



Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

BAND 103 | Ausgabe 2

Agrarwissenschaft
Forschung

Praxis

Bewertung von digitalen Technologien in den Digitalen Experimentierfeldern

Erkenntnisse einer Befragung zu angewandten Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien

Andreas Gabriel, Frank Beneke und Markus Gandorfer

1 Einleitung

1.1 Die Digitalen Experimentierfelder als Beitrag zur Digitalisierung der Landwirtschaft

1.2 Ziele des Beitrags

2 Methode und Vorgehensweise

2.1 Umfrage bei den Experimentierfeldern; standardisierter Fragebogen

2.2 Stichprobe und Analyse

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Untersuchte Technologien in den Experimentierfeldern

3.2 Angewandte Untersuchungsmethoden

3.3 Detailüberblick über genannte Bewertungskriterien und -verfahren

3.3.1 Agronomische Bewertungskriterien und -verfahren

3.3.2 Ökonomische Bewertungskriterien und -verfahren

3.3.3 Ökologische Bewertungskriterien und -verfahren (inkl. Tierwohlaspekte)

3.3.4 Soziale Bewertungskriterien und -verfahren

3.3.5 Bewertungskriterien und -verfahren zur Verlässlichkeit digitaler Technologien

3.3.6 Beurteilung der Intensität der Bewertungsbereiche

3.4 Chancen, Herausforderungen und Mindestanforderungen für digitale Technologien – Erfahrungen aus den Experimentierfeldern für zwei beispielhafte Technologien

3.4.1 Automatisierte Fütterungstechnik

3.4.2 Feldrobotik

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

1 Einleitung

1.1 Die Digitalen Experimentierfelder als Beitrag zur Digitalisierung der Landwirtschaft

Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) hat am 13. September 2018 eine Richtlinie über die Förderung der Einrichtung von Experimentierfeldern zur Digitalisierung in der Landwirtschaft veröffentlicht. Mit der Umsetzung dieser Fördermaßnahme beauftragte das BMEL die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Richtlinie besaß das Thema Digitalisierung und Landwirtschaft 4.0 bereits auf verschiedenen Ebenen eine enorme Präsenz, wobei der tatsächliche Praxiseinsatz als gering einzustufen war, insbesondere in kleinstrukturierten Agrarregionen (GANDORFER et al. 2017). In einer in diesem Zeitraum veröffentlichten Medienanalyse von SCHLEICHER & GANDORFER (2018) identifizieren die Autoren in diesem Kontext eine Reihe relevanter Akzeptanzhemmnisse, welche die geringen Adoptionsraten determinieren - diese reichten von ökonomischen Aspekten wie hoher Investitionsbedarf bzw. fragliche Wirtschaftlichkeit über technische Aspekte wie Probleme mit Inkompatibilitäten bis hin zu Fragen des Datenschutzes und der Datenhoheit. Vor diesem Hintergrund war die Richtlinie zur Förderung der Einrichtung von Digitalen Experimentierfeldern (DEF) bedeutend, denn sie hatte das formulierte Ziel „die nachhaltige digitale Transformation im Agrarbereich zu fördern“. Weiterhin ist der Richtlinie zu entnehmen: „Gemeinsam mit den Ländern sollen die Rahmenbedingungen geschaffen werden, die es durch interdisziplinäres Zusammenwirken der Akteure ermöglichen, Lösungen [gemeint sind digitale Lösungen, *Anmerkung der Autoren*] zu entwickeln, erproben und praxisverfügbar zu machen.“ Der Schwerpunkt der Richtlinie lag damit sehr stark auf den Bereichen Erproben und damit auch Bewerten sowie dem Wissenstransfer, um die Praxisverfügbarkeit zu stimulieren. Insbesondere die Bewertung erfordert vor dem Hintergrund der Zielstellung einer „nachhaltigen Transformation“ einen interdisziplinären Ansatz, um die drei Nachhaltigkeitsdimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales adressieren zu können. Auf Basis der Richtlinie wurden vom BMEL 14 DEF gefördert, welche zwischen September 2019 und März 2020 – gestaffelt in 60 Teilprojekte – mit einem Fördervolumen von rund 50 Millionen Euro starteten. Bei der Bekanntmachung wurde eine Förderdauer von drei (plus möglichen zwei) Jahren vorgesehen.

