



Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

BAND 103 | Ausgabe 2

Agrarwissenschaft
Forschung

Praxis

Status Quo der Digitalisierung auf Ackerbaubetrieben in Deutschland

Marius Michels, Oliver Mußhoff

Inhalt

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Einleitung | 2 |
| 2 | Material und Methoden | 5 |
| | 2.1 Fragebogen | 5 |
| | 2.2 Stichprobenverfahren | 7 |
| 3 | Ergebnisse und Diskussion | 8 |
| | 3.1 Stichprobe | 8 |
| | 3.2 Bekanntheit, Nutzung und Investitionsabsichten landwirtschaftlicher Technologien | 11 |
| | 3.3 Diskussion | 14 |
| 4 | Fazit | 18 |
| | Zusammenfassung | 19 |
| | Summary | 19 |
| | Literatur | 20 |

1 Einleitung

Die Europäische Union hat es sich zum politischen Ziel gesetzt, die Produktivität und Nachhaltigkeit der Landwirtschaft durch die verstärkte Entwicklung und Verbreitung von Innovationen zu fördern (EU SCAR, 2013). Die Übernahme von Innovationen auf den landwirtschaftlichen Betrieben wird nicht nur als entscheidender Faktor für die Produktivität und Nachhaltigkeit des landwirtschaftlichen Sektors gesehen, sondern auch für das wirtschaftliche Wohlergehen der Landwirte (CHAVAS UND NAUGES, 2020). Einer der aktuell wichtigsten Bereiche der landwirtschaftlichen Innovation ist die Digitalisierung, die auch als vierte Revolution in der Landwirtschaft gilt (WALTER et al., 2017).

Die Digitalisierung in der Landwirtschaft wird von Industrie, Politik und internationalen Agrar- und Ernährungsorganisationen als hilfreiches Instrument zur Bewältigung zahlreicher globaler Herausforderungen wie der Ernährungssicherung und der Anpassung an den Klimawandel dargestellt. Sie wird als Wegbereiter zu einer nachhaltigen Landwirtschaft und als Win-Win-Strategie gesehen, von der die Umwelt, Landwirtschaft und Verbraucher gleichermaßen profitieren werden (KRITIKOS, 2017; FINGER et al., 2019; SCHNEBELIN, 2022; HACKFORT, 2023). Im Kontext der Digitalisierung der Landwirtschaft tauchen Begrifflichkeiten wie „Precision Farming“, „Smart Farming“, und „Landwirtschaft 4.0“ auf, welche oft synonym verwendet werden (GROHER et al., 2020) aber verschiedene hierarchisch anzuordnende Konzepte beschreiben. Das seit den 1980er Jahren etablierte Precision Farming konzentriert sich auf die standortangepasste Pflanzenproduktion durch gezielte Beobachtung, Messung und Reaktion auf Variabilitäten innerhalb von und zwischen Feldern. Diese Technologien ermöglichen eine präzise Steuerung von Ressourcen wie Düngemitteln, Pflanzenschutzmitteln und Saatgut, um die Effizienz zu optimieren und gleichzeitig Umweltauswirkungen zu minimieren. Darauf aufbauend entwickelte sich in den späten 1990er Jahren das Konzept des Smart Farming. Smart Farming integriert Daten aus verschiedenen Datenquellen und verbindet diese mit Internet of Things-(IoT)-Technologien, um nicht nur die Produktivität, sondern auch sozioökonomische und ökologische Aspekte zu berücksichtigen. Es umfasst Entscheidungsunterstützungssysteme, Automatisierungssysteme für Bewässerung, Düngung und Pflanzung sowie Echtzeitüberwachung von Boden- und Wetterbedingungen. Als umfassendstes und seit 2010 zunehmendes Konzept repräsentiert Landwirtschaft 4.0 (Agriculture 4.0) die vollständige Integration der Landwirtschaft in die digitale Ära. Dieses Konzept verbindet Big Data, künstliche Intelligenz und digitale Technologien, um großflächige Produktivitätssteigerungen mit Umweltschutz und Klimawandelanpassung zu vereinen. Landwirtschaft 4.0 überträgt Elemente der Industrie 4.0 – wie vernetztes IoT, Cloud-Systeme und autonome Maschinen – auf die landwirtschaftliche Produktion und schafft damit ganzheitliche, KI-gestützte Landwirtschaftssysteme (GEBBERS UND ADAMCHUK, 2010; WOLFFERT et al., 2017; GEPPERT et al., 2024). Diese Evolution verdeutlicht den Wandel von lokaler Optimierung über Datenvernetzung bis hin zu vollständig integrierten digitalen Produktionssystemen. Dem entsprechend umfasst die Digitalisierung in der Landwirtschaft inzwischen ein breites Spektrum an Technologien, darunter Lenksysteme, variable Applikationstechnologien, autonome Roboter und Drohnen, Sensoren sowie Entscheidungsunterstützungssysteme (FOUNTAS et al., 2015; PRAUSE et al., 2021; ARAÚJO et al., 2021; PAPADOPOULOS et al., 2024).

Trotz der wachsenden Bedeutung dieser Technologien weisen KEHL et al. (2021) darauf hin, dass die Diffusion digitaler Anwendungen in der Landwirtschaft primär in Ländern wie den USA oder Dänemark umfassend untersucht wurde, während für den deutschen Raum ein Mangel an belastbaren Ergebnissen zur aktuellen Verbreitung digitaler Lösungen besteht. Die wenigen vorhandenen Studien, wie jene von GABRIEL UND GANDORFER (2023) oder die Bitkom-Untersuchung (BITKOM RESEARCH, 2024), zeigen methodische Limitationen: Die aktuelle Forschung zum Stand der Digitalisierung in der deutschen Landwirtschaft konzentriert sich überwiegend auf regionale Erhebungen, aggregierte Betrachtungen oder isolierte Einzeltechnologien, ohne deren Einbettung in ein umfassendes Technologiespektrum zu berücksichtigen. So fokussiert die Studie von GABRIEL UND GANDORFER (2023) auf kleinere Betriebe in Bayern mit durchschnittlich 35 Hektar Betriebsfläche und erlaubt explizit keine generalisierbaren Rückschlüsse auf größere Betriebe im gesamten Bundesgebiet. Branchenerhebungen wie die Bitkom-Studie bieten zwar wertvolle Übersichten zum allgemeinen Digitalisierungsgrad (BITKOM RESEARCH, 2024), differenzieren jedoch nicht ausreichend zwischen verschiedenen Technologietypen und deren spezifischen Nutzungsgraden. Diese unzureichende Differenzierung erschwert die Identifikation technologie-spezifischer Adoptionsmuster und die Entwicklung zielgerichteter Fördermaßnahmen. Zudem fehlt in vielen Studien die systematische Erfassung der Diskrepanz zwischen Technologiebekanntheit und tatsächlicher Implementierung sowie eine simultane Betrachtung des aktuellen Implementierungsstands und konkreter zukünftiger Investitionsabsichten, die für Prognosen zur weiteren Digitalisierungsentwicklung im Agrarsektor essentiell ist.

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel der vorliegenden Studie eine systematische Erfassung des aktuellen Implementierungsstands digitaler Technologien im deutschen Ackerbau anhand eines differenzierten Klassifikationsschemas in fünf klar abgegrenzten Kategorien (PAPADOPOULOS et al., 2024) mit insgesamt 32 Technologien. Dieser methodische Ansatz ermöglicht nicht nur eine präzisere Kategorisierung als die bisherigen Studien, sondern auch eine sektorübergreifende Vergleichbarkeit durch die Anwendung eines etablierten Klassifikationsschemas bei dem sowohl Technologien des Precision Farming, Smart Farming und Landwirtschaft 4.0 berücksichtigt werden. Zudem soll eine differenzierte Betrachtung der Bekanntheit und tatsächlicher Nutzung sowie eine Untersuchung zukünftiger Investitionsabsichten erfolgen. Abschließend werden die gefundenen Muster mit der Literatur diskutiert.

Für die vorliegende Untersuchung wurde eine Datenerhebung durchgeführt, die auf einem geschichteten Zufallsstichprobenverfahren basiert. Die Feldphase erfolgte im Zeitraum Dezember 2024 bis Januar 2025 durch ein etabliertes Marktforschungsinstitut mittels standardisierter, computergestützter Telefoninterviews (CATI) mit 342 landwirtschaftlichen Betriebsleitern in Deutschland. Die Stichprobe fokussiert überwiegend auf Betriebe mit mehr als 50 Hektar Ackerfläche und berücksichtigt die regionale Verteilung der deutschen Landwirtschaftsbetriebe im Bundesgebiet. Zudem ist die Stichprobe in zentralen soziodemografischen und betrieblichen Merkmalen für Deutschland repräsentativ. Der bewusste Fokus auf landwirtschaftliche, im Haupterwerb geführte, Ackerbaubetriebe ermöglicht dabei eine aussagekräftige Erfassung jener Betriebe, die für die aktuelle landwirtschaftliche Produktionsrealität in Deutschland sowie für die Digitalisierung im deutschen Ackerbau besonders relevant sind und zudem einen überproportionalen Anteil an der landwirtschaftlichen Wertschöpfung repräsentieren.

