Praktiken legitimieren (z. B. Oxfam, 2016). Demgegenüber steht die Möglichkeit, die Entwicklung von Technologien gezielt an den agrarökologischen Transformationskonzepten auszurichten, die dem Umfang der ökologischen Herausforderungen angemessener sind und die langfristige Resilienz von Agrarsystemen fördern.

Großes ungenutztes Potenzial besteht beispielsweise im Bereich der Komplexität und Diversität von Anbausystemen. Hier könnte die Digitalisierung einen entscheidenden Beitrag leisten. Jedoch müssen die Potenziale sowohl von der Politik und Gesellschaft als auch von anderen Akteuren wie Landwirt*innen, Ingenieur*innen oder Naturschützer*innen erkannt und für eine praktische Biodiversitäts- und Ökosystemleistungserhaltung ausgebaut und kombiniert werden, damit biodiversitätsfördernde Methoden im Agrarbereich weitreichend umgesetzt werden können. Die Entwicklung und der Einsatz von Feldrobotern, Sensoren, FMIS, DSS und anderen Technologien müssen dafür auf diverse Polykulturen hin ausgerichtet werden.

Für die Gestaltung der Digitalisierung in der Landwirtschaft ist daher eine Technologie- und Innovationspolitik entscheidend, die eine umweltgerechte Antwort auf die Frage gibt, wer welche Technik zu welchem Zweck entwickelt und entsprechende Anreize setzt. Natur- und Umweltschutz sind neben der Ertragssteigerung als Optimierungsziel zu definieren und in datenbasierte Technologien, durch den Hersteller, aber auch durch die Regulierungsbehörden, zu integrieren (Benning, 2020; BUND, 2019; Zscheischler et al., 2021). Besonderer Regulierungsbedarf besteht hierbei für digitale Plattformen, die in immer mehr Lebensbereichen wie auch der Landwirtschaft als wichtige Infrastrukturen fungieren und somit erheblichen Einfluss auf die Grundversorgung der Bevölkerung mit Lebensmitteln ausüben können. Vor einem solchen Hintergrund diskutieren einige Autor*innen die Notwendigkeit spezifischer Regulierungsansätze, die neben wettbewerbs- und medienrechtlichen Fragestellungen auch die „infrastrukturelle Macht“ digitaler Plattformen in den Fokus nehmen

(siehe z. B. Busch, 2021; Dijck et al., 2019; Dörr, 2014). Eine konkrete technologiepolitische Strategie, die nicht bei der Regulierung bestehender Plattformen ansetzt, sondern auf die Bereitstellung von öffentlichen Dateninfrastrukturen abzielt, wird mit Projekten wie der *GeoBox*, *Agri-Gaia* oder dem *Agri-food Data Portal* der EU verfolgt. Datenverarbeitende Plattformen und Clouds können dabei als Teil der sektoralen Infrastruktur begriffen werden, vergleichbar mit Straßen- oder Eisenbahnnetzen, die als Natürliche Monopole vom Staat bereitgestellt werden (Olk, 2020). Aus dieser Perspektive ergibt sich beispielsweise die Chance, eine attraktive öffentliche Cloud-Infrastruktur für die Landwirtschaft in Deutschland anzubieten, die naturschutzrelevante und agrarwirtschaftliche Daten an einem Ort bereitstellt. Dies könnte die wettbewerbliche Entwicklung von Anwendungen ermöglichen, die ökologische und ökonomische Zielsetzungen gleichermaßen berücksichtigen.

Fazit

Die Digitalisierung der Landwirtschaft birgt Potenziale, aber auch eine Notwendigkeit zu ihrer Gestaltung. Während einige digitale Technologien eine Antwort auf zentrale Herausforderungen des Landwirtschaftssektors liefern könnten, klafft zwischen dieser theoretischen Chance und der bisherigen praktischen Umsetzung eine große Lücke. Die Potenziale der Digitalisierung für eine ökologische Landwirtschaft werden tendenziell vernachlässigt und voraussichtlich ungenutzt bleiben, weil sie noch zu teuer und nicht rentabel sind. Außerdem ergeben sich aus der Digitalisierung wiederum neue, andersgelagerte Herausforderungen und Risiken. Technologische Entwicklungen wie Präzisionslandwirtschaft, Smart Farming und Landwirtschaft 4.0 sind daher als Werkzeuge zu verstehen, die helfen können, biodiversitätsfördernde Ansätze zu verbreiten. Sie tragen jedoch wenig dazu bei, industriell geprägte Landwirtschaftssysteme grundlegend zu transformieren und können eine größere agrarökologische Transformation gar hemmen. Eine strategische staatliche Lenkung der digitalen Transformation der Landwirtschaft zur Nutzung vielversprechender Potenziale mit Anreizen und Eindämmung potenzieller Risiken ist daher notwendig.

8 Literaturverzeichnis

- Abbasi, M., Yaghmaee, M. H., & Rahnama, F. (2019a). Internet of Things in agriculture: A survey. *2019 3rd International Conference on Internet of Things and Applications (IoT)*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/IICITA.2019.8808839>
- Abbasi, M., Yaghmaee, M. H., & Rahnama, F. (2019b). Internet of Things in agriculture: A survey. *2019 3rd International Conference on Internet of Things and Applications (IoT)*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/IICITA.2019.8808839>
- Achtziger, R., Richert, E., Köstner, B., & Nigmann, U. (2021). *Biodiversität in Weinbergen*. BIODIVina. https://tu-freiberg.de/sites/default/files/media/institut-fuer-biowissenschaften-10447/ag_biologie/BIODIVINA/BM2/BM2_BD/biodivina_praesentation_biodiversitaet_weinberge.pdf
- Adão, T., Hruška, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., & Sousa, J. (2017). Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry. *Remote Sensing*, 9(11), 1110. <https://doi.org/10.3390/rs9111110>
- AgrarBündnis e.V. (2019). *Der kritischen Agrarbericht 2019—Schwerpunkt: Landwirtschaft für Europa*. ABL Verlag. <https://www.kritischer-agrarbericht.de/2019.393.0.html>
- AgrarBündnis e.V. (2020). *Digitalisierung als Chance für eine nachhaltige Landwirtschaft?! Diskussionspapier*. https://www.agrarbuendnis.de/fileadmin/Daten_AB/Projekt_Digitalisierung/Diskussionspapier_AgrarBuendnis_Digitalisierung_2020-05.pdf
- Ahirwar, S., Swarnkar, R., Bhukya, S., & Namwade, G. (2019). Application of Drone in Agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(01), 2500–2505. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.801.264>
- Alshihabi, O., Piiki, K., & Söderström, M. (2020). *CropSAT – A Decision Support System for Practical Use of Satellite Images in Precision Agriculture*. <https://www.springerprofessional.de/cropsat-a-decision-support-system-for-practical-use-of-satellite/18243884>
- Al-Thani, N., Albuainain, A., Alnaimi, F., & Zorba, N. (2020). *Drones for Sheep Livestock Monitoring*. 672–676.
- Altieri, M. (1995). *Agroecology: The science of sustainable agriculture*. Westview Press.
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., & Montalba, R. (2017). Technological approaches to sustainable agriculture at a crossroads: An agroecological perspective. *Sustainability*, 9(3), 349.
- Anderson, D. M., Estell, R. E., Holechek, J. L., Ivey, S., & Smith, G. B. (2014). Virtual herding for flexible livestock management—a review. *The Rangeland Journal*, 36(3), 205–221. <https://doi.org/10.1071/RJ13092>
- Arakeri, Megha. P., Vijaya Kumar, B. P., Barsaiya, S., & Sairam, H. V. (2017). Computer vision based robotic weed control system for precision agriculture. *2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 1201–1205. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2017.8126005>
- Araújo, S. O., Peres, R. S., Barata, J., Lidon, F., & Ramalho, J. C. (2021). Characterising the Agriculture 4.0 Landscape—Emerging Trends, Challenges and Opportunities. *Agronomy*, 11(4), 1–37. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040667>
- Artmann, W. (2021). Drohne hilft bei Rehkitz-Rettung. *Mittelbayerische*. <https://www.mittelbayerische.de/region/schwandorf-nachrichten/drohne-hilft-bei-rehkitz-rettung-21416-art2009234.html>
- Arvantis, K. G., & Symeonaki, E. G. (2020). Agriculture 4.0: The role of innovative smart technologies towards sustainable farm management. *The Open Agriculture Journal*, 14(1). <https://doi.org/10.2174/1874331502014010130>
- Bahrs, E. (2018). Exemplarische betriebswirtschaftliche Auswirkungen der Digitalisierung in der Landwirtschaft und im Agribusiness. *H. Wilhelm Schaumann Stiftung (Hrsg.)*, 27, 161–166.
- Baker, I., Barry, S., Darragh, L., Darnell, R., George, A., Heath, R., Jakku, E., Laurie, A., Lamb, D., Llewellyn, R., Perrett, E., Sanderson, J., Skinner, A., Stollery, T., Wiseman, L., Wood, G., Zhang, A., & Cotton Research & Development Corporation (Australia). (2017). *Accelerating precision agriculture to decision agriculture: Enabling digital agriculture in Australia*. (E. Leonard, R. Rainbow, & J. Trindall, Hrsg.).
- Baldwin, C. Y., Woodard, C. J., & Gawer, A. (2009). The architecture of platforms: A unified view. In *Platforms, markets and innovation* (Bd. 32). Edward Elgar Cheltenham. https://ink.library.smu.edu.sg/cgi/viewcontent.cgi?article=3451&context=sis_research