Diese DEF sind, wie aus Abb. 1 ersichtlich wird, geografisch über Deutschland verteilt und decken damit eine breite Spanne von Agrarstrukturen ab. Weiterhin besitzen die geförderten DEF unterschiedliche Schwerpunktthemen und widmen sich unterschiedlichsten digitalen Technologien und Anwendungen in der Innen- und Außenwirtschaft. Sie reichen von herstellerübergreifenden Digital-Farming-Lösungen im Pflanzenbau (Agro-Nordwest, FarmerSpace, Agrisens-DEMMIN 4.0) über die tiergerechte Haltung und Assistenzsysteme in der Milch- und Rinderproduktion (DigiMilch, Cattle-Hub) sowie in der Schweinehaltung (DigiSchwein) bis hin zu spezialisierten Bereichen wie Wein- und Gartenbau

(DigiVine, DIWAKOPTER). Weitere Felder widmen sich der Vernetzung und Dateninfrastruktur (Landnetz, Express, BeSt-SH, EF-Südwest, DiWenkLa) oder der Kooperation von Praxis und Bildung (Diabek). Gemeinsam haben alle DEF das Ziel, digitale Technologien unter realen Bedingungen zu erproben, ihre Praxistauglichkeit zu bewerten und Innovationen schneller in die landwirtschaftliche Praxis zu übertragen. Steckbriefe zu den jeweiligen DEF sind auf der Homepage der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE, 2025) abrufbar.



Abb. 1: Vom BMEL geförderte DEF auf Basis der entsprechenden Richtlinie vom 13.09.2018, Bildquelle: BMEL, 2023

Mit der Richtlinie über die Förderung der Einrichtung von Experimentierfeldern als Zukunftsbetriebe und Zukunftsregionen der Digitalisierung in der Landwirtschaft sowie in vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsketten vom 28. Juni 2021 wurden weitere Experimentierfelder (ZuZ) etabliert. In den ZuZ stehen insbesondere Möglichkeiten durch die Verfügbarkeit von leistungsstarken Mobilfunknetzen oder einer sehr guten Breitbandinfrastruktur im Fokus. Am 10. Oktober 2023 wurde eine weitere „Richtlinie über die Förderung der Einrichtung von Experimentierfeldern zur Digitalisierung und KI in der Landwirtschaft“ veröffentlicht. „Im Rahmen dieser Bekanntmachung sollen neue und offen gebliebene Aspekte aufgegriffen und thematisiert werden“ (BMEL 2023).

Unter der Leitung der Digitalisierungsbeauftragten des BMEL, Frau Prof. Dr. Engel Arkenau, wurde am 17. Oktober 2019 das Kompetenznetzwerk „Digitalisierung in der Landwirtschaft“ gegründet. In diesem Expertennetzwerk tragen sowohl die Sprecherinnen und Sprecher der DEF und ZuZ als auch weitere Expertinnen und Experten aus der Wissenschaft und von Verbänden unter Begleitung von BMEL und BLE ihr Wissen und ihre Erfahrungen zusammen, um Projekte und Initiativen im Bereich Landwirtschaft und Ernährung voranzutreiben und Lösungen für die Herausforderungen dieser