Die vorliegende Studie trägt zur bestehenden Literatur bei, indem sie erstmals eine deutschlandweite, technologieübergreifende Analyse bietet, die sowohl die aktuelle Nutzung als auch Zukunftsperspektiven beleuchtet und damit eine wichtige Lücke in der Digitalisierungsforschung für den Agrarsektor schließt. Die Ergebnisse sind somit von hohem Interesse für politische Entscheidungsträger, Berater und Anbieter, da sie eine evidenzbasierte Grundlage für zielgerichtete Förder- und Entwicklungsmaßnahmen bieten. Nicht zuletzt profitieren landwirtschaftliche Betriebsleiter selbst von einer verbesserten Entscheidungsgrundlage bei der strategischen Planung ihrer Digitalisierungsschritte, indem sie ihre eigene technologische Position im Branchenvergleich besser einordnen können.

2 Material und Methoden

2.1 Fragebogen

Bevor die Teilnehmer befragt wurden, wurden sie über Ziel und Inhalt der Studie bzw. des Fragebogens aufgeklärt. Ebenso wurden die Teilnehmer informiert, dass Sie jederzeit ohne Konsequenzen die Befragung abbrechen könnten. Der Fragebogen gliederte sich inhaltlich in vier Teile: Der erste Teil, der für diese Studie relevant ist, erfasste den aktuellen Implementierungsstand digitaler Technologien im Ackerbau, wobei nach PAPADOPOULOS et al. (2024) fünf Technologiekategorien (Aufzeichnungs- und Kartierungstechnologien, Lenk- und Befahrungssysteme, variable Applikationstechnologien, Robotersysteme und intelligente Maschinen, landwirtschaftliche Managementinformationssysteme) mit entsprechenden Technologien abgefragt wurden (Tabelle 1). Die endgültige Technologieauswahl wurde in Abstimmung mit praktizierenden Landwirten vor der finalen Fertigstellung des Fragebogens getroffen. Für jede Technologie wurden der Bekanntheitsgrad, die aktuelle Anwendung sowie Anschaffungspläne für die kommenden 12 Monate erhoben.

Aufzeichnungs- und Kartierungstechnologien: Diese Technologien ermöglichen es, Informationen über Boden, Pflanzen und Mikroklima zu sammeln. Sie dienen der Erfassung und Visualisierung von Felddaten, um daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten. Durch präzise Messungen können landwirtschaftliche Maßnahmen effizienter und zielgerichteter gestaltet werden. Dazu gehören Bodensensoren, Erntesensoren, Ertragskartierung, Drohnen sowie Satelliten zur Bestandsüberwachung.

Lenksysteme und kontrollierte Befahrungssysteme: Bei diesen Technologien werden alle Fahrzeuge auf festgelegten Bahnen gelenkt. Sie tragen dazu bei, Überlappungen bei der Ausbringung von Betriebsmitteln zu reduzieren, den Boden zu schonen und die Präzision landwirtschaftlicher Arbeiten zu erhöhen.

Variable Applikationstechnologien: Diese Technologien ermöglichen eine teilflächenspezifische Ausbringung von Saatgut, Dünger, Pflanzenschutzmitteln und Wasser entsprechend dem individuellen Pflanzenbedarf. Durch die bedarfsgerechte Verteilung der Betriebsmittel können Ressourcen geschont und die Effizienz gesteigert werden.

Robotersysteme und intelligente Maschinen: Diese Kategorie umfasst die Kombination von künstlicher Intelligenz, Informations- und Kommunikationstechnologien sowie Maschine-zu-Maschine-Kommunikation. Sie trägt zur Automatisierung und Autonomisierung in der Landwirtschaft bei und ermöglicht präzisere und effizientere Arbeitsabläufe.

Landwirtschaftliche Managementinformationssysteme: Ausgehend von einfachen Aufzeichnungssystemen haben sich diese zu komplexen ganzheitlichen Plattformen entwickelt. Sie umfassen Entscheidungsunterstützungssysteme, Qualitätsmanagementsysteme und dienen der Integration verschiedener Datenquellen zur Optimierung betrieblicher Entscheidungen.

Der zweite und dritte Teil der Studie wurde in randomisierter Reihenfolge präsentiert. Teil zwei fokussierte auf Einstellungen und Verhaltensabsichten bezüglich variabler Stickstoffdüngung. Der dritte Teil

untersuchte die Zahlungsbereitschaft für die Erstellung satellitengestützte Stickstoffdünger-Applikationskarten. Der vierte Teil erfasste soziodemografische und betriebliche Charakteristika der Teilnehmer.

Tabelle 1:
Technologiekategorien und zugehörige Technologien.

| Nr. | Kategorie | Technologien |
|------------|---|--|
| 1 | Aufzeichnungs- und Kartierungstechnologien | <ul style="list-style-type: none"> • Bodensensoren zur Ermittlung von Bodenparametern (z.B. Feuchtigkeit, Stickstoffgehalt) • Pflanzensensoren zur Optimierung von Betriebsmittelausbringung (z.B. Stickstoffdünger, Wachstumsregler) • Erntesensoren zur Qualitätsmessung (z.B. Feuchtigkeit) • Ertragskartierung • Drohnen zur Erstellung von Applikationskarten (z.B. Bewässerung, Pflanzenschutz, Aussaat, und/oder Düngung) • Drohnen zur Bestandsüberwachung (z.B. Biomasse) • Drohnen für weitere Zwecke (z.B. Wildtiererkennung, Schadensdokumentation, 3D-Karten und Geländemodellen) • Satelliten zur Erstellung von Applikationskarten (z.B. Bewässerung, Pflanzenschutz, Aussaat, und/oder Düngung) • Satelliten zur Bestandsüberwachung (z.B. Biomasse) • GPS-referenzierte Bodenproben zur Bodenkartierung |
| 2 | Lenksysteme und kontrollierte Befahrungssysteme | <ul style="list-style-type: none"> • Parallelfahrssysteme mit RTK-Genauigkeit (Real Time Kinematik) (1-2 cm) • Parallelfahrssysteme mit GPS-Genauigkeit (10-30 cm) • Controlled Traffic Farming (Anlegen der gleichen Fahrspuren in jedem Jahr) • Automatische Teilbreitenschaltung im Pflanzenschutz (Section Control) • Automatische Teilbreitenschaltung bei der Aussaat (Section Control) • Automatische Teilbreitenschaltung bei der Düngung (Section Control) |
| 3 | Variable Applikationstechnologien | <ul style="list-style-type: none"> • Teilflächenspezifische/variable Aussaat • Teilflächenspezifische/variable Düngung • Teilflächenspezifische/variable Bewässerung • Präzise Pflanzenschutzanwendung (z.B. Spot-Spraying/Einzeldüsenschaltung) |
| 4 | Robotersysteme und intelligente Maschinen | <ul style="list-style-type: none"> • Drohnen zur Ausbringung von Betriebsmitteln (z.B. Schlupfwespen zur Maiszünslerbekämpfung) • Drohnen zur Aussaat von Zwischenfrüchten • Automatische Hacktechnik mit Kamerasteuerung • Roboter zur Bodenbearbeitung • Roboter zur mechanischen Unkrautbekämpfung • Roboter zur chemischen Unkrautbekämpfung • Roboter zur Aussaat • Tractor Implement Management (TIM; dies umfasst die Steuerung des Traktors durch das Anbaugerät) |
| 5 | Landwirtschaftliche Managementinformationssysteme | <ul style="list-style-type: none"> • Elektronische Ackerschlagkartei (Dokumentation der Bestandsführung) • Entscheidungsunterstützungssysteme (z.B. Apps, Wettervorhersagen, Befallsprognosen) • Flottenmanagement bzw. Telemetrie • Farm Management Informationssysteme (FMIS) |

2.2 Stichprobenverfahren

Die empirischen Daten wurden über eine standardisierte, computergestützte, telefonische Befragung (CATI - Computer Assisted Telephone Interview) von aktiven landwirtschaftlichen Betriebsleitern in Deutschland im Dezember 2024 und Januar 2025 erhoben. Die Stichprobenziehung erfolgte auf Basis einer umfangreichen Datenbank landwirtschaftlicher Betriebe in Deutschland, die von der *AgriDirect Deutschland GmbH* verwaltet wird. Diese Datenbank umfasst Informationen zu mehr als 300.000 Betrieben (inkl. forstwirtschaftliche Betriebe, Sonderkulturen) und deckt einen großen Teil der Grundgesamtheit des deutschen Primärsektors ab. Für die vorliegende Studie wurden von *AgriDirect Deutschland GmbH* zunächst mehr als 15.000 Betriebsleiter aus dieser Datenbank vorselektiert (Ackerbaubetriebe/Ackerbaubetriebe inkl. Viehhaltung/keine reinen Lohnunternehmen). Ebenfalls wurde ein Fokus auf Betriebe mit mehr als 50 Hektar Ackerfläche gelegt. Anschließend erfolgte die Kontaktaufnahme mit potenziellen Teilnehmern nach dem Zufallsprinzip mittels Telefonbefragung. 366 Fragebögen wurden erfasst. Die endgültige Stichprobe umfasst, nach Bereinigung um unvollständige Datensätze, 342 Betriebsleiter.