- Ball-Damerow, J. E., Brenskelle, L., Barve, N., Soltis, P. S., Sierwald, P., Bieler, R., LaFrance, R., Ariño, A. H., & Guralnick, R. P. (2019). Research applications of primary biodiversity databases in the digital age. *PLOS ONE*, *14*(9), e0215794. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215794>
- Balogh, J. M., & Jámor, A. (2020). The Environmental Impacts of Agricultural Trade: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, *12*(3), 1152. <https://doi.org/10.3390/su12031152>
- Balzer, F., & Schulz, D. (2015). Umweltbelastende Stoffeinträge aus der Landwirtschaft–Möglichkeiten und Maßnahmen zu ihrer Minderung in der konventionellen Landwirtschaft und im ökologischen Landbau. *UBA-Hintergrund, März*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/umweltbelastende_stoffeintraege_aus_der_landwirtschaft_1.pdf
- BaoJie, L., ShaoHua, W., ShengLu, Z., Teng, W., & Hao, C. (2017). Quantifying and mapping threats to soil biodiversity in Nanjing, China. *European Journal of Soil Biology*, *82*, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.08.007>
- Bartels, N., Dörr, J., Fehrmann, J., & Gennen, K. (2020). *Machbarkeitsstudie zu staatlichen digitalen Daten- plattformen für die Landwirtschaft*. Fraunhofer IESE. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Digitalisierung/machbarkeitsstudie-agrardatenplattform.pdf;jsessionid=FC6B8CA40DF90D4E4B2D6C2BC5859D34.live832?__blob=publicationFile&v=3
- Baruah, S., & Dutta, J. (2009). Nanotechnology applications in pollution sensing and degradation in agriculture: A review. *Environmental Chemistry Letters*, *7*(3), 191–204. <https://doi.org/10.1007/s10311-009-0228-8>
- Baudry, J., Bunce, R., & Burel, F. (2000). Hedgerows: An international perspective on their origin, function and management. *Journal of environmental management*, *60*(1), 7–22. <https://doi.org/10.1006/jema.2000.0358>
- Bawden, O., Kulk, J., Russell, R., McCool, C., English, A., Dayoub, F., Lehnert, C., & Perez, T. (2017). Robot for weed species plant-specific management. *Journal of Field Robotics*, *34*(6), 1179–1199. <https://doi.org/10.1002/rob.21727>
- Beierkuhnlein, C. (2003). Der Begriff Biodiversität. In *Biodiversität und Landschaftsnutzung in Mitteleuropa* (Bd. 87, S. 51,71). Nova Acta Leopoldina NF. http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/peer/en/pub/pub/48266/beierkuhnlein2003_der_begriff_biodiversitaet.pdf
- Bellon Maurel, V., & Huyghe, C. (2017). Putting agricultural equipment and digital technologies at the cutting edge of agroecology. *OCL*, *24*(3), D307. <https://doi.org/10.1051/ocl/2017028>
- Bendel, O. (2019, März 15). *Definition: Drohne* [Text]. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/drohne-54115/version-369942>
- Benning, R. (2020). Die Macht der Algorithmen Vorschläge zum Umgang mit Big Data in der Landwirtschaft. In *Der kritische Agrarbericht 2020* (S. 79–83). Agrarbündnis e.V.
- Best, D. (2020). *Die Digitalisierung der Landwirtschaft*. <https://doi.org/10.14361/9783839449905-009>
- Biber, P., Weiss, U., Dorna, M., & Albert, A. (2012). *Navigation system of the autonomous agricultural robot Bonirob*. <https://www.cs.cmu.edu/~mberger/agrobotics2012/01biber.pdf>
- Bieber, M. (2016). *Ausgewählte ökonomische Effekte von Satellitenortungssystemen im Ackerbau. Masterthesis im Studiengang Agrarwirtschaft*. Hochschule Neubrandenburg.
- BMEL. (2018). *Digitalisierung in der Landwirtschaft*. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. https://www.bmel.de/Shared-Docs/Downloads/DE/Broschueren/digitalpolitik-landwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- Bogue, R. (2017). Sensors key to advances in precision agriculture. *Sensor Review*, *37*(1), 1–6. <https://doi.org/10.1108/SR-10-2016-0215>
- Bohner, A., Gehmacher, P., Bodner, G., & Strauss, P. (2017). Bodenverdichtung im Dauergrünland und ihre Auswirkung auf die Grünlandvegetation. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, *68*(2), 113–129. <https://doi.org/10.1515/boku-2017-0011>
- Bovensiepen, G., Hombach, R., & Raimund, S. (2016). *Quo vadis, agricola? Smart Farming: Nachhaltigkeit und Effizienz durch den Einsatz digitaler Technologien*. pwc. <https://www.pwc.de/de/handel-und-konsumguter/assets/smart-farming-studie-2016.pdf>
- Bowker, G. C. (2000). Biodiversity Datadiversity. *Social Studies of Science*, *30*(5), 643–683. <https://doi.org/10.1177/030631200030005001>
- Buddha, K., Nelson, H. J., Zermas, D., & Papanikolopoulos, N. (2019). Weed Detection and Classification in High Altitude Aerial Images for Robot-Based Precision Agriculture. *2019 27th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 280–285. <https://doi.org/10.1109/MED.2019.8798582>