Branche direkt in die Praxis zu tragen. Aus dem Kompetenznetzwerk „Digitalisierung der Landwirtschaft“ ist im Jahr 2022 eine Arbeitsgruppe hervorgegangen, die sich mit Wegen zu einer Qualitätsbewertung digitaler und technischer Lösungen in der Landwirtschaft beschäftigt hat. Diese durch das BMEL und die BLE begleitete Arbeitsgruppe arbeitete den aktuellen Stand der Technik und die Herausforderungen in den landwirtschaftlichen Bereichen auf und diskutierte mögliche Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen in Richtung Wirtschaft, Politik und Forschung. Die Ergebnisse dazu konnten in einem Positionspapier im Herbst 2024 veröffentlicht werden (BENEKE et al. 2024). Im Rahmen der Arbeit dieser Gruppe wurde zudem der Frage nachgegangen, mit welchen digitalen Technologien sich die vom BMEL geförderten DEF beschäftigen und inwiefern diese in den Projekten selbst bewertet werden. Die Autoren dieses Beitrags waren Mitglieder der Arbeitsgruppe und bildeten zudem eine Unterarbeitsgruppe, die sich speziell mit der Arbeit der DEF beschäftigten. Die Ergebnisse der Unterarbeitsgruppe sollen jetzt in diesem Beitrag dargelegt werden.

1.2 Ziele des Beitrags

Der Beitrag beleuchtet die in den DEF schwerpunktmäßig untersuchten digitalen Technologien und gibt einen Gesamtüberblick über die Untersuchungsmethoden und angewandten Bewertungskriterien und -verfahren in den Projekten. Dieser einmalige Überblick über eine Vielzahl an Technologien und Anwendungsfeldern, welche die DEF abdecken, hilft dabei, geeignete Kriterien für eine nachhaltige Digitalisierung der Landwirtschaft abzuleiten. Ein Fragebogen mit insgesamt vier Fragestellungen und offenen Antwortmöglichkeiten wurde Anfang Oktober 2022 an die Verantwortlichen der 14 Experimentierfelder versandt. Die Ergebnisse dieses Beitrages bauen auf den Antworten zu folgenden drei der vier Fragen auf:

1. Mit welchen (marktverfügbaren) **Technologien** beschäftigen Sie sich in Ihrem Experimentierfeld? Welche **Untersuchungsmethoden** wenden Sie dabei an?
2. Welche Kriterien berücksichtigen Sie bei der **Bewertung** der unter 1. genannten Technologien?
3. Wo liegen die **Chancen und Herausforderungen** der digitalen Technologien, mit denen Sie sich beschäftigen?

(Eine vierte Fragestellung forderte die angeschriebenen Verantwortlichen auf, eine eigene Definition von „Verlässlichkeit“ bei der Bewertung von digitalen Technologien zu formulieren. Diese Fragestellung wird in dem vorliegenden Beitrag nicht behandelt.)

Die Befragung lässt einen Überblick über die in den DEF eingesetzten Technologien zu. Durch die aggregierte Zusammenfassung der Antworten lassen sich die thematischen Schwerpunkte und Untersuchungsmethoden (Demonstration, Bewertung, Forschung und (Weiter-)Entwicklung) über alle Experimentierfelder hinweg aufzeigen. Insbesondere durch die Darstellung der Bewertungskriterien und angewandten Bewertungsverfahren wird deutlich, welche Eigenschaften und technischen

Kriterien bei der Bewertung der verschiedenen Technologien im Fokus stehen. Die Ergebnisse der Umfrage unter den DEF liefern wertvolle Erkenntnisse für die Politik als Gesetz- und Fördermittelgeber. Zudem sind die Angaben zu den Chancen, Herausforderungen und Mindestanforderungen der Technologien in den DEF interessant für Technologiehersteller, wie auch für die Praxis selbst (Anwender, Beratung), um die Implementierung von digitalen Technologien und Anwendungen zu beschleunigen.