Methodisch stellt dieses Verfahren eine zweistufige Stichprobenziehung dar: In der ersten Stufe wurde eine Vorauswahl aus der Datenbank getroffen, in der zweiten Stufe erfolgte eine zufällige Kontakttierung innerhalb dieser Vorauswahl, wobei die tatsächliche Teilnahme durch die Erreichbarkeit und Teilnahmebereitschaft der kontaktierten Betriebsleiter beeinflusst wurde. Es handelt sich somit um ein randomisiertes Auswahlverfahren innerhalb des vorselektierten Pools, was einer geschichteten Zufallsstichprobe (engl. stratified random sampling) mit vorgelagertem Screening entspricht (LOHR, 2021). Die Repräsentativität ist im Kontext der Vorauswahl und der anschließenden Selbstselektion durch Teilnahmebereitschaft zu interpretieren.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Stichprobe

Die untersuchte Stichprobe umfasst 342 landwirtschaftliche Unternehmen deren deskriptive Statistiken in Tabelle 2 und 3 gezeigt werden. Die soziodemographischen Daten der Betriebsleiter sind in Tabelle 2 dargestellt. Das Durchschnittsalter der befragten Landwirte beträgt 51,92 Jahre, mit einer Altersspanne von 21 bis 77 Jahren. Fast die Hälfte der Betriebsleiter (49 %) ist älter als 55 Jahre, gefolgt von 26 % im Alter zwischen 45 und 55 Jahren. Jüngere Landwirte sind weniger vertreten: 14 % sind zwischen 35 und 45 Jahre alt, und nur 9 % sind 35 Jahre alt oder jünger. Die Stichprobe weist mit 91 % einen sehr hohen Anteil männlicher Betriebsleiter auf. In 55 % der Betriebe ist die Hofnachfolge bereits geklärt und 95 % der Betriebsleiter nutzen ein Smartphone. Bezüglich der Bildung verfügen 21 % der Betriebsleiter über einen Hochschulabschluss. Die kontextualisierte Selbsteinschätzung der Risikobereitschaft liegt mit durchschnittlich 5,44 Punkten auf einer 11-Punkte-Skala nach MICHELS et al. (2024) (0 = gar nicht risikobereit; 10 = sehr risikobereit), womit die Landwirte im Mittel als risiko-neutral eingeschätzt werden können.

Die deskriptiven Statistiken der Betriebe sind in Tabelle 3 gezeigt. Die durchschnittliche Betriebsgröße beträgt 137,67 Hektar Ackerland. Die Betriebsgrößen variieren erheblich, wobei der kleinste Betrieb 7 Hektar und der größte 1.800 Hektar umfasst. In der Stichprobe dominieren mittelgroße bis große Betriebe: 42 % der Betriebe bewirtschaften 50 bis unter 100 Hektar, 33 % bewirtschaften 100 bis unter 200 Hektar. Betriebe mit weniger als 50 Hektar machen lediglich 8 % der Stichprobe aus. Betriebe mit 200 bis unter 500 Hektar entsprechen 14 % der Stichprobe, während Betriebe mit mehr als 500 Hektar einen Anteil von 2 % aufweisen. Mehr als die Hälfte der untersuchten Betriebe (56 %) wirtschaftet viehlos. Der durchschnittliche Pachtlandanteil beträgt 51 %. Die Mehrheit der Betriebe (87 %) wird im Haupterwerb bewirtschaftet, nur 13 % sind Nebenerwerbsbetriebe. Die Bodenqualität, gemessen an der Bodenwertzahl, liegt durchschnittlich bei 45,14 Punkten. Ein beachtlicher Anteil der Betriebe (48 %) befindet sich in sogenannten "roten Gebieten" mit besonderen Umweltauflagen. Hinsichtlich der Bewirtschaftungsform folgen 11 % der Betriebe ökologischen Prinzipien, während die übrigen 89 % konventionell wirtschaften. Die regionale Verteilung der Betriebe zeigt eine repräsentative Aufteilung zwischen alten und neuen Bundesländern.

Die Stichprobe zeigt im Vergleich zum deutschen Durchschnitt gewisse strukturelle Besonderheiten, die bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen sind. Der überdurchschnittliche Anteil von Haupterwerbsbetrieben (87 % gegenüber 45 % im Bundesdurchschnitt) und viehlosen Ackerbaubetrieben (56 % gegenüber 37 %) unterstreicht die Fokussierung auf im Haupterwerb geführte, auf Ackerbau spezialisierte Betriebsstrukturen, die für die Adoption der untersuchten digitalen Technologien besonders relevant sind. Die regionale Verteilung spiegelt alle landwirtschaftlichen Produktionsregionen wider und entspricht weitgehend der tatsächlichen Verteilung im Bundesgebiet. Der höhere Anteil an Betriebsleitern mit Hochschulabschluss (21 % gegenüber 14 %) entspricht dem Trend der Zunahme an relativ gut ausgebildeten Betriebsleitern. In wesentlichen weiteren Merkmalen wie Altersstruktur und Geschlechterverhältnis der Betriebsleiter sowie beim Pachtlandanteil und der ökologischen Wirtschaftsweise entspricht die Stichprobe dem deutschen Durchschnitt (Deutscher Bauernverband,

2024). Obwohl Landwirte als risikoscheu eingestuft werden (EUROPEAN COMMISSION, 2017; IYER et al., 2020), entspricht unser Ergebnis der Selbsteinschätzung als im Mittel risikoneutral dem Ergebnis für europäische Landwirte (GARCIA et al., 2024). Insgesamt fokussieren wir mit unserer geschichteten Zufallsstichprobe bewusst auf Betriebe zwischen 50 und 500 Hektar, die zwar zahlenmäßig nur 28 % der landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland ausmachen, jedoch über 53 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche bewirtschaften (DESTATIS, 2025). Mit einer durchschnittlichen Betriebsgröße von 137,67 Hektar übersteigt unsere Stichprobe den deutschen Durchschnitt von etwa 63 Hektar, was unserer bewussten Fokussierung auf Betriebe mit mehr als 50 Hektar Ackerfläche entspricht. Die Wachstumsschwelle liegt bei etwa 100 Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche (Deutscher Bauernverband, 2024), wodurch der mittlere Betrieb unserer Stichprobe als wachstumsorientierter Betrieb und potenzieller Innovationsträger zu sehen ist.

Das systematische Zufallsstichprobenverfahren, die geografische Ausgewogenheit und die Repräsentativität in zentralen soziodemografischen sowie betrieblichen Merkmalen machen die vorliegende Stichprobe besonders geeignet für die Analyse von Digitalisierungsprozessen auf deutschen Ackerbaubetrieben. Der Fokus auf wachstumsorientierte und professionelle Betriebe ermöglicht damit Einblicke in jene Betriebsstrukturen, die für die zukünftige Entwicklung des Agrarsektors und die Adoption innovativer Technologien im Ackerbau besonders relevant sind.