- BUND. (2019). *Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Landwirtschaft*. Bund für Umwelt- und Naturschutz Deutschland. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/landwirtschaft/bak_landwirtschaft_diskussionspapier_digitalisierung.pdf
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (2021). *Digitalisierung in der Landwirtschaft: Chancen nutzen—Risiken minimieren*. <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/digitalpolitik-landwirtschaft.html;jsessionid=D4161A4E778C92E2850869B39EBE3DC5.live832>
- Busch, C. (2021). Regulierung Digitaler Plattformen als Infrastrukturen der Daseinsvorsorge. *WISO Diskurs*, 04, 1–31.
- Busch, G., Schütz, A., Bayer, E., & Spiller, A. (2021). Veränderungen des Einkaufsverhaltens bei Lebensmitteln während der Corona-Pandemie. 41. *GIL-Jahrestagung, Informations- und Kommunikationstechnologie in kritischen Zeiten*.
- Campbell, B. M., Thornton, P., Zougmore, R., Van Asten, P., & Lipper, L. (2014). Sustainable intensification: What is its role in climate smart agriculture? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, 39–43. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.07.002>
- Chemnitz, C., Luig, B., Rehmer, C., Benning, R., & Wiggerthale, M. (2017). Konzernatlas. *Daten und Fakten über die Agrar- und Lebensmittelindustrie 2017*, 2.
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., & Von Maltitz, G. (2018). *World atlas of desertification: Rethinking land degradation and sustainable land management*. Publications Office of the European Union.
- Çilek, A., Berberoğlu, S., Akça, E., Dönmez, C., Erdoğan, M. A., Kapur, B., & Kapur, S. (2020). Soil Degradation: Global Assessment. In *Managing Soils and Terrestrial Systems* (S. 217–234). CRC Press.
- Crall, A. W., Newman, G. J., Stohlgren, T. J., Holfelder, K. A., Graham, J., & Waller, D. M. (2011). Assessing citizen science data quality: An invasive species case study: Assessing citizen science data quality. *Conservation Letters*, 4(6), 433–442. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2011.00196.x>
- DAFA. (2019). *DAFA Strategisches Forum 2019 Synopsis*. <https://www.dafa.de/wp-content/uploads/DAFA-SF19-3-Synopse.pdf>
- de Oliveira, M. E., & Corrêa, C. G. (2020). *Virtual Reality and Augmented reality applications in agriculture: A literature review*. 1–9. <https://doi.org/10.1109/SVR51698.2020.00017>
- Debeljak, M., Trajanov, A., Kuzmanovski, V., Schröder, J., Sandén, T., Spiegel, H., Wall, D. P., Van de Broek, M., Rutgers, M., Bampa, F., Creamer, R. E., & Henriksen, C. B. (2019). A Field-Scale Decision Support System for Assessment and Management of Soil Functions. *Frontiers in Environmental Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00115>
- Dickinson, J. L., Zuckerman, B., & Bonter, D. N. (2010). Citizen Science as an Ecological Research Tool: Challenges and Benefits. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 41(1), 149–172. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144636>
- Dietzel, S., Sauter, F., Moosner, M., Fischer, C., & Kollmann, J. (2019). Blühstreifen und Blühflächen in der landwirtschaftlichen Praxis—Eine naturschutzfachliche Evaluation. *Anliegen Natur*, 41, 73–86.
- Dixon, A. P., Baker, M. E., & Ellis, E. C. (2020). Agricultural landscape composition linked with acoustic measures of avian diversity. *Land*, 9(5), 145. <https://doi.org/10.3390/land9050145>
- Dorigo, W. A., Zurita-Milla, R., de Wit, A. J. W., Brazile, J., Singh, R., & Schaepman, M. E. (2007). A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9(2), 165–193. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.05.003>
- Dörr, O. (2014). Die Anforderungen an ein zukunftsfähiges Infrastrukturrecht. *Veröffentlichungen der Vereinigung Deutscher Staatsrechtslehrer*, 73, 232–367.
- Dransch, D., Kyba, C. C. M., Schröter, K., Yang, B., Schorlemmer, D., Barz, B., & Denzler, J. (2018). Citizen Science—Gemeinsam Wissen schaffen [PDF]. *System Erde*; 8, 500 kB. <https://doi.org/10.2312/GFZ.SYSERDE.08.01.7>
- Drenckhahn, D., Arnet, A., Filser, J., Haberl, H., Hansjürgens, B., Herrmann, B., Homeier, J., Leuschner, C., Mosbrugger, V., Reusch, T., Schäffer, A., Scherer-Lorenzen, M., & Tockner, K. (2020). *Globale Biodiversität in der Krise—Was können Deutschland und die EU dagegen tun? Bd. Nr. 24* (Stand: Mai 2020). Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. - Nationale Akademie der Wissenschaften.
- Drewel, M. M., Gausemeier, J., & Kluge, A. (2017). *Erfolgsgarant digitale Plattform – Vorreiter Landwirtschaft*. Wissenschafts- und IndustrieForum. https://www.researchgate.net/profile/Marvin_Drewel/publication/329626636_Erfolgsgarant_digitale_Plattform_-_Vorreiter_Landwirtschaft/links/5d1db21d92851cf440631a56/Erfolgsgarant-digitale-Plattform-Vorreiter-Landwirtschaft.pdf

- Drücker, H. (2018). *Sensoren für die variable Stickstoffdüngung—Funktionsprinzipien und Marktübersicht*, *Landtechnik: Landwirtschaftskammer Niedersachsen*. <https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/348/article/33577.html>
- El Bilali, H., & Allahyari, M. S. (2018). Transition towards sustainability in agriculture and food systems: Role of information and communication technologies. *Information Processing in Agriculture*, 5(4), 456–464. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.06.006>
- Elsen, S. (2014). Genossenschaften als transformative Kräfte auf dem Weg in die Postwachstumsgesellschaft. In *Genossenschaften und Klimaschutz* (S. 31–47). Springer.
- Erdle, K., Mistele, B., & Schmidhalter, U. (2011). Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. *Field Crops Research*, 124(1), 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.007>
- Erol, S., & Schulten, T. (2020). *Neuordnung der Arbeitsbeziehungen in der Fleischindustrie: Das Ende der „organisierten Verantwortungslosigkeit“?* WSI Report. https://www.boeckler.de/de/faust-detail.htm?sync_id=HBS-007924
- Espelt, R., & Moreira, S. (2019). The role of digital platforms in agroecology food consumption collaboration. A comparison between Porto and Barcelona. *Sharing Society*, 44.
- Europäische Kommission. (2019). *Der europäische Grüne Deal: Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen*. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF
- Europäische Kommission. (2020a). *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Eine europäische Datenstrategie*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0066&from=DE>
- Europäische Kommission. (2020b). *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Gestaltung der digitalen Zukunft Europas*. https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/communication-shaping-europes-digital-future-feb2020_de_0.pdf
- Europäische Kommission. (2020c). *EU-Biodiversitätsstrategie für 2030: Mehr Raum für die Natur in unserem Leben: Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen*. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:a3c806a6-9ab3-11ea-9d2d-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF
- Europäische Kommission. (2020d). *„Vom Hof auf den Tisch“—Eine Strategie für ein faires, gesundes und umweltfreundliches Lebensmittelsystem: Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen*. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ea0f9f73-9ab2-11ea-9d2d-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF
- European Environment Agency. (2020). *State of nature in the EU — Results from reporting under the nature directives 2013-2018*. <https://www.eea.europa.eu/publications/state-of-nature-in-the-eu-2020>
- Eveleigh, A., Jennett, C., Blandford, A., Brohan, P., & Cox, A. L. (2014). Designing for dabblers and deterring drop-outs in citizen science. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2985–2994. <https://doi.org/10.1145/2556288.2557262>
- FAO. (2010). *Climate-Smart Agriculture. Policies, Practices and Financing for Food Security, Adaptation and Mitigation*. FAO.
- Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment. *Annual Review of Resource Economics*, 11(1), 313–335. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929>
- Finke, P. (2014). *Citizen science* (Deutsche Erstausgabe). Oekom-Verlag.
- Finlayson, C. M., D’Cruz, R., & Davidson, N. (2005). *Millenium ecosystem assessment: Ecosystems and human well-being // Ecosystems and human well-being*. World Resources Institute. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordid=xf2006408644>
- Fiorese, G., & Guariso, G. (2010). A GIS-based approach to evaluate biomass potential from energy crops at regional scale. *Environmental Modelling & Software*, 25(6), 702–711. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.11.008>
- Fischer, M. C., Pärli, R., Gugerli, F., Holderegger, R., Lieberherr, E., & Widmer, A. (2020). *Machbarkeitsstudie zur Untersuchung des Zustands und der Veränderung der genetischen Vielfalt: Vernetzung, Inzucht und Anpassungsfähigkeit*. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000453093>
- F.R.A.N.Z. Projekt. (2020). *Naturschutzmaßnahmen*. <https://www.franz-projekt.de/massnahmen>
- Fraser, A. (2019). Land grab/data grab: Precision agriculture and its new horizons. *The Journal of Peasant Studies*, 46(5), 893–912. <https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1415887>