2 Methode und Vorgehensweise

2.1 Umfrage bei den Experimentierfeldern; standardisierter Fragebogen

Im Rahmen der in der Einleitung beschriebenen Unterarbeitsgruppe wurden die oben genannten Zielstellungen in einen standardisierten schriftlichen Fragebogen umgesetzt, der sich an die Verantwortlichen (Projektleiterinnen und -leiter, mit teilweiser Inkludierung weiterer Teilprojektleiterinnen und -leiter) der 14 DEF richten sollte. Hierfür wurden offene Fragen ausgearbeitet, die allesamt mit freien Textangaben beantwortet werden konnten. Der Fragebogen enthielt dafür Antwortfelder, die ausreichend Platz für ausführliche Angaben durch die Befragten bereithielten. Offene Antwortmöglichkeiten in Umfragen bieten Möglichkeiten für eine qualitative Erfassung der Erfahrungen und Meinungen. Durch die frei formulierbaren Antworten kann ein tiefergehendes Verständnis für die Perspektive der Befragten gewonnen werden (OPPENHEIM 2000). Da die Antworten nicht durch vorgegebene Antwortoptionen eingeschränkt sind, können offene Fragen eine Vielzahl von Meinungen, Ansichten und Erfahrungen erfassen. Es muss jedoch auf mögliche Verzerrungen durch die subjektive Interpretation bei der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse hingewiesen werden (NARDI 2018). Die Umfrage wurde als Word-Dokument durch die BLE am 5. Oktober 2022 an die Verantwortlichen der 14 DEF mit der Bitte um Beantwortung oder Weiterleitung an weitere Personen in Leitungsfunktionen innerhalb der Projekte versandt. Eine kurze Einleitung verwies auf den Zweck der Umfrage und enthielt Angaben zum Datenschutz und zu Ansprechpersonen in der BLE für eventuelle Rückfragen. Der Antwortzeitraum war ursprünglich auf 14 Tage begrenzt. Dieser wurde dann jedoch bis Ende Dezember 2022 verlängert. Die Rückantworten wurden im Anschluss für die weiteren Analysen in eine Excel-Datenbank überführt und aufbereitet. Einzelne deskriptive Auswertungen und Zusammenfassungen von Angaben der Verantwortlichen (z. B. die Übersicht zu den angewandten Bewertungskriterien und -verfahren) wurden mithilfe des KI-Tools ChatGPT-4 überprüft und punktuell ergänzt; die inhaltliche Validierung erfolgte durch die Autoren. Damit die Aussagen der Verantwortlichen der DEF auch in dieser Veröffentlichung in

aggregierter Form genutzt werden können, wurde nachträglich deren zusätzliche Zustimmung eingeholt.

2.2 Stichprobe und Analyse

Nach Ablauf der Teilnahmefrist konnten 27 Rückantworten von insgesamt 13 der 14 DEF für die Auswertung verwendet werden. Die Anzahl der Teilnehmenden je Experimentierfeld variierte dabei von einer verantwortlichen Person, die Angaben zum Gesamtprojekt machen konnte (meist die gesamtkoordinierende Person) bis hin zu mehreren Personen, die beispielsweise Angaben aus der Perspektive einzelner Projektteile bereitstellten. Die Auswertung aller Rückantworten zeigte, dass die Befragten Bezug auf insgesamt 181 Einzeltechnologien oder Technologiebereiche nahmen.