Tabelle 2:
Deskriptive Statistiken der Landwirte (N = 342).

| Variable | Beschreibung | Mittelwert | SD | Min | Max | Dt. Durchschnitt |
|-------------------|--|------------|-------|-----|-----|-------------------|
| <i>alter</i> | Alter des Landwirts in Jahren | 51,92 | 11,99 | 21 | 77 | 53 ^a |
| | ≤ 35 Jahre | 0,09 | - | 0 | 1 | 0,08 ^a |
| | > 35 bis 45 Jahre | 0,14 | - | 0 | 1 | 0,17 ^a |
| | > 45 bis 55 Jahre | 0,26 | - | 0 | 1 | 0,25 ^a |
| | > 55 Jahre | 0,49 | - | 0 | 1 | 0,51 ^a |
| <i>geschlecht</i> | 1, wenn der Landwirt männlich ist; sonst 0 | 0,91 | - | 0 | 1 | 0,89 ^a |
| <i>nach</i> | 1, wenn die Hofnachfolge bereits geklärt ist; sonst 0 | 0,55 | - | 0 | 1 | na |
| <i>risiko</i> | Selbsteinschätzung Risikoeinstellung ^b | 5,44 | 2,08 | 0 | 10 | na |
| <i>smartphone</i> | 1, wenn der Landwirt ein Smartphone nutzt; sonst 0 | 0,95 | - | 0 | 1 | na |
| <i>uni</i> | 1, wenn der Landwirt einen Hochschulabschluss besitzt; sonst 0 | 0,21 | - | 0 | 1 | 0,14 ^a |

^a DEUTSCHER BAUERNVERBAND (2024)

^b Selbsteinschätzung auf einer 11-Punkte Skala gemäß MICHELS et al. (2024). „In Bezug auf die Entscheidungen, die Sie für Ihren landwirtschaftlichen Betrieb treffen, würden Sie sich als risikobereiter Mensch einschätzen oder versuchen Sie, Risiken zu vermeiden?“ 0 = gar nicht risikobereit; 10 = sehr risikobereit

na = Nicht verfügbar; SD = Standardabweichung; dt. = Deutscher

Tabelle 3:
Deskriptive Statistiken der Betriebe (N = 342).

| Variable | Beschreibung | Mittelwert | SD | Min | Max | Dt. Durchschnitt |
|------------------|---|-------------------|-----------|------------|------------|-------------------------|
| <i>acker</i> | 1, wenn der Betrieb viehlos ist; sonst 0 | 0,56 | - | 0 | 1 | 0,37 ^b |
| <i>ackerland</i> | Betriebsgrößen in Hektar Ackerland | 137,67 | 152,85 | 7 | 1 800 | 62,76 ^a |
| | < 50 Hektar | 0,08 | - | 0 | 1 | 0,70 ^a |
| | 50 bis < 100 Hektar | 0,41 | - | 0 | 1 | 0,16 ^a |
| | 100 bis < 200 Hektar | 0,34 | - | 0 | 1 | 0,08 ^a |
| | 200 bis < 500 Hektar | 0,14 | - | 0 | 1 | 0,04 ^a |
| | > 500 Hektar | 0,03 | - | 0 | 1 | 0,02 ^a |
| <i>bp</i> | Bodenwertzahl | 45,14 | 16,39 | 6 | 97 | na |
| <i>neben</i> | 1, wenn der Betrieb ein Nebenerwerbsbetrieb ist; sonst 0 | 0,13 | - | 0 | 1 | 0,55 ^b |
| <i>pacht</i> | Anteil gepachtetes Ackerland | 0,51 | 0.25 | 0 | 100 | 0,55 ^a |
| <i>region</i> | Verteilung der Betriebe in Deutschland nach Region | | | | | |
| | Nord (Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Schleswig-Holstein) | 0,32 | - | 0 | 1 | 0,20 ^b |
| | Süd (Bayern, Baden-Württemberg) | 0,31 | - | 0 | 1 | 0,46 ^b |
| | Ost (Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen) | 0,04 | - | 0 | 1 | 0,07 ^b |
| | West (Hessen, Nordrhein-Westfalen, Saarland, Rheinland-Pfalz) | 0,33 | - | 0 | 1 | 0,27 ^b |
| <i>rote</i> | 1, wenn ein Teil oder die gesamte Betriebsfläche in „roten Gebieten“ liegt; sonst 0 | 0,48 | - | 0 | 1 | na |
| <i>öko</i> | 1, wenn der Betrieb ökologisch wirtschaftet; sonst 0 | 0,11 | - | 0 | 1 | 0,14 ^a |

^a DESTATIS (2025)

^b DEUTSCHER BAUERNVERBAND (2024)

na = Nicht verfügbar; SD = Standardabweichung; dt. = Deutscher

3.2 Bekanntheit, Nutzung und Investitionsabsichten landwirtschaftlicher Technologien

Tabelle 4 präsentiert eine umfassende Darstellung des Digitalisierungsstandes in der deutschen Landwirtschaft anhand von drei Schlüsselindikatoren: Bekanntheitsgrad, aktuelle Nutzung und geplante Anschaffung für 32 verschiedene Technologien, die in fünf übergeordnete Kategorien eingeteilt sind. Ein auffälliges Merkmal der Daten ist die durchgehend hohe Bekanntheit aller Technologien bei den befragten Landwirten. Die Bekanntheitswerte liegen überwiegend über 90 %, was darauf hindeutet, dass deutsche Landwirte generell gut über aktuelle digitale Technologien informiert sind. Im Gegensatz dazu variiert die tatsächliche Nutzung erheblich zwischen 0,6 % und 89,5 %, was eine deutliche Diskrepanz zwischen Kenntnis und Anwendung digitaler Lösungen aufzeigt. Die Werte für geplante Anschaffungen in den nächsten 12 Monaten sind relativ niedrig (0 % bis 6,1).

Kategorie 1: Aufzeichnungs- und Kartierungstechnologien

Die Technologien dieser Kategorie weisen eine durchschnittliche Bekanntheit von 91,7 % auf, wobei die Nutzungsraten stark variieren. Besonders hervorzuheben sind:

- Erntesensoren (50,6 % Nutzung) und die Nutzung von Drohnen für verschiedene Zwecke (53,5 % Nutzung) als die am weitesten verbreiteten Technologien dieser Kategorie
- Drohnen zur Erstellung von Applikationskarten (4,1 % Nutzung) und Boden-/Pflanzensensoren (jeweils 8,2 % Nutzung) als die am wenigsten genutzten Technologien
- Satelliten zur Erstellung von Applikationskarten zeigen mit 4,1 % das relativ höchste Interesse bei geplanten Anschaffungen

Kategorie 2: Lenksysteme und kontrollierte Befahrungssysteme

Diese Kategorie weist sowohl die höchste durchschnittliche Bekanntheit (97,2 %) als auch die höchste durchschnittliche Nutzungsrate (44,7 %) aller Kategorien auf:

- RTK-Lenksysteme (60,2 %), GPS-Lenksysteme (53,2 %) und Section Control im Pflanzenschutz (54,7 %) erreichen die höchsten Nutzungswerte
- Controlled Traffic Farming weist mit 25,4 % die niedrigste Nutzungsrate in dieser Kategorie auf
- Parallelfahrssysteme mit RTK Genauigkeit (5 %) und GPS-Lenksysteme/Teilflächenspezifische Düngung (jeweils 4,7 %) zeigen die relativ höchsten Werte bei geplanten Anschaffungen

Kategorie 3: Variable Applikationstechnologien

Diese Kategorie zeigt eine hohe Bekanntheit (93,9 % Durchschnitt), aber moderate Nutzungsraten (16,4 % Durchschnitt):

- Variable Düngung (22,5 % Nutzung) und präzise Pflanzenschutzanwendungen (20,2 % Nutzung) sind die meistgenutzten Technologien dieser Kategorie
- Variable Düngung zeigt mit 6,1 % den relativ höchsten Wert bei geplanten Anschaffungen aller untersuchten Technologien

Kategorie 4: Robotersysteme und intelligente Maschinen

Diese Kategorie weist trotz hoher Bekanntheit (90,2 % Durchschnitt) die niedrigsten Nutzungsraten aller Kategorien auf (5,5 % Durchschnitt):

- Drohnen zur Ausbringung von Betriebsmitteln (14 % Nutzung) und automatische Hacktechnik (10,8 % Nutzung) sind hier die führenden Technologien
- Roboter für Bodenbearbeitung und Aussaat werden kaum genutzt (jeweils 0,6 %)
- Drohnen zur Aussaat von Zwischenfrüchten zeigen mit 3,5 % das höchste Interesse bei geplanten Anschaffungen

Kategorie 5: Landwirtschaftliche Managementinformationssysteme

Diese Kategorie zeigt bemerkenswerte Unterschiede in der Nutzung:

- Entscheidungsunterstützungssysteme erreichen mit 89,5 % die höchste Nutzungsrate aller untersuchten Technologien
- Elektronische Ackerschlagkarteien werden von 68,7 % der Betriebe genutzt
- Flottenmanagement (14 %) und Farm Management Informationssysteme (23,1 %) werden deutlich weniger genutzt
- Elektronische Ackerschlagkarteien zeigen mit 5,6 % ein vergleichsweise hohes Interesse bei geplanten Anschaffungen