- Fromhold-Eisebith, M., Grote, U., Matthies, E., Messner, D., & Pittel, K. (2019). Unsere gemeinsame digitale Zukunft. *Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen*.
- Fuchs, C., Gütschow, P., Langosch, R., Skau, K., & Thierbächer, L. (2021). Verbesserung der Klimabilanzen landwirtschaftlicher Betriebe und der Beitrag der Digitalisierung. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 58, 83–101.
- Gaus, C.-C., Minßen, T.-F., Urso, L.-M., de Witte, T., & Wegener, J. (2017). *Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen*. Thünen-Institut, Technische Universität Braunschweig, Julius Kühn-Institut. <http://orgprints.org/32438/>
- Gawer, A. (2014). Bridging differing perspectives on technological platforms: Toward an integrative framework. *Research policy*, 43(7), 1239–1249. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2014.03.006>
- Gehrke, K. (2021). *Drohne rettet bei Dargun Rehkitze vor Mähmaschinen*. <https://www.nordkurier.de/mecklenburgische-schweiz/drohne-rettet-bei-dargun-rehkitze-vor-maehmaschinen-0343770206.html>
- GeoBox. (2020). *GeoBox-Infrastruktur. Projekt zur betrieblichen Datenhaltung und regionalen Vernetzung in der Landwirtschaft*. <http://geobox-infrastruktur.de>
- Godfray, H. C. J., & Garnett, T. (2014). Food security and sustainable intensification. *Philosophical transactions of the Royal Society B: biological sciences*, 369(1639), 20120273. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0273>
- Goller, M., Caruso, C., Berisha-Gawłowski, A., & Harteis, C. (2020). Digitalisierung in der Landwirtschaft: Gründe, Optionen und Bewertungen aus Perspektive von Milchviehlandwirtinnen und-landwirten. In *Digitalisierung am Übergang Schule Beruf* (S. 53–80).
- Gottwald, F., & Stein-Bachinger, K. (2015). *Landwirtschaft für Artenvielfalt. Ein Naturschutzstandard für ökologisch bewirtschaftete Betriebe*. WWF. https://www.zalf.de/de/forschung_lehre/publikationen/Documents/oekolandbau/handbuecher/WWF_Handbuch%20Landwirtschaft%20Artenvielfalt.pdf
- Gräff, A., Misthilger, B., Dörfler, R. L., & Bernhardt, H. (2016). Auswirkungen eines Systemausfalls in automatisierten Melksystemen auf das Tierwohl. *Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft 2016*.
- Griepentrog, H. W., Frank, M., & Bahrs, E. (2020). Digitale Wertschöpfungsketten für eine nachhaltige kleinstrukturierte Landwirtschaft—DiWenkLa. 40. *GIL-Jahrestagung, Digitalisierung für Mensch, Umwelt und Tier*. 40. GIL-Jahrestagung, Digitalisierung für Mensch, Umwelt und Tier, Bonn.
- Gröger, M. (2010). Das Gesetz vom Minimum. Liebig oder Sprengel? *Chemie in unserer Zeit*, 44. <https://doi.org/10.1002/ciuz.201000533>
- Groher, T., Heitkämper, K., & Umstätter, C. (2020). Digital technology adoption in livestock production with a special focus on ruminant farming. *Animal*, 14(11), 2404–2413. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001391>
- Große Wortmann, R. (2019). *Digitalisierung in der internationalen Landwirtschaft unter Beachtung der Chancen und Risiken*. Hochschule Anhalt. <https://opendata.uni-halle.de/bitstream/1981185920/14199/1/Masterarbeit%20Ralff%20Große%20Wortmann.pdf>
- Gutierrez, M. A., Moreno, R. A., & Rebelo, M. S. (2017). Chapter 3—Information and Communication Technologies and Global Health Challenges. In H. de F. Marin, E. Massad, M. A. Gutierrez, R. J. Rodrigues, & D. Sigulem (Hrsg.), *Global Health Informatics* (S. 50–93). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804591-6.00004-5>
- Haefeker, W. (2019). *Die Europäische Agrarpolitik aus der Bienenperspektive* (B. Engler, S. Zikeli, M. Hasselmann, & P. Rosenkranz, Hrsg.; S. 34–43). logo Print GmbH.
- Haller, L., Moakes, S., Niggli, U., Riedel, J., Stolze, M., & Thompson, M. (2020). *Entwicklungsperspektiven der ökologischen Landwirtschaft in Deutschland* [Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes]. UBA Texte.
- Handelsverband Deutschland. (2020). *Handelsreport Lebensmittel. Corona-Update 2020*. <https://einzelhandel.de/component/attachments/download/10492>
- Hedenus, F., Wirsenius, S., & Johansson, D. J. (2014). The importance of reduced meat and dairy consumption for meeting stringent climate change targets. *Climatic change*, 124(1), 79–91. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1104-5>
- Hedin, B., Katzeff, C., Eriksson, E., & Pargman, D. (2019). A systematic review of digital behaviour change interventions for more sustainable food consumption. *Sustainability*, 11(9), 2638. <https://doi.org/10.3390/su11092638>
- Hennig, S. (2020). Motivation and Its Consideration in Participatory Spatial Data Contribution. *The Professional Geographer*, 72(2), 238–252. <https://doi.org/10.1080/00330124.2019.1676799>

- Hirschfeld, J., Weiß, J., Preidl, M., & Korbun, T. (2008). *Klimawirkungen der Landwirtschaft in Deutschland*. IÖW. https://www.ioew.de/uploads/tx_ukioewdb/IOEW-SR_186_Klimawirkungen_Landwirtschaft_02.pdf
- Horstmann, J. (2020). Digitalisierung und Vernetzung—Landwirtschaft im Wandel. *Jahrbuch Agrartechnik 2019, Band 31*, 31.
- Hou, B., Wu, L., Chen, X., Zhu, D., Ying, R., & Tsai, F.-S. (2019). Consumers' Willingness to Pay for Foods with Traceability Information: Ex-Ante Quality Assurance or Ex-Post Traceability? *Sustainability*, *11*(5), 1464. <https://doi.org/10.3390/su11051464>
- Huchtemann, J.-P., Theuvsen, L., Borchard, K., Hofacker, C., Loy, J., Schwerdtfeger, R., Sundermeier, H., Floto, H., & Theuvsen, B. (2020). Startups im Agribusiness-Marktplätze als Geschäftsmodell und deren Anwendung in der deutschen Landwirtschaft. *Entrepreneurship und Vertriebsmanagement im Agribusiness*, 28.
- Hußmann, S. (2021). *Roboterassistierte Unkrautregulierung im Bio Möhrenanbau*. <https://www.asg-goe.de/FT2021/FT-2021-06---Hu%C3%9Fmann-Stephan---Roboterassistierte-Unkrautregulierung.pdf>
- INKOTA. (2020). *Positionspapier Landwirtschaft 4.0. Politische Leitplanken für eine sozial gerechte und ökologisch verträgliche digitale Landwirtschaft*. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/landwirtschaft/landwirtschaft_positionspapier_digitale_landwirtschaft.pdf
- Innovationsinitiative Landwirtschaft 4.0. (2016). *Positionspapier der Innovationsinitiative Landwirtschaft 4.0*. Innovationsinitiative des Leibniz-Forschungsverbands „Nachhaltige Lebensmittelproduktion & gesunde Ernährung“. https://www.leibniz-lebensmittel-und-ernaehrung.de/fileadmin/user_upload/Ernaehrung/Presse/Positionspapier_Landwirtschaft_4.0_Final2.pdf
- IPBES. (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. <https://ec.europa.eu/environment/nature/pdf/Summary%20for%20Policymakers%20IPBES%20Global%20Assessment.pdf>
- Johnson, N. C., Gehring, C., & Jansa, J. (Hrsg.). (2017). *Mycorrhizal mediation of soil*. Elsevier.
- Jones, H. G. (2020). What plant is that? Tests of automated image recognition apps for plant identification on plants from the British flora. *AoB PLANTS*, *12*(6), plaa052. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plaa052>
- Kamilaris, A., Fonts, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2019). The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. *Trends in Food Science & Technology*, *91*, 640–652.
- Karp, D. (2020). Detecting small and cryptic animals by combining thermography and a wildlife detection dog. *Scientific Reports*, *10*(1), 5220. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61594-y>
- Keogh, M., & Henry, M. (2016). *The implications of digital agriculture and big data for Australian agriculture*. Australian Farm Institute. https://www.crdc.com.au/sites/default/files/pdf/Big_Data_Report_web.pdf
- Kerkech, M., Hafiane, A., & Canals, R. (2020). Vine disease detection in UAV multispectral images using optimized image registration and deep learning segmentation approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, *174*, 105446. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105446>
- Kiat, P. E., Malek, M. A., & Shamsuddin, S. M. (2019). Artificial intelligence projection model for methane emission from livestock in Sarawak. *Sains Malaysiana*, *48*(7), 1325–1332. <https://doi.org/10.17576/jsm-2019-4807-02>
- Kim, W. S., Lee, W. S., & Kim, Y. J. (2020). A Review of the Applications of the Internet of Things (IoT) for Agricultural Automation. *Journal of Biosystems Engineering*, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s42853-020-00078-3>
- King, A. (2017). Technology: The future of agriculture. *Nature*, *544*(7651), S21–S23. <https://doi.org/10.1038/544S21a>
- King, T., Osmond-McLeod, M. J., & Duffy, L. L. (2018). Nanotechnology in the food sector and potential applications for the poultry industry. *Trends in food science & technology*, *72*, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.015>
- Kliem, L., & George, K. (2018). *Von Starkregen bis Trockenheit – Anpassungsstrategien für die deutsche Landwirtschaft* (S. 26). Umweltbundesamt. https://www.ioew.de/publikation/von_starkregen_bis_trockenheit
- KLW. (2019). *Landwirtschaft quo vadis?* Kommission Landwirtschaft beim Umweltbundesamt.
- Knierim, A., Kernecker, M., Erdle, K., Kraus, T., Borges, F., & Wurbs, A. (2019). Smart farming technology innovations – Insights and reflections from the German Smart-AKIS hub. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91, 100314. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100314>