Zur Auswertung und Darstellung der Ergebnisübersichten wurden die Daten aufbereitet und mittels Kategorienbildung zugeteilt. Für die Technologien selbst wurden Oberkategorien gebildet, um Schwerpunkte zu untersuchten Technologiebereichen zu ermitteln. Ebenso konnten die Antworten zu den angewandten Untersuchungsmethoden in die Kategorien „Demonstration“, „Bewertung“ sowie „Forschung und (Weiter-)Entwicklung“ eingeteilt und quantifiziert werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei der Anwendung von Bewertungskriterien und -verfahren durchaus auch forschende Aktivität geleistet wird. Im Fragebogen an die Verantwortlichen der DEF wurde „Forschung“ an und „(Weiter-)Entwicklung“ der Technologien zusammen als eine Kategorie der Untersuchungsmethoden abgefragt. Bei den Antworten zu den technologiespezifischen Bewertungskriterien und -verfahren, die in den DEF angelegt werden, erfolgte zusätzlich eine Kategorisierung in fünf Bewertungsbereiche: „ökologische Bewertung“, „Bewertung der Wirtschaftlichkeit“, „Bewertung der Verlässlichkeit“, „soziale Aspekte“ und Bewertungsverfahren zur „agronomischen Bewertung“. Die Bewertung von Tierwohlaspekten bei den untersuchten Technologien in der Tierhaltung (z. B. Stalltechnik, Sensoren) wurden im Nachgang zu dieser Klassifizierung dem Bereich der „ökologischen Bewertung“ zugeordnet. Um die Zuordnung der Angaben der Verantwortlichen der DEF auf die Bewertungsbereiche quantifizieren zu können, wurde die „Intensität“ der Anwendung von Bewertungskriterien anhand der Antworten in der Umfrage abgeschätzt. Wurden beispielsweise sehr konkrete Angaben zu Bewertungsverfahren bei den Technologien im Projekt gemacht, wurde diesem Bereich eine „hohe“ oder „mittlere“ Intensität zugeschrieben. Wurden nur allgemeine oder keine Angaben dazu gemacht, ist die Intensität im jeweiligen Bewertungsbereich „niedrig“ bzw. es wurde als „keine Angabe (k. A.)“ vermerkt.

Abschließend wurden Chancen, aktuelle Herausforderungen und Mindestanforderungen für die in den DEF untersuchten Technologien abgefragt. Während diese für das Positionspapier der gesamten Arbeitsgruppe wertvolle Hinweise für die Gesamtheit der in der Landwirtschaft einsetzbaren digitalen Technologien lieferten (siehe BENEKE et al. 2024), werden für den vorliegenden Beitrag exemplarisch

zwei ausgewählte digitale Technologiebereiche qualitativ analysiert und herausgearbeitet (Automatisierte Fütterungstechnik, Feldrobotik). Die exemplarische Darstellung zu diesen zwei Technologien zeigt die Potenziale auf Basis von projektübergreifenden Erfahrungen aus jeweils mehreren DEF.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Untersuchte Technologien in den Experimentierfeldern

Die DEF waren über ganz Deutschland verteilt und hatten unterschiedliche Schwerpunkte. Diese vielfältige und heterogene Schwerpunktsetzung bei der Untersuchung verschiedenster digitaler Technologien und Themen wurde auch in der Umfrage deutlich. So machten die Experimentierfelder Angaben zu insgesamt 181 digitalen Technologien oder Technologiebereichen sowohl in der konkreten Anwendung in der Innen- und Außenwirtschaft als auch als digitale Unterstützungswerkzeuge für Kommunikation und Datenaustausch zwischen verschiedenen Akteuren. Um einen besseren Überblick über die Schwerpunktsetzung zu erhalten, werden die 181 Technologien in die fünf Oberkategorien „Datenmanagement und Analyse“, „Automatisierung und Robotik“, „Entscheidungsunterstützungssysteme“, „Kommunikation und Vernetzung“ und „Technologien für spezifische Anwendungen“ eingeteilt (Abb. 2).