Tabelle 4:**Bekanntheit, Nutzung und geplante Anschaffung landwirtschaftlicher Technologien (N = 342).**

| Kategorie | Technologie | Bekannt | Nutzung | Geplant |
|---|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Aufzeichnungs- und Kartierungstechnologien | Bodensensoren | 83,3 % | 8,2 % | 2,6 % |
| | Pflanzensensoren | 90,6 % | 8,2 % | 1,8 % |
| | Erntesensoren | 94,2 % | 50,6 % | 0,9 % |
| | Ertragskartierung | 94,7 % | 23,1 % | 2,0 % |
| | Drohnen für Applikationskarten | 90,4 % | 4,1 % | 2,0 % |
| | Drohnen zur Bestandsüberwachung | 90,1 % | 8,5 % | 1,8 % |
| | Drohnen für weitere Zwecke | 97,7 % | 53,5 % | 2,3 % |
| | Satelliten für Applikationskarten | 93,0 % | 15,2 % | 4,1 % |
| | Satelliten zur Bestandsüberwachung | 89,5 % | 16,7 % | 1,8 % |
| | GPS-Bodenproben | 93,6 % | 29,8 % | 2,6 % |
| Lenksystem und kontrollierte Befahrungssysteme | RTK Lenksystem (1-2 cm genau) | 98,0 % | 60,2 % | 5,0 % |
| | GPS Lenksystem (10-30 cm genau) | 99,1 % | 53,2 % | 4,7 % |
| | Controlled Traffic Farming (CTF) | 93,3 % | 25,4 % | 0,6 % |
| | Section Control Pflanzenschutz | 99,4 % | 54,7 % | 3,8 % |
| | Section Control Aussaat | 96,5 % | 33,0 % | 3,8 % |
| | Section Control Düngung | 97,1 % | 41,8 % | 4,7 % |
| Variable Applikationstechnologien | Variable Aussaat | 95,6 % | 17,3 % | 4,1 % |
| | Variable Düngung | 96,5 % | 22,5 % | 6,1 % |
| | Variable Bewässerung | 86,8 % | 5,6 % | 1,2 % |
| | Präzise Pflanzenschutzanwendung | 96,8 % | 20,2 % | 3,5 % |
| Robotersysteme und intelligente Maschinen | Drohnen für Betriebsmittelausbringung | 95,0 % | 14,0 % | 2,0 % |
| | Drohnen für Zwischenfrüchte | 91,8 % | 5,8 % | 3,5 % |
| | Automatische Hacktechnik | 96,5 % | 10,8 % | 2,3 % |
| | Roboter Bodenbearbeitung | 92,4 % | 0,6 % | 0,3 % |
| | Roboter mech. Unkrautbekämpfung | 95,9 % | 2,9 % | 1,8 % |
| | Roboter chem. Unkrautbekämpfung | 88,3 % | 1,5 % | 0 % |
| | Roboter Aussaat | 90,1 % | 0,6 % | 0,3 % |
| Landwirtschaftliche Managementinformationssysteme | Tractor Implement Management (TIM) | 71,6 % | 9,1 % | 2,0 % |
| | Elektronische Ackerschlagkartei | 98,5 % | 68,7 % | 5,6 % |
| | Entscheidungsunterstützungssysteme | 97,7 % | 89,5 % | 2,9 % |
| | Flottenmanagement/ Telemetrie | 74,6 % | 14,0 % | 0,3 % |
| | Farm Management Informationssysteme | 72,8 % | 23,1 % | 4,7 % |

3.3 Diskussion

Ein Vergleich der Ergebnisse mit der Studie von GABRIEL UND GANDORFER (2023), die auf bayerische Landwirtschaftsbetriebe fokussiert, zeigt sowohl Parallelen als auch bedeutsame Unterschiede im Digitalisierungsgrad der deutschen Landwirtschaft. Während die bayerische Studie eine moderatere Digitalisierung mit 62 % der Betriebe feststellt, die mindestens eine digitale Technologie nutzen, liegt dieser Wert in unserer deutschlandweiten Untersuchung deutlich höher. Auch bei einzelnen Technologien zeigen sich interessante Unterschiede: So weisen elektronische Ackerschlagkarteien deutlich unterschiedliche Nutzungsraten auf (68,7 % in unserer Studie, 21 % bei allgemeinen digitalen Feldaufzeichnungen in Bayern) und auch bei Lenksystemen zeigt unsere Studie mit 60,2 % für RTK-Systeme gegenüber 17 % für automatische Lenksysteme in der bayerischen Untersuchung deutlich höhere Werte. Diese Diskrepanz lässt sich ggf. auf strukturelle Faktoren zurückführen. Während unsere Stichprobe einen stärkeren Fokus auf mittelgroße bis große Haupterwerbsbetriebe legt, betrachtet die bayerische Studie explizit kleinstrukturierte Betriebe (durchschnittlich 35 ha) mit einem höheren Anteil an Nebenerwerbslandwirten.

Ein weiterer Vergleich mit der aktuellen BITKOM-Studie (2024) bestätigt weitgehend die hier beobachteten Digitalisierungstrends. Beide Untersuchungen zeigen eine hohe Durchdringung bei grundlegenden digitalen Technologien: GPS-gesteuerte Landmaschinen werden laut BITKOM von 69 % der Betriebe genutzt, was mit unseren Befunden zu RTK- und GPS-Lenksystemen (60,2 % bzw. 53,2 %) gut übereinstimmt. Bei elektronischen Ackerschlagkarteien sind die Werte nahezu identisch (BITKOM: 68 % für digitale Ackerschlagkartei, Kuh- oder Sauenplaner, unsere Studie: 68,7 %). Bemerkenswert ist die unterschiedliche Erfassung von Managementsystemen: Während die BITKOM-Studie "Farm- oder Herdenmanagementsysteme" mit 46 % ausweist, differenziert unsere Erhebung präziser zwischen Entscheidungsunterstützungssystemen (z.B. Apps) (89,5 %) und komplexeren Farm Management Informationssystemen (23,1 %). Unsere Ergebnisse sowie die Ergebnisse der Bitkom-Studie (2024) bestätigen außerdem die noch geringe Verbreitung von fortschrittlicheren Technologien wie Feldrobotern und autonomen Systemen.

Stufenweise Digitalisierung der landwirtschaftlichen Betriebe

Die Daten zeigen ein klares Muster der schrittweisen Digitalisierung in deutschen landwirtschaftlichen Betrieben. Diese Entwicklung beginnt mit grundlegenden Managementsystemen und einfacher zu implementierenden Technologien, bevor fortschrittlichere Lösungen eingeführt werden. Die in der vorliegenden Studie identifizierten Adoptionsmuster digitaler Technologien bestätigen die von GEPPERT et al. (2024) herausgearbeitete hierarchische Entwicklung der Digitalisierung in der deutschen Landwirtschaft. Unsere Ergebnisse zeigen eine stufenweise Adoption, beginnend mit den grundlegenden Precision Farming-Technologien über Smart Farming bis hin zu den komplexeren Landwirtschaft 4.0-Lösungen.

Entscheidungsunterstützungssysteme und elektronische Ackerschlagkarteien (89,5 % bzw. 68,7 % Nutzung) fungieren als Einstiegstechnologien und bilden die digitale Grundlage für viele Betriebe. Diese hohen Adoptionsraten sind bemerkenswert, da sie die Bedeutung dieser Technologien für die betrieb-

liche Dokumentation und Compliance unterstreichen. Im nächsten Schritt folgen Lenksysteme mit relativ hohen Nutzungsraten (RTK-Lenksysteme 60,2 %, GPS-Lenksysteme 53,2 %, Section Control im Pflanzenschutz 54,7 %). Variable Applikationstechnologien, die dem Bereich Smart Farming zuzuordnen sind, befinden sich in einer mittleren Adoptionsphase (durchschnittlich 16,4 % Nutzung), wobei die variable Düngung (22,5 %) und präzise Pflanzenschutzanwendungen (20,2 %) die höchsten Werte aufweisen und auch das relativ größte Interesse für zukünftige Investitionen zeigen (6,1 % bzw. 3,5 % geplante Anschaffungen). Robotersysteme und intelligente Maschinen, stehen eindeutig am Anfang der Adoptionskurve. Trotz hoher Bekanntheit (90,2 % im Durchschnitt) liegt die Nutzungsrate bei nur 5,5 %, wobei Roboter für Bodenbearbeitung und Aussaat mit jeweils 0,6 % kaum verbreitet sind. Diese fortschrittlichsten Technologien wie Robotersysteme zur Unkrautbekämpfung (2,9 %) weisen die niedrigsten Nutzungsraten auf, was ihren Status als neueste Entwicklungsstufe bestätigt.