- Kolbe, H., Meyer, D., & Schmidtke, K. (2021). Schlaggenaue Analyse von 32 Betrieben des ökologischen Landbaus im Freistaat Sachsen: Fruchtfolgegestaltung. *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*. <https://doi.org/10.12767/buel.v99i1.316>
- Konzernmacht beschränken. (2018). *#Konzernmacht in der digitalen Welt* [Diskussionspapier].
- Kosmala, M., Wiggins, A., Swanson, A., & Simmons, B. (2016). Assessing data quality in citizen science. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(10), 551–560. <https://doi.org/10.1002/fee.1436>
- Krebs, J., & Bach, S. (2018). Permaculture—Scientific evidence of principles for the agroecological design of farming systems. *Sustainability*, 10(9), 3218.
- Kuhwald, M., Saggau, P., & Augustin, K. (2020). Konflikte um Flächennutzung und Bodenfunktionen in Agrarlandschaften. In R. Duttmann, O. Kühne, & F. Weber (Hrsg.), *Landschaft als Prozess* (S. 657–688). Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-30934-3_31
- Lameski, P., Zdravevski, E., & Kulakov, A. (2018). Review of Automated Weed Control Approaches: An Environmental Impact Perspective. In S. Kalajdziski & N. Ackovska (Hrsg.), *ICT Innovations 2018. Engineering and Life Sciences* (S. 132–147). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00825-3_12
- Lampkin, N., Pearce, B., Leake, A., Creissen, H., Gerrard, C. L., Gerling, R., Lloyd, S., Padel, S., Smith, J., & Smith, L. (2015). *The role of agroecology in sustainable intensification* [Report for the Land Use Policy Group]. Organic Research Centre, Elm Farm and Game & Wildlife Conservation Trust. <http://publications.naturalengland.org.uk/publication/6746975937495040>
- Li, H., & Zhao, J. (2018). Rebound effects of new irrigation technologies: The role of water rights. *American Journal of Agricultural Economics*, 100(3), 786–808. <https://doi.org/10.1093/ajae/aay001>
- Li, S., Ding, X., Kuang, Q., Ata-Ul-Karim, S. T., Cheng, T., Liu, X., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., & Cao, Q. (2018). Potential of UAV-Based Active Sensing for Monitoring Rice Leaf Nitrogen Status. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01834>
- Librán-Embid, F., Klaus, F., Tschartke, T., & Grass, I. (2020). Unmanned aerial vehicles for biodiversity-friendly agricultural landscapes—A systematic review. *Science of The Total Environment*, 732, 139204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139204>
- Linsner, S., Kuntke, F., Schmidbauer-Wolf, G. M., & Reuter, C. (2019). Blockchain in agriculture 4.0-An empirical study on farmers expectations towards distributed services based on distributed ledger technology. In *Proceedings of Mensch und Computer 2019* (S. 103–113).
- Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B. M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., Caron, P., Cattaneo, A., Garrity, D., Henry, K., Hottle, R., Jackson, L., Jarvis, A., Kossam, F., Mann, W., McCarthy, N., Meybeck, A., Neufeldt, H., Remington, T., ... Torquebiau, E. F. (2014). Climate-smart agriculture for food security. *Nature Climate Change*, 4(12), 1068–1072. <https://doi.org/10.1038/nclimate2437>
- Liu, X., Lyu, S., Sun, D., Bradshaw, C. J. A., & Zhou, S. (2017). Species decline under nitrogen fertilization increases community-level competence of fungal diseases. *Proceedings. Biological Sciences*, 284(1847). <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.2621>
- Lukat, E., & Naumann, S. (2016). Nährstoffkreisläufe in der Landwirtschaft schließen. *Ökologisches Wirtschaften-Fachzeitschrift*, 31(2), 40–44. <https://doi.org/10.14512/OEW310240>
- Lundström, C., & Lindblom, J. (2018). Considering farmers' situated knowledge of using agricultural decision support systems (AgriDSS) to Foster farming practices: The case of CropSAT. *Agricultural Systems*, 159, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.10.004>
- Lutz, K. J. (2017). Digitalisierung der Landwirtschaft: Revolution mit evolutionärem Charakter. In A. Hildebrandt & W. Landhäußer (Hrsg.), *CSR und Digitalisierung* (S. 429–442). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53202-7_31
- Majaura, M. (2016). *Effektivität von Agrarumweltprogrammen zum Schutz der biologischen Vielfalt unter dem Einfluss des Klimawandels* (H. Korn & K. Bockmühl, Hrsg.).
- Männel, M., Bernhard, C., & Haberlah-Korr, V. (2020). *UFOP :: UFOP-Leitlinie zum integrierten Pflanzenschutz bei Ackerbohne, Körnererbse, Sojabohne und Süßlupinen im Bundesanzeiger veröffentlicht*. <https://www.ufop.de/presse/aktuelle-pressemitteilungen/ufop-leitlinie-zum-integrierten-pflanzenschutz-bei-ackerbohne-koernererbse-sojabohne-und-suesslupinen-im-bundesanzeiger-veroeffe/>