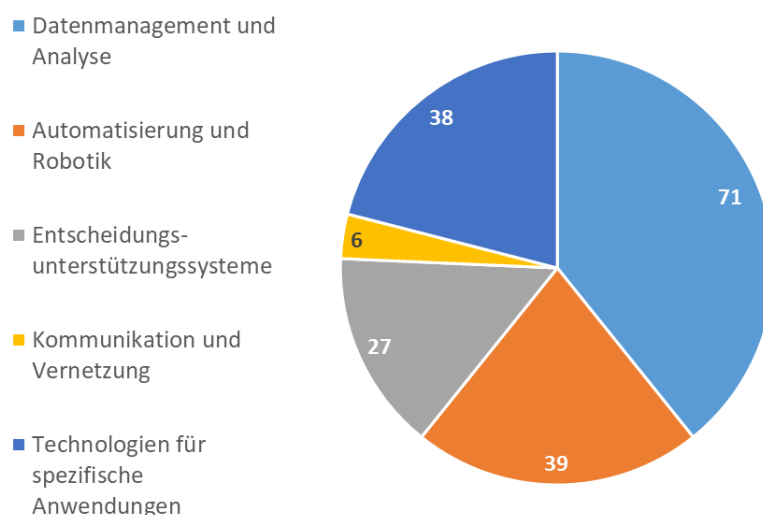


Abb. 2: Verteilung der Oberkategorien an untersuchten Technologien (mit Anzahl an genannten Technologien; insgesamt 181 genannte digitale Technologien aus 13 DEF)

Im Folgenden werden die zugeordneten Technologien und Technologiebereiche zu den fünf Oberkategorien übersichtsweise dargestellt. Es ist dabei zu beachten, dass die Zuordnung nach

logischen Gesichtspunkten vorgenommen wurde, sich einzelne Technologien in ihren Funktionen und Anwendungsbereichen jedoch auch durchaus mehreren Oberkategorien zuordnen lassen.

1. Datenmanagement und Analyse (71 Technologien)

Der größte Anteil der angegebenen Technologien kann dieser Oberkategorie zugeteilt werden. Alle teilnehmenden DEF nennen dazu eine oder mehrere Technologien. Die Oberkategorie umfasst Anwendungen, die dafür sorgen, dass Daten gemessen, verarbeitet und analysiert werden. Dies beinhaltet Fernerkundungstechnologien (5 Technologien wurden betrachtet) sowie die Verwendung von Satellitendaten, z. B. zur Bestandserfassung oder Aussaat (3). Weiterhin sind dieser Oberkategorie der Einsatz von Geoinformationssystemen (GIS) (3) sowie Telemetriesysteme (2), z. B. zum Datentransfer oder zur flächenspezifischen Bewertung, zugeordnet. Ein Großteil der Technologien in dieser Oberkategorie umfasst die verschiedenen Formen der Sensorik. Dazu gehören Tiersensoren und Tiertracking (21), Sensoren zur Bestandserfassung und Ertragsmessung (12), Technologien für Messungen im Boden oder der Bodenfeuchte (5), Wettersensoren (6), Sensorik für Stalltechnik und Stallklima (3), Messsysteme zur Verbesserung der Arbeitsqualität (2), sowie Anwendungen zur Verbesserung durch Sensortechnik allgemein (5).

2. Automatisierung und Robotik (39 Technologien)

In dieser Oberkategorie ist der Großteil der DEF mit Technologien vertreten, bei der die Automatisierung von Prozessen im Vordergrund steht. Automatisierte Stalltechnik beispielsweise zur Entmistung, Reinigung und Fütterung (8) wird häufig demonstriert und bewertet. Ein weiterer stark vertretener Bereich ist der Einsatz von RTK-GNSS Technologie, z. B. zur Fahrassistenz oder für Kartierungssysteme (7). In der Außenwirtschaft reicht das Spektrum von Feldrobotik (6), automatisierter Bewässerung (2) bis hin zu verschiedenen Applikationen durch den Einsatz von Drohnen (16). Letztere werden z. B. auf deren Einsatzmöglichkeiten bei der Bestandserfassung oder zur Pflanzenschutzapplikation getestet. Mehrere DEF nutzen Drohnen für Demonstrationszwecke oder versuchen die Drohnensensortechnik zu verbessern bzw. auf bestimmte Gegebenheiten anzupassen.