Unsere Beobachtungen entsprechen der von NOWAK (2021) gewählten Unterscheidung zwischen sich schnell verbreitenden Technologien (z.B. Lenksysteme und Section-Control Technologien) und langsam verbreitende Technologien (z.B. variable Applikationstechnologien). Die in unserer Studie beobachteten unterschiedlichen Adoptionsraten bestätigen auch international vorzufindende Muster, wie sie von LOWENBERG-DEBOER UND ERICKSON (2019) sowie FINGER et al. (2019) dokumentiert wurden. Deren Analyse zeigt, dass sich die Adoptionsraten zwischen verschiedenen Precision Farming Technologien erheblich unterscheiden, wobei Lenksysteme in den meisten mechanisierten Landwirtschaftssystemen weltweit bereits zur Standardpraxis geworden sind, während variable Applikationstechnologien (z.B. Variable Düngung) in den meisten Anbausystemen noch zurückbleiben. Als Erklärung führt NOWAK (2021) an, dass zur Nutzung von variablen Applikationstechnologien Lenksysteme als vorgelagerte Technologie erst etabliert sein müssen.

Adoption Gap: Diskrepanz zwischen Bekanntheit und Nutzung

Die Ergebnisse offenbaren eine auffällige Diskrepanz zwischen der fast universellen Bekanntheit digitaler Technologien und ihrer tatsächlichen Implementierung in den Betrieben. Diese Lücke variiert erheblich zwischen den Technologiekategorien. Besonders ausgeprägt ist diese Diskrepanz bei Robotersystemen, wo beispielsweise Roboter zur mechanischen Unkrautbekämpfung zu 95,9 % bekannt sind, aber nur von 2,9 % der Betriebe genutzt werden – eine Differenz von 93 Prozentpunkten. Ähnlich verhält es sich bei Bodensensoren (83,3 % bekannt, 8,2 % genutzt) und Drohnen zur Erstellung von Applikationskarten (90,4 % bekannt, 4,1 % genutzt). Diese erheblichen Unterschiede lassen sich potenziell durch bereits in der Literatur diskutierte Adoptionsbarrieren erklären (TOZER, 2009; DREWRY ET AL., 2019; THOMPSON ET AL., 2019; WANG ET AL., 2023; GEPPERT ET AL., 2024; BITKOM RESEARCH, 2024):

- Hohe Investitionskosten
- Technische Komplexität und Mangel an Fachkenntnissen für die Implementierung und Nutzung
- Unzureichende Kompatibilität mit bestehender Technik und Betriebsabläufen
- Unsicherheit bezüglich der Rentabilität bzw. der Vorteile und der rechtlichen Rahmenbedingungen
- Strukturelle Hindernisse wie Internetverfügbarkeit im ländlichen Raum

Investitionszurückhaltung trotz Digitalisierungsbewusstsein

Die durchweg niedrigen Werte bei geplanten Anschaffungen (0 % bis 6,1 %) sind ein klares Indiz für eine allgemeine Zurückhaltung bei Neuinvestitionen in digitale Technologien, trotz des hohen Bewusstseins für deren Existenz und potenziellen Nutzen. Selbst bei etablierten Technologien wie elektronischen Ackerschlagkarteien (68,7 % Nutzung) planen nur 5,6 % der Befragten eine Anschaffung in den nächsten 12 Monaten. RTK-Lenksysteme, die mit 60,2 % bereits weit verbreitet sind, werden nur von 5 % der Befragten als geplante Investition genannt. Diese Zurückhaltung könnte mehrere Ursachen haben:

- Die wirtschaftliche Situation vieler landwirtschaftlicher Betriebe und allgemeine Unsicherheiten im Agrarsektor (Deutscher Bauernverband, 2024)
- Eine abwartende Haltung aufgrund von Unsicherheiten z.B. bezüglich der weiteren technologischen Entwicklung (EASTWOOD UND RENWICK, 2020), insbesondere bei fortschrittlichen Systemen wie Robotern (0-2 % geplante Anschaffungen) (SPARROW UND HOWARD, 2020; KOOSTRA et al., 2021)

Fokus auf bewährte Technologien mit unmittelbarem Nutzen

Die Nutzungsdaten zeigen eine deutliche Präferenz für Technologien, die einen unmittelbaren (wirtschaftlichen) Nutzen bieten und sich relativ einfach in bestehende Betriebsabläufe integrieren lassen. Entscheidungsunterstützungssysteme wie z.B. Smartphone und Tablet Apps (89,5 % Nutzung) bieten einen direkten Mehrwert durch verbesserte Entscheidungsfindung bei gleichzeitig vergleichsweise geringer Investitionshöhe (MICHELS et al., 2020a; MICHELS et al., 2020b). Ähnlich verhält es sich mit elektronischen Ackerschlagkarteien (68,7%), die zudem den (steigenden) Dokumentationsanforderungen gerecht werden (AUERNHAMMER, 2001; GEPPERT et al., 2024).

Lenksysteme und Section Control-Technologien (41,8 % - 60,2 % Nutzung) ermöglichen direkte Einsparungen bei Betriebsmitteln und Arbeitszeit durch Vermeidung von Überlappungen und präzisere Applikation. Ihr hoher Verbreitungsgrad bestätigt ihre potenzielle wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit (ROBERTSON et al., 2012; NOWAK, 2021; PAPADOPOULOS et al., 2024). Im Gegensatz dazu stehen neue Technologien wie Robotersysteme (0,6 % - 2,9 % Nutzung), deren wirtschaftlicher Nutzen aktuell weniger unmittelbar ersichtlich oder deren Integration in bestehende Betriebsabläufe komplexer ist (KOOSTRA et al., 2021). Die Ergebnisse unterstreichen, dass die Adoptionsentscheidung stark von einem nachvollziehbaren Kosten-Nutzen-Verhältnis bzw. einer wahrgenommenen Profitabilität (THOMPSON et al., 2019; KERNECKER et al., 2020; WANG et al., 2023) und der Praktikabilität der Implementierung bzw. Komplexität der Technologie (AUBERT et al., 2012) abhängt. Die relativ hohe Investitionsbereitschaft für variable Applikationstechnologien (z.B. für Dünger) könnte gemäß BARNES et al. (2019) und FINGER et al. (2019) auch mit strikteren Umweltauflagen zusammenhängen, die Bestrebungen zur möglichst effizienten Ausbringung auslösen.

Potenzial für gezielte Förderung und Technologietransfer

Die in unserer Studie nachgewiesene Kombination aus hoher Bekanntheit und niedriger Nutzung bei vielen Technologien weist auf ein erhebliches ungenutztes Potenzial hin. Besonders deutlich wird dies bei Technologien wie variablen Applikationstechnologien (Bekanntheitsgrad >95 %, aber nur 17,3 %-

22,5 % Nutzung) und GPS-Bodenproben (93,6 % bekannt, 29,8 % genutzt). Diese Diskrepanz deutet darauf hin, dass trotz Kenntnis dieser Technologien spezifische Adoptionsbarrieren bestehen. Auch bei Satellitentechnologien für Applikationskarten und Bestandsüberwachung (93% bzw. 89,5 % bekannt, aber nur 15,2 % bzw. 16,7 % genutzt) und besonders ausgeprägt bei Robotersystemen und intelligenten Maschinen (durchschnittlich 90,2 % bekannt, aber nur 5,5 % genutzt) zeigen unsere Daten eine erhebliche Implementierungslücke. Grundsätzlich könnten hier Maßnahmen wie Demonstrationsbetriebe sowie praxisnahe Schulungen dem entgegenwirken.

4 Fazit

Ziel der Studie war die systematische Erfassung des Standes der Digitalisierung in deutschen Ackerbaubetrieben anhand eines differenzierten Klassifikationsschemas. Datengrundlage ist eine geschichtete Zufallsstichprobe mit 342 Landwirten, die im Dezember 2024 und Januar 2025 erhoben wurde. Die Studie liefert erstmals einen umfassenden Einblick in den aktuellen Implementierungsstand von 32 verschiedenen Digitaltechnologien im deutschen Ackerbau, kategorisiert in fünf technologische Bereiche.

Die Ergebnisse verdeutlichen eine beachtliche Diskrepanz zwischen Bekanntheit und tatsächlicher Nutzung digitaler Technologien. Während der Bekanntheitsgrad durchweg hoch ist (meist >90 %), variiert die tatsächliche Nutzung erheblich – von unter 1 % bei Robotersystemen für Bodenbearbeitung und Aussaat bis zu 89,5 % bei Entscheidungsunterstützungssystemen. Unsere Daten offenbaren ein klares hierarchisches Adoptionsmuster: Managementinformationssysteme und Lenktechnologien (Precision Farming) sind bereits weitgehend etabliert, variable Applikationstechnologien (Smart Farming) befinden sich in einer mittleren Adoptionsphase, während Robotersysteme (Landwirtschaft 4.0) trotz hoher Bekanntheit kaum implementiert werden. Die Investitionsbereitschaft bleibt mit Werten zwischen 0 % und 6,1 % durchweg niedrig.