- Maskell, L. C., Botham, M., Henrys, P., Jarvis, S., Maxwell, D., Robinson, D. A., Rowland, C. S., Siriwardena, G., Smart, S., Skates, J., Tebbs, E. J., Tordoff, G. M., & Emmett, B. A. (2019). Exploring relationships between land use intensity, habitat heterogeneity and biodiversity to identify and monitor areas of High Nature Value farming. *Biological Conservation*, 231, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.12.033>
- Mathanker, S. K., Weckler, P. R., Taylor, R. K., & Fan, G. (2010). Adaboost and Support Vector Machine Classifiers for Automatic Weed Control: Canola and Wheat. *ASABE Annual International Meeting*.
- McCarthy, N., Lipper, L., & Branca, G. (2011). Climate-smart agriculture: Smallholder adoption and implications for climate change adaptation and mitigation. *Mitigation of Climate Change in Agriculture Working Paper*, 3(1), 1–37.
- Meena, N., Sahni, Y., Thakur, D., & Singh, R. (2018). Applications of nanotechnology in veterinary therapeutics. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6(2), 167–175. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3913-y>
- Mehra, M., Saxena, S., Sankaranarayanan, S., Tom, R. J., & Veeramanikandan, M. (2018). IoT based hydroponics system using Deep Neural Networks. *Computers and electronics in agriculture*, 155, 473–486. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.015>
- Mekala, M. S., & Viswanathan, P. (2017a). A Survey: Smart agriculture IoT with cloud computing. *2017 International Conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICMDCS.2017.8211551>
- Mekala, M. S., & Viswanathan, P. (2017b). A Survey: Smart agriculture IoT with cloud computing. *2017 International Conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICMDCS.2017.8211551>
- Moulick, R. G., Das, S., Debnath, N., & Bandyopadhyay, K. (2020). Potential use of nanotechnology in sustainable and 'smart' agriculture: Advancements made in the last decade. *Plant Biotechnology Reports*, 14(5), 505–513. <https://doi.org/10.1007/s11816-020-00636-3>
- Munz, J., Gindele, N., & Doluschitz, R. (2020). Exploring the characteristics and utilisation of Farm Management Information Systems (FMIS) in Germany. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105246. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105246>
- Mutchek, M. A., & Williams, E. D. (2010). Design space characterization for meeting cost and carbon reduction goals: Smart irrigation controllers in the southwestern United States. *Journal of Industrial Ecology*, 14(5), 727–739. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00282.x>
- Nawar, S., Corstanje, R., Halcro, G., Mulla, D., & Mouazen, A. M. (2017). Delineation of soil management zones for variable-rate fertilization: A review. *Advances in agronomy*, 143, 175–245. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.01.003>
- Nerlich, K., Graeff-Hönninger, S., & Claupein, W. (2013). Agroforestry in Europe: A review of the disappearance of traditional systems and development of modern agroforestry practices, with emphasis on experiences in Germany. *Agroforestry Systems*, 87, 475–492. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9560-2>
- Niggli, U., Riedel, J., Brühl, C., Liess, M., Schulz, R., Altenburger, R., Märkländer, B., Bokelmann, W., Heß, J., & Reineke, A. (2020). Pflanzenschutz und Biodiversität in Agrarökosystemen. *Berichte über Landwirtschaft*, 98(1), 1–39.
- Nüssel, M. (2018). Landwirtschaft 4.0—die Waffe gegen Hunger und Umweltzerstörung? In *Digitalisierung im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Recht* (S. 343–363). Springer.
- Obade, V. de P., & Gaya, C. (2021). Digital technology dilemma: On unlocking the soil quality index conundrum. *Bioresources and Bioprocessing*, 8(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40643-020-00359-x>
- Olk, C. (2020, Oktober 24). *Are Platforms Natural Monopolies?* <https://christopher-olk.medium.com/are-platforms-natural-monopolies-dab915b33a3>
- Oxfam. (2016). *Klimasmarte Landwirtschaft – nein danke! Für eine sozial-ökologische Agrarwende statt gefährlicher Scheinlösungen*. <https://www.oxfam.de/system/files/20160608-ngo-positionspapier-climate-smart-agriculture.pdf>
- Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., & Grace, P. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187, 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>
- Pathan, M., Patel, N., Yagnik, H., & Shah, M. (2020). Artificial cognition for applications in smart agriculture: A comprehensive review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 81–95. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2020.06.001>
- Pesce, M., Kirova, M., Soma, K., Bogaardt, M.-J., Poppe, K., Thurston, C., Monfort Belles, C., Wolfert, S., Beers, G., & Urdu, D. (2019). *Research for AGRI Committee—Impacts of the digital economy on the food chain and the CAP*. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2019/629192/IPOL_STU%282019%29629192_EN.pdf

- Petrou, Z. I., Manakos, I., & Stathaki, T. (2015). Remote sensing for biodiversity monitoring: A review of methods for biodiversity indicator extraction and assessment of progress towards international targets. *Biodiversity and Conservation*, 24(10), 2333–2363. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-0947-z>
- Pfeiffer, L., & Lin, C.-Y. C. (2014). Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence. *Journal of Environmental Economics and Management*, 67(2), 189–208. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2013.12.002>
- Pohle, M. (2021). So werden Rehkitze in Redefin vor der Mähmaschine bewahrt. SVZ. <https://www.svz.de/lokales/hagenower-kreisblatt/Neue-Drohne-spuert-zuverlaessig-jedes-Rehkitz-im-Feld-auf-id32449777.html>
- Popli, S., Jha, R. K., & Jain, S. (2018). A survey on energy efficient narrowband internet of things (NBloT): Architecture, application and challenges. *IEEE Access*, 7, 16739–16776. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2881533>
- Poppe, K. J., Wolfert, S., Verdouw, C., & Verwaart, T. (2013). Information and communication technology as a driver for change in agri-food chains. *EuroChoices*, 12(1), 60–65.
- Prause, L., Hackfort, S., & Lindgren, M. (2020). Digitalization and the third food regime. *Agriculture and human values*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10460-020-10161-2>
- Pretty, J., & Bharucha, Z. P. (2014). Sustainable intensification in agricultural systems. *Annals of Botany*, 114(8), 1571–1596. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu205>
- Proença, V., Martin, L. J., Pereira, H. M., Fernandez, M., McRae, L., Belnap, J., Böhm, M., Brummitt, N., García-Moreno, J., Gregory, R. D., Honrado, J. P., Jürgens, N., Opige, M., Schmeller, D. S., Tiago, P., & van Swaay, C. A. M. (2017). Global biodiversity monitoring: From data sources to Essential Biodiversity Variables. *Biological Conservation*, 213, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.07.014>
- Putra, W., Taruna, B., & Peeyush, S. (2018). Enhanced broadband greenness in assessing Chlorophyll a and b, Carotenoid, and Nitrogen in Robusta coffee plantations using a digital camera. *Precision Agriculture*, 19(2), 238–256. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9513-x>
- Reckleben, Y. (2014). *Sensoren für die Stickstoffdüngung—Erfahrungen in 12 Jahren praktischem Einsatz*. <https://doi.org/10.5073/JFK.2014.02.02>
- Redhead, J. W., Oliver, T. H., Woodcock, B. A., & Pywell, R. F. (2020). The influence of landscape composition and configuration on crop yield resilience. *Journal of Applied Ecology*, 57(11), 2180–2190. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13722>
- Rees, R. M., Maire, J., Florence, A., Cowan, N., Skiba, U., Weerden, T. van der, & Ju, X. (2020). Mitigating nitrous oxide emissions from agricultural soils by precision management. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 7(1), 75–80. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019294>
- Reichel, C., Pascher, P., Scholz, R. W., Berger, G., Brunch, R., Strobel-Unbehaun, T., Tölle-Nolting, C., Rogga, S., & Zscheischler, J. (2021). 4.1 Agrarökologische Auswirkungen. In R. W. Scholz, E. Albrecht, D. Marx, M. Mißler-Behr, O. Renn, & V. Van Zyl-Bulitta (Hrsg.), *Supplementarische Informationen zum DiDaT Weißbuch* (S. 156–163). Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG. <https://doi.org/10.5771/9783748912125-SI4-1>
- Reinecke, M. (2015). Gute Arbeit in der Industrie 4.0—aus Sicht der Landtechnik. In *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0* (S. 65–68). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Rhee, J.-Y. (2015). Open farm information system data-exchange platform for interaction with agricultural information systems. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 17(2). <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/3168>
- Riedel, J. (2020). Pflanzenschutz und Biodiversität in Agrarökosystemen. *Berichte über Landwirtschaft*, 98(1). <https://doi.org/10.12767/buel.v98i1.272>
- Rochet, J.-C., & Tirole, J. (2003). Platform competition in two-sided markets. *Journal of the European Economic Association*, 1(4), 990–1029. <https://doi.org/10.1162/154247603322493212>
- Rodrigues, S. M., Demokritou, P., Dokoozlian, N., Hendren, C. O., Karn, B., Mauter, M. S., Sadik, O. A., Safarpour, M., Unrine, J. M., & Viers, J. (2017). Nanotechnology for sustainable food production: Promising opportunities and scientific challenges. *Environmental Science: Nano*, 4(4), 767–781. <https://doi.org/10.1039/C6EN00573J>
- Rohleder, B., & Krüsken, B. (2016). *Digitalisierung in der Landwirtschaft*. BITKOM; Deutscher Bauernverband. <https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/Bitkom-Pressekonferenz-Digitalisierung-in-der-Landwirtschaft-02-11-2016-Praesentation.pdf>