3. Entscheidungsunterstützungssysteme (27 Technologien)

Die Entscheidungsunterstützung für den Landwirt ist eine wichtige Funktion von digitalen Technologien und Applikationen. Wie zu erwarten, beschäftigen sich einige DEF sowohl in der Außenwirtschaft wie auch in der Innenwirtschaft mit Farm-Management-Informationen-Systemen (FMIS) und Anwendungen zur Entscheidungsunterstützung (9). Das Experimentierfeld CattleHub vergleicht beispielsweise gleich fünf gängige Softwareprodukte in der Innenwirtschaft. Weitere Anwendungen zur Entscheidungsunterstützung sind gesonderte Systeme für Wachstumsprognosen, Rationsgestaltung, Fungizidterminierung oder Düngemittelmanagement (6), die teilweise als Open Source-Anwendungen zur Verfügung stehen (z. B. DSSAT). Einige der DEF beschäftigen sich mit

Methoden der Künstlichen Intelligenz, Machine Learning (ML) und Data Mining (5). Dabei geht es um KI-basierte Bildanalyse, Ertragsprognosen (für Grünland) oder Anwendbarkeit von Data Mining als Unterstützung bei der Datenanalyse. Verschiedene Software-Lösungen zur Implementierung von ML- und KI-Systemen sowie zur allgemeinen Betriebsführung werden entwickelt, demonstriert und bewertet (7). Dies sind z. B. modular aufgebaute Anwendungen („Apps“) zur manuellen Felddatenerfassung, Datenbanksysteme mit (herstellerunabhängigen) OpenAPI-Schnittstellen oder Weiterentwicklungen von Datenplattformen. Anwendungen zur Datenvisualisierung im Obst- und Weinbau durch Virtual Reality und Darstellungen von Dashboards in der Labor- und Feldumgebung ergänzen diesen Bereich.

4. Kommunikation und Vernetzung (6 Technologien)

Dieser Oberkategorie werden Funk- (5) und ISOBUS-Standards zugeordnet. Dies kann allgemein die Bewertung und Demonstration von Versuchsstrecken und Feldkommunikation bedeuten, oder spezielle Untersuchungen zu LoRa- oder 5G-Netzen. Auf dem ISOBUS-Standard aufbauende Aufzeichnung von Prozessdaten werden analysiert, um die Kommunikation zwischen Traktoren und Anbaugeräten zu optimieren.

5. Technologien für spezifische Anwendungen (38 Technologien)

Anders als bei der Oberkategorie „Automatisierung“ wurden Fütterungstechnologien unter „spezifische Anwendungen“ eingeordnet, die im Kern nicht die Automatisierung selbst, sondern das Management von Fütterungsprozessen adressieren (3), wie beispielsweise Managementprogramme für Futtermischwägen oder programmierbare Waagen. Die Technologie der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) wird in verschiedensten Bereichen analysiert und bewertet, so z. B. zur Bestimmung der Erntegut- und Futterqualität (6), zur Dünger- und Gülleuntersuchung (5) oder allgemein zur Demonstration und Bewertung von Praxisbeispielen im Hinblick auf Problemlösungen durch den Technikeinsatz (1). Ein weiterer Bereich der „spezifischen Anwendungen“ umfasst den Pflanzenschutz. Diese Anwendungen lassen sich aufteilen in chemischen Pflanzenschutz (8), mechanischen Pflanzenschutz mit smarten oder sensorunterstützten Hacken (5) sowie in Kombinationslösungen, wie z. B. das Zusammenspiel mechanischer Hacktechnik mit Bandspritzverfahren (2). Auch der Einsatz von digitalen Gelbschalen, Pheromonfallen oder digitaler Unkrautbestandserfassung ist dem Bereich der Demonstration spezifischer Pflanzenschutzanwendungen zugeordnet (3). Ergänzt wird die Oberkategorie durch die Bewertung und Demonstration von innovativer Sätechnik am Beispiel der Untersaat von Winterfrüchten (1).

3.2 Angewandte Untersuchungsmethoden

Die an der Befragung teilnehmenden Verantwortlichen der DEF sollten in der Umfrage angeben, welche Untersuchungsmethoden in den Projekten für die Technologien angewandt werden, mit denen sie sich beschäftigen