Aus unseren Ergebnissen ergeben sich mehrere Implikationen: Für Technologieanbieter ist von Bedeutung, dass die empirisch nachgewiesenen unterschiedlichen Nutzungsraten auf technologiespezifische Implementierungsbarrieren hindeuten. Die teilweise hohe Bekanntheit bei gleichzeitig niedriger Nutzung deutet auf unzureichende Wertversprechen oder mangelnde Integrierbarkeit in bestehende Betriebsabläufe hin. Gleichzeitig sind die Ergebnisse auch für Verbände und Bildungseinrichtungen von Interesse, da die Diskrepanz möglicherweise auch auf ein Kompetenzdefizit hinweist. Für landwirtschaftliche Betriebe ist von Interesse, dass die Daten ein klares stufenweises Adoptionsmuster zeigen, das Betrieben als Orientierung für ihre eigene Digitalisierungsstrategie dienen kann. Für politische Entscheidungsträger ist bei der Entwicklung von Strategien zu berücksichtigen, dass die unterschiedlichen Adoptionsraten zwischen etablierten und neueren Technologien zeigen, dass eine differenzierte Betrachtung des Digitalisierungsprozesses erforderlich ist, anstatt von einer einheitlichen „Digitalisierung der Landwirtschaft“ zu sprechen.

Für zukünftige Forschungsarbeiten ergeben sich mehrere direkte Anknüpfungspunkte an unsere Studie. Von besonderem Interesse wären vergleichende Untersuchungen im europäischen Kontext unter Anwendung des differenzierten Klassifikationsschemas. Während bereits Einzelstudien zum Stand der Digitalisierung in anderen Ländern vorliegen, fehlt bislang ein systematischer länderübergreifender Vergleich auf Basis eines einheitlichen methodischen Ansatzes. Darüber hinaus würde eine regelmäßige Wiederholung unserer Erhebung in Deutschland die Möglichkeit bieten, Entwicklungstrends im Zeitverlauf zu erfassen.

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht den aktuellen Implementierungsstand digitaler Technologien im deutschen Ackerbau sowie Nutzungsbarrieren und zukünftige Investitionsabsichten. Mittels einer standardisierten telefonischen Befragung wurden im Dezember 2024 und Januar 2025 insgesamt 342 landwirtschaftliche Betriebsleiter in Deutschland befragt. Die Untersuchung klassifiziert 32 Technologien in fünf Kategorien: Aufzeichnungs- und Kartierungstechnologien, Lenksysteme und kontrollierte Befahrungssysteme, variable Applikationstechnologien, Robotersysteme und intelligente Maschinen sowie landwirtschaftliche Managementinformationssysteme. Die Ergebnisse zeigen eine erhebliche Diskrepanz zwischen Bekanntheit (meist >90 %) und tatsächlicher Nutzung. Während Entscheidungsunterstützungssysteme (89,5 %) und elektronische Ackerschlagkarteien (68,7 %) bereits weit verbreitet sind, werden fortschrittlichere Technologien wie Robotersysteme (meist <3 %) kaum genutzt. Die geplanten Anschaffungen für die kommenden 12 Monate fallen mit Werten zwischen 0 % und 6,1 % durchweg niedrig aus. Die hohen Bekanntheitswerte deuten auf ein grundsätzliches Bewusstsein für digitale Lösungen hin, während die variierenden Nutzungsraten auf unterschiedliche Implementierungsbarrieren hinweisen.

Summary

This study examines the current implementation status of digital technologies in German crop farming, including adoption barriers and future investment intentions. Using a standardized telephone survey conducted between December 2024 and January 2025, a total of 342 farm managers across Germany were interviewed. The research classifies 32 technologies into five categories: recording and mapping technologies, guidance / controlled traffic farming technologies, variable rate technologies, robotic systems or smart machines, and Farm Management Information Systems. The results reveal a substantial discrepancy between awareness (mostly >90 %) and actual usage. While decision support systems (89.5 %) and electronic field record systems (68.7 %) are already widely adopted, more advanced technologies such as robotic systems (mostly <3 %) are rarely used. Planned acquisitions for the coming 12 months are consistently low, ranging between 0 % and 6.1 %. The high awareness values indicate a fundamental cognizance of digital solutions, while the varying utilization rates point to different implementation barriers.

Literatur

- AgriDirect Deutschland GmbH. Online verfügbar unter: <https://www.agridirect.de/> [Zugriff am 24.07.2024].
- ARAÚJO, Sara Oleiro; PERES, Ricardo Silva; BARATA, José; LIDON, Fernando; RAMALHO, José Cochicho, 2021. Characterising the agriculture 4.0 landscape—emerging trends, challenges and opportunities. In: *Agronomy*, Bd. 11, Nr. 4, S. 667. DOI 10.3390/agronomy11040667 .
- AUBERT, Benoit A; SCHROEDER, Andreas; GRIMAUDO, Jonathan, 2012. IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. In: *Decision Support Systems*, Bd. 54, Nr. 1, S. 510–520. DOI 10.1016/j.dss.2012.07.002 .
- AUERNHAMMER, Hermann, 2001. Precision farming—the environmental challenge. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, Bd. 30, Nr. 1–3, S. 31–43. DOI 10.1016/S0168-1699(00)00153-8 .
- BARNES, Andrew P.; SOTO, Iria; EORY, Vera; BECK, Bert; BALAFOUTIS, Athanasios; SANCHEZ, Berta; VANGEYTE, Jürgen; FOUNTAS, Spyros; VAN DER WAL, Tamme; GOMEZ-BARBERO, M, 2019. Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. In: *Land Use Policy*, Bd. 80, S. 163–174. DOI 10.1016/j.landusepol.2018.10.004 .
- BITKOM RESEARCH, 2024. So digital ist die Landwirtschaft im Jahr 2024 [online]. Verfügbar unter: <https://www.bitkom-research.de/node/975> [Zugriff am: 24. Juli 2025].
- CHAVAS, Jean-Paul; NAUGES, Céline, 2020. Uncertainty, learning, and technology adoption in agriculture. In: *Applied Economic Perspectives and Policy*, Bd. 42, Nr. 1, S. 42–53. DOI 10.1002/aepp.13003 .
- DESTATIS, 2025. Landwirtschaftliche Betriebe mit Ackerland, Landwirtschaftlich genutzte Fläche: Deutschland, Jahre, Ackerkulturen, Größenklassen des Ackerlandes. CODE 41271-0005, Deutsches Statistisches Bundesamt.
- DEUTSCHER BAUERNVERBAND, 2024. Situationsbericht 24/25 [online]. Verfügbar unter: <https://www.situationsbericht.de/> [Zugriff am: 24. Juli 2025].
- DREWRY, Jessica L.; SHUTSKE, John M.; TRECHTER, David; LUCK, Brian D.; PITMAN, Lynn, 2019. Assessment of digital technology adoption and access barriers among crop, dairy and livestock producers in Wisconsin. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, Bd. 165, S. 104960. DOI 10.1016/j.compag.2019.104960 .
- EASTWOOD, Callum R.; RENWICK, Alan, 2020. Innovation uncertainty impacts the adoption of smarter farming approaches. In: *Frontiers in Sustainable Food Systems*, Bd. 4, Artikel 24. DOI 10.3389/fsufs.2020.00024
- EUROPEAN COMMISSION, 2017. Risk management schemes in EU agriculture: Dealing with risk and volatility. *EU Agricultural Markets Briefs*, Nr. 12, September 2017.
- EU SCAR, 2013. Agricultural knowledge and innovation systems towards 2020 – an orientation paper on linking innovation and research. Brussels, Belgium.
- FOUNTAS, Spyrok; CARLI, Giacomo; SØRENSEN, Claus G.; TSIROPOULOS, Zisis; CAVALARIS, Chris; VATSANIDOU, Anna; VASILEIOS, Liakos; CANAVARI, Maurizio; WIEBENSOHN, Jens; TISSERYE, Bruno, 2015. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, Bd. 115, S. 40–50. DOI 10.1016/j.compag.2015.05.011 .

FINGER, Robert; SWINTON, Scott M.; EL BENNI, Nadja; WALTER, Achim, 2019. Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment. In: *Annual Review of Resource Economics*, Bd. 11, Nr. 1, S. 313–335. DOI 10.1146/annurev-resource-100518-093929 .

GABRIEL, Andreas; GANDORFER, Markus, 2023. Adoption of digital technologies in agriculture—an inventory in a European small-scale farming region. In: *Precision Agriculture*, Bd. 24, Nr. 1, S. 68–91. DOI 10.1007/s11119-022-09931-1 .