- Rohleder, B., Krüskens, Bernhard, & Reinhardt, H. (2020). *Digitalisierung in der Landwirtschaft 2020*. Bitkom, Deutscher Bauernverband, Rentenbank. https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-04/200427_prasentationpklw_final.pdf
- Rose, D. C., Sutherland, W. J., Parker, C., Lobley, M., Winter, M., Morris, C., Twining, S., Ffoulkes, C., Amano, T., & Dicks, L. V. (2016). Decision support tools for agriculture: Towards effective design and delivery. *Agricultural Systems*, *149*, 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.009>
- Rose, D. C., Wheeler, R., Winter, M., Lobley, M., & Chivers, C.-A. (2021). Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet. *Land Use Policy*, *100*, 104933. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104933>
- Rotz, S., Duncan, E., Small, M., Botschner, J., Dara, R., Mosby, I., Reed, M., & Fraser, E. D. G. (2019). The Politics of Digital Agricultural Technologies: A Preliminary Review. *Sociologia Ruralis*, *59*(2), 203–229. <https://doi.org/10.1111/soru.12233>
- Rumscheidt, S. (2020). Branchen im Fokus: Lebensmitteleinzelhandel. *ifo Schnelldienst*, *73*(05), 62–67.
- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020a). From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy*, *10*(2), 207. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>
- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020b). From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy*, *10*(2), 207. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>
- Santana-Fernández, J., Gómez-Gil, J., & del-Pozo-San-Cirilo, L. (2010). Design and implementation of a GPS guidance system for agricultural tractors using augmented reality technology. *Sensors*, *10*(11), 10435–10447. <https://doi.org/10.3390/s101110435>
- Santarius, T. (2015). *Der Rebound-Effekt: Ökonomische, psychische und soziale Herausforderungen für die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch*. Metropolis-Verlag.
- Scherf, C.-S., & Kampfmeyer, N. (2020). *Ernährung 4.0: Wie nachhaltig sind digitale Plattformen zum Erwerb von Lebensmitteln?* https://www.reggemdigital.de/fileadmin/user_upload/reggemdigital-ap2-kurzpapier-ernaehrung.pdf
- Schieffer, J., & Dillon, C. (2015). The economic and environmental impacts of precision agriculture and interactions with agro-environmental policy. *Precision Agriculture*, *16*(1), 46–61. [https://doi.org/DOI 10.1007/s11119-014-9382-5](https://doi.org/DOI%2010.1007/s11119-014-9382-5)
- Schmidt, C. (2018). Landwirtschaft 4.0 – Digitalisierung als Chance für eine nachhaltige Landwirtschaft. In C. Bär, T. Grädler, & R. Mayr (Hrsg.), *Digitalisierung im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Recht* (S. 397–407). Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55720-4_38
- Schneider, C., & Heinrich, J. (2017). *Der Einfluss unterschiedlicher Agrarsysteme auf Bodendegradation in Lösslandschaften*. Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Göttingen. <https://eprints.dbges.de/1690/>
- Scholz, T. (2016). *Platform cooperativism: Challenging the Corporate Sharing Economy*. Rosa Luxemburg Stiftung.
- Schrader, C. (2017). Drohnen und Naturschutz(recht). *Natur und Recht*, *39*(6), 378–385. <https://doi.org/10.1007/s10357-017-3189-x>
- Schrijver, R., & van Woensel, L. (2016). *Präzisionslandwirtschaft und die Zukunft der Landwirtschaft in Europa*. Wissenschaftlicher Dienst des Europäischen Parlaments. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS_STU\(2016\)581892_DE.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS_STU(2016)581892_DE.pdf)
- Schröder, C., & Walk, H. (2014). Chancen und Grenzen von Genossenschaften als Akteure einer sozial-ökologischen Transformation. In C. Schröder & H. Walk (Hrsg.), *Genossenschaften und Klimaschutz* (Bd. 41, S. 299–306). Springer.
- Schulze Schwing, D. S., & Lemken, D. (2020). *Totally Digital? Adoption of Digital Farm Management Information Systems* (M. Gandorfer, A. Meyer-Aurich, H. Bernhardt, F. X. Maidl, G. Fröhlich, & H. Floto, Hrsg.; S. 295–300).
- Schwing, D. S., & Kunz, W. (2020). Barrieren des Onlinehandels von Futtermitteln. *Berichte über Landwirtschaft-Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*, *98*(3). <https://doi.org/10.12767/buel.v98i3.305>
- Segeher, A. H., & Rosenkranz, E. (2017). *Das große Insektensterben: Was es bedeutet und was wir jetzt tun müssen*. Oekom-Verlag.
- Shah, T. M., Nasika, D. P. B., & Otterpohl, R. (2021). Plant and Weed Identifier Robot as an Agroecological Tool Using Artificial Neural Networks for Image Identification. *Agriculture*, *11*(3), 222. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030222>
- Sharma, R., Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Kumar, V., & Kumar, A. (2020a). A systematic literature review on machine learning applications for sustainable agriculture supply chain performance. *Computers & Operations Research*, 104926.
- Sharma, R., Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Kumar, V., & Kumar, A. (2020b). A systematic literature review on machine learning applications for sustainable agriculture supply chain performance. *Computers & Operations Research*, *119*, 104926. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104926>

- Simon, R., Hochradel, K., Mages, J., Nagy, M., Naucke, A., Niermann, I., Weber, N., & Behr, O. (2015). Methoden akustischer Erfassung der Fledermausaktivität an Windenergieanlagen. In O. Behr, R. Brinkmann, F. Korner-Nievergelt, M. Nagy, I. Niermann, M. Reich, & R. Simon (Hrsg.), *Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen (RENEBAT II. Schriftenreihe Institut für Umweltplanung* (S. 40–79). <https://core.ac.uk/download/pdf/52920048.pdf#page=41>
- Söderström, M., Stadig, H., Martinsson, J., Piiki, K., & Stenberg, M. (2016). CropSAT – A public satellite-based decision support system for variable-rate nitrogen fertilization in Scandinavia. *Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture*. 13th International Conference on Precision Agriculture (ICPA), St. Louis, Missouri, USA. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13250.99520>
- Solari, F., Shanahan, J., Ferguson, R., Schepers, J., & Gitelson, A. (2008). Active Sensor Reflectance Measurements of Corn Nitrogen Status and Yield Potential. *Agronomy Journal*, 100(3), 571–579. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0244>
- Soto Alarcón, J. M., González Gómez, D. X., Rodríguez Juárez, E., & Vázquez Rojas, A. M. (2020). Feminist political ecology and rural women-led cooperatives in Hidalgo, Mexico. *Textual*, 75, 131–155. <https://doi.org/DOI:10.5154/r.textual.2020.75.06>
- Speckle, J., Angermair, W., Brohmeyer, F., Brüggemann, L., Spicker, A., & Pauli, S. A. (2020). *Teilflächenspezifische Düngung als Reaktion auf wachsende gesellschaftliche Anforderungen und als Beitrag zur Entspannung des Widerspruchs zwischen Ökonomie und Ökologie* (M. Gandorfer, A. Meyer-Aurich, H. Bernhardt, F. X. Maidl, G. Fröhlich, & H. Floto, Hrsg.; S. 301–306).
- Spreen, D. (2020). Begriffsdefinition: Was ist gemeint, wenn wir von Biodiversität reden? In D. Spreen & J. Kandarr (Hrsg.), *Biodiversität im Meer und an Land. Vom Wert biologischer Vielfalt* (S. 9–13). <https://doi.org/10.2312/eskp.2020.1.1.1>
- Srnicek, N. (2017). *Platform capitalism*. Polity.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., Vries, W. de, Wit, C. A. de, Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Steward, B., Gai, J., & Tang, L. (2019). The use of agricultural robots in weed management and control. In J. Billingsley (Hrsg.), *Robotics and automation for improving agriculture* (S. 161–186). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2019.0056.13>
- Sullivan, M. J. P., Pearce-Higgins, J. W., Newson, S. E., Scholefield, P., Brereton, T., & Oliver, T. H. (2017). A national-scale model of linear features improves predictions of farmland biodiversity. *Journal of Applied Ecology*, 54(6), 1776–1784. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12912>
- Sundmaeker, H., Verdouw, C., Wolfert, J., & Freire, L. P. (2016). Internet of food and farm 2020. In O. Vermeesan & P. Friess (Hrsg.), *Digitising the industry: Internet of Things Connecting the Physical, Digital and Virtual Worlds* (Bd. 49, S. 129–150). River Publishers.
- Sutton, P. C., Anderson, S. J., Costanza, R., & Kubiszewski, I. (2016). The ecological economics of land degradation: Impacts on ecosystem service values. *Ecological Economics*, 129, 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.06.016>
- Svenfelt, A., & Zapico, J. L. (2016). Sustainable food systems with ICT. *Proceedings of ICT for Sustainability 2016*, 194–201. <https://doi.org/10.2991/ict4s-16.2016.23>
- Tansey, K., Chambers, I., Anstee, A., Denniss, A., & Lamb, A. (2009). Object-oriented classification of very high resolution airborne imagery for the extraction of hedgerows and field margin cover in agricultural areas. *Applied Geography*, 29(2), 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.08.004>
- Techen, A.-K., & Helming, K. (2017). Pressures on soil functions from soil management in Germany. A foresight review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(6), 64. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0473-3>
- Tremblay, N., Wang, Z., Ma, B.-L., Belec, C., & Vigneault, P. (2009). A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. *Precision Agriculture*, 10(2), 145–161. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9080-2>
- Trotter, L., Robinson, T. P., Wardell-Johnson, G., Grigg, A., & Luxton, S. (2018). FIMS: a free and open-source spatial database system for plant observation and mobile data collection. *Phytocoenologia*, 48(4), 393–405.
- Tsolakis, N., Aivazidou, E., & Srai, J. S. (2019). Sensor Applications in Agrifood Systems: Current Trends and Opportunities for Water Stewardship. *Climate*, 7(3), 44. <https://doi.org/10.3390/cli7030044>
- Umweltbundesamt. (2015). *Bodenzustand in Deutschland*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bodenzustand-in-deutschland>

- Umweltbundesamt. (2020, Juli 10). *Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#treibhausgas-emissionen-aus-der-landwirtschaft>
- Umweltbundesamt. (2021a). *Treibhausgas-Emissionen*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>
- Umweltbundesamt. (2021b, Juni 10). *Pflanzenschutzmittelverwendung in der Landwirtschaft*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/pflanzenschutzmittelverwendung-in-der#absatz-von-pflanzenschutzmitteln>
- Vadrevu, K. P., Cardina, J., Hitzhusen, F., Bayoh, I., Moore, R., Parker, J., Stinner, B., Stinner, D., & Hoy, C. (2008). Case Study of an Integrated Framework for Quantifying Agroecosystem Health. *Ecosystems*, 11(2), 283–306. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9122-z>
- van Bevern, C. (2021). Mit Drohnen gegen Mähtod: Hilfe aus Lengerich für Hopstener Rehkitz-Retter. *Neue Osnabrücker Zeitung*. <https://www.noz.de/lokales/lengerich/artikel/2328432/hopstener-naturschuetzer-retten-rehkitze-mit-drohnen-vor-maehetod>
- van Dijck, J., Nieborg, D., & Poell, T. (2019). Reframing platform power. *Internet Policy Review*, 8(2), 1–18. <https://doi.org/10.14763/2019.2.1414>
- v.d. Decken, H., Jessel, B., Krug, A., Schuster, B., & Stratmann, U. (2017). *Agrar-Report 2017. Biologische Vielfalt in der Agrarlandschaft*. (Agrar-Report). Bundesamt für Naturschutz. https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/landwirtschaft/Dokumente/BfN-Agrar-Report_2017.pdf
- Villa-Henriksen, A., Edwards, G. T. C., Pesonen, L. A., Green, O., & Sørensen, C. A. G. (2020a). Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential. *Biosystems Engineering*, 191, 60–84. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013>
- Villa-Henriksen, A., Edwards, G. T. C., Pesonen, L. A., Green, O., & Sørensen, C. A. G. (2020b). Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential. *Biosystems Engineering*, 191, 60–84. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013>
- von Ahlefeld, P. J. W. (2019). Rebound Effekte in der Präzisionslandwirtschaft-Ein Kommentar. *Berichte über Landwirtschaft-Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*, 97(3). <https://doi.org/10.12767/buel.v97i3.247>
- Walter, A., Finger, R., Huber, R., & Buchmann, N. (2017a). Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(24), 6148–6150.
- Walter, A., Finger, R., Huber, R., & Buchmann, N. (2017b). Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(24), 6148–6150. <https://doi.org/10.1073/pnas.1707462114>
- WDR. (2021). *Neue Drohnen retten Rehkitze vor Mäh-Tod*. <https://www1.wdr.de/nachrichten/landespolitik/umwelt-tierschutz-100.html>
- Wegener, J. K., von Hörsten, D., & Urso, L.-M. (2018). *Mit Spot Farming zur nachhaltigen Intensivierung in der Pflanzenproduktion*. 28. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung, Braunschweig. <https://doi.org/DOI.10.5073/jka.2018.458.002>
- Wernick, A., Olk, C., & von Grafenstein, M. (2020). Defining Data Intermediaries. *Technology and Regulation*, 65–77.
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., & David, C. (2009). Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(4), 503–515. <https://doi.org/10.1051/agro/2009004>
- Whalley, W. R., Dumitru, E., & Dexter, A. R. (1995). Biological effects of soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 35(1–2), 53–68. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00473-6](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00473-6)
- Wich, S. A., & Koh, L. P. (2018). *Conservation drones: Mapping and Monitoring Biodiversity* (1st edition). Oxford University Press.
- Wiegleb, G. (2009). Kapitel 2: Methodik der Erfassung und Bewertung von Biodiversitätsschäden aus ökologischer Sicht. In L. Knopp & G. Wiegleb (Hrsg.), *Der Biodiversitätsschaden des Umweltschadensgesetzes. Methodische Grundlagen zur Erfassung und Bewertung* (S. 30–53). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim BMEL. (2015). *Wege zu einer gesellschaftlich akzeptierten Nutztierhaltung: Zusammenfassung des Gutachtens*. Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz beim BMEL.
- Wittstruck, L., Reuter, T., Nahrstedt, K., Trautz, D., Kühling, I., & Jarmer, T. (2021). *Unterscheidung von Mais- und Beikrautpflanzen unter Anwendung von multispektralen UAV-Bilddaten zur teilflächenspezifischen Beikrautregulierung*. 349–354. <http://dl.gi.de/handle/20.500.12116/35700>

- Wix, N., Rode, M., & Reich, M. (2018). Blühstreifen-Biodiversität und produktionsintegrierte Kompensation. *Umwelt und Raum*; 9. <https://doi.org/10.15488/3683>
- Wolfert, S., Goense, D., & Sorensen, C. A. G. (2014). A Future Internet Collaboration Platform for Safe and Healthy Food from Farm to Fork. *2014 Annual SRII Global Conference*, 266–273. <https://doi.org/10.1109/SRII.2014.47>
- Wüstemann, H., Bonn, A., Albert, C., Bertram, C., Biber-Freudenberger, L., Dehnhardt, A., Döring, R., Elsasser, P., Hartje, V., Mehl, D., Kantelhardt, J., Rehdanz, K., Schaller, L., Scholz, M., Thrän, D., Witing, F., & Hansjürgens, B. (2017). Synergies and trade-offs between nature conservation and climate policy: Insights from the “Natural Capital Germany – TEEB DE” study. *Ecosystem Services*, 24, 187–199. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.02.008>
- Yu, F., Zhang, J.-F., Zhao, Y., Zhao, J.-C., Tan, C., & Luan, R.-P. (2010). The Research and Application of Virtual Reality (VR) Technology in Agriculture Science. In *Computer and Computing Technologies in Agriculture III* (Bd. 317). Springer.
- Zeng, J., Liu, X., Song, L., Lin, X., Zhang, H., Shen, C., & Chu, H. (2016). Nitrogen fertilization directly affects soil bacterial diversity and indirectly affects bacterial community composition. *Soil Biology and Biochemistry*, 92, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.09.018>
- Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>
- Zscheischler, J., Brunsch, R., Griepentrog, H. W., Tölle-Nolting, C., Rogga, S., Berger, G., Lehmann, B., Strobel-Unbehaun, T., Reichel, C., Ober, S., & Buitkamp, H. (2021). *Landwirtschaft, Digitalisierung und digitale Daten*.

GESCHÄFTSSTELLE BERLIN

MAIN OFFICE

Potsdamer Straße 105

10785 Berlin

Telefon: + 49 – 30 – 884 594-0

Fax: + 49 – 30 – 882 54 39

BÜRO HEIDELBERG

HEIDELBERG OFFICE

Bergstraße 7

69120 Heidelberg

Telefon: + 49 – 6221 – 649 16-0

mailbox@ioew.de

www.ioew.de