GARCIA, Viviana; MCCALLUM, Chloe; FINGER, Robert, 2024. Heterogeneity of European farmers’ risk preferences: an individual participant data meta-analysis. In: *European Review of Agricultural Economics*, Bd. 51, Nr. 3, S. 725–778. DOI 10.1093/erae/jbae012 .

GEBBERS, Robin; ADAMCHUK, Viacheslav I., 2010. Precision agriculture and food security. In: *Science*, Bd. 327, Nr. 5967, S. 828–831. DOI 10.1126/science.1183899 .

GEPPERT, Frauke; KRACHUNOVA, Tsvetelina; BELLINGRATH-KIMURA, Sonoko D., 2024. Digital and smart technologies in agriculture in Germany: Identification of key recommendations for sustainability actions. *EFI Studien*, Nr. 4-2024, Berlin. Verfügbar unter: <https://hdl.handle.net/10419/284380> [Zugriff am: 24. Juli 2025].

GROHER, Tanja; HEITKÄMPER, Katja; WALTER, Achim; LIEBISCH, Frank; UMSTÄTTER, Christina, 2020. Status quo of adoption of precision agriculture enabling technologies in Swiss plant production. In: *Precision Agriculture*, Bd. 21, S. 1327–1350. DOI 10.1007/s11119-020-09723-5 .

HACKFORT, Sarah, 2023. Unlocking sustainability? The power of corporate lockins and how they shape digital agriculture in Germany. In: *Journal of Rural Studies*, Bd. 101, S. 103065. DOI 10.1016/j.jrurstud.2023.103065 .

IYER, Poorvi; BOZZOLA, Martina; HIRSCH, Stefan; MERANER, Manuela; FINGER, Robert, 2020. Measuring farmer risk preferences in Europe: a systematic review. In: *Journal of Agricultural Economics*, Bd. 71, Nr. 1, S. 3–26. DOI 10.1111/1477-9552.12325 .

KEHL, Christoph; MEYER, Rolf; STEIGER, Saskia, 2021. Digitalisierung der Landwirtschaft: gesellschaftliche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Effekte. *TAB-Arbeitsbericht Nr. 194*.

KERNECKER, Maria; KNIERIM, Andrea; WURBS, Angelika; KRAUS, Teresa; BORGES, Friederike, 2020. Experience versus expectation: Farmers’ perceptions of smart farming technologies for cropping systems across Europe. In: *Precision Agriculture*, Bd. 21, S. 34–50. DOI: 10.1007/s11119-019-09651-z .

Gert Kootstra, Xin Wang, Pieter M. Blok, Jochen Hemming & Eldert van Henten

KOOTSTRA, Gert, WANG, Xin; BLOK, Pieter M., HEMMING, Jochen; VAN HENTEN, Eldert, 2021. Selective harvesting robotics: current research, trends, and future directions. In: *Current Robotics Reports*, Bd. 2, S. 95–104. DOI: 10.1007/s43154-020-00034-1 .

KRITIKOS, Mihalis, 2017. *Precision agriculture in Europe: Legal, social and ethical considerations*. Brüssel: Europäische Kommission. Online verfügbar unter: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/603207/EPRS_STU\(2017\)603207_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/603207/EPRS_STU(2017)603207_EN.pdf) [Zugriff am: 24. Juli 2024].

LOHR, Sharon L., 2021. *Sampling: Design and analysis*. New York: Chapman and Hall/CRC. DOI: 10.1201/9780429298899 .

LOWENBERG-DEBOER, James; ERICKSON, Bruce, 2019. Setting the record straight on precision agriculture adoption. In: *Agronomy Journal*, Bd. 111, Nr. 4, S. 1552–1569. DOI: 10.2134/agronj2018.12.0779 .

MICHELS, Marius; FECKE, Wilm; FEIL, Jan-Henning; MUSSHOF, Oliver; PIGISCH, Johanna; KRONE, Saskia, 2020a. Smartphone adoption and use in agriculture: empirical evidence from Germany. In: *Precision Agriculture*, Bd. 21, S. 403–425. DOI: 10.1007/s11119-019-09675-5 .

MICHELS, Marius; BONKE, Vanessa; MUSSHOF, Oliver, 2020b. Understanding the adoption of smartphone apps in crop protection. In: *Precision Agriculture*, Bd. 21, S. 1209–1226. DOI: 10.1007/s11119-020-09715-5 .

MICHELS, Marius; RIELING, Jonas A.; MUSSHOF, Oliver, 2024. Risk attitude, innovativeness, and financial literacy—A cross-occupational comparison of German farmers and foresters. In: *Q Open*, Bd. 4, Nr. 1, Artikel q0ae007. DOI: 10.1093/qopen/q0ae007 .

NOWAK, Benjamin, 2021. Precision agriculture: Where do we stand? A review of the adoption of precision agriculture technologies on field crops farms in developed countries. In: *Agricultural Research*, Bd. 10, Nr. 4, S. 515–522. DOI: 10.1007/s40003-021-00539-x .

PAPADOPOULOS, George; ARDUINI, Simone; UYAR, Havva; PSIROUKIS, Vasilis; KASIMATI, Aikaterini; FOUNTAS, Spyros, 2024. Economic and environmental benefits of digital agricultural technologies in crop production: A review. In: *Smart Agricultural Technology*, Artikel 100441. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100441 .

PRAUSE, Louisa; HACKFORT, Sarah; LINDGREN, Margit, 2021. Digitalization and the third food regime. In: *Agriculture and Human Values*, Bd. 38, S. 641–655. DOI: 10.1007/s10460-020-10161-2 .

ROBERTSON, Michael; LIEWEIIYN, Rick S.; MANDEL, Roger; LAWES, Roger; BRAMLEY, Rob G.; SWIFT, Lonnie; METZ, Nigel; O'CALLAGHAN, Chris 2012. Adoption of variable rate fertiliser application in the Australian grains industry: status, issues and prospects. In: *Precision Agriculture*, Bd. 13, S. 181–199. DOI: 10.1007/s11119-011-9236-3.

SCHNEBELIN, Éléonore, 2022. Linking the diversity of ecologisation models to farmers' digital use profiles. In: *Ecological Economics*, Bd. 196, Artikel 107422. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2022.107422 .

SPARROW, Robert; HOWARD, Mark A., 2021. Robots in agriculture: prospects, impacts, ethics, and policy. In: *Precision Agriculture*, Bd. 22, S. 818–833. DOI: 10.1007/s11119-020-09757-9 .

THOMPSON, Nathanael M.; BIR, Courtney; WIDMAR, David A.; MINTERT, James R., 2019. Farmer perceptions of precision agriculture technology benefits. In: *Journal of Agricultural and Applied Economics*, Bd. 51, Nr. 1, S. 142–163. DOI: 10.1017/aae.2018.27 .

TOZER, Peter R., 2009. Uncertainty and investment in precision agriculture—Is it worth the money? In: *Agricultural Systems*, Bd. 100, Nr. 1–3, S. 80–87. DOI: 10.1016/j.agsy.2009.02.001 .

WALTER, Achim; FINGER, Robert; HUBER, Robert; BUCHMANN, Nina, 2017. Smart farming is key to developing sustainable agriculture. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Bd. 114, Nr. 24, S. 6148–6150. DOI: 10.1073/pnas.1707462114 .

WANG, Tong; JIN, Hailong; SIEVERDING, Heidi; KUMAR, Sandeep; MIAO, Yuxin; RAO, Xudong; OBEMBE, Oladipo; NAFCHI, Ali M.; REDFEARN, Daren; CHEYE, Stephen, 2023. Understanding farmer views of

precision agriculture profitability in the US Midwest. In: *Ecological Economics*, Bd. 213, Artikel 107950. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2023.107950 .

WOLFERT, Sjaak; GE, Lan; VERDOUW, Cor; BOGAARDT, Marc-Jeroen, 2017. Big data in smart farming – A review. In: *Agricultural Systems*, Bd. 153, S. 69–80. DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.023 .

Anschrift der Autoren

Dr. Marius Michels

Arbeitsbereich Landwirtschaftliche Betriebslehre

Department für Agrarökonomie und RURale Entwicklung

Georg-August-Universität Göttingen

Platz der Göttinger Sieben 5

37073 Göttingen

E-Mail: marius.michels@agr.uni-goettingen.de

Prof. Dr. Oliver Mußhoff

Arbeitsbereich Landwirtschaftliche Betriebslehre

Department für Agrarökonomie und RURale Entwicklung

Georg-August-Universität Göttingen

Platz der Göttinger Sieben 5

37073 Göttingen

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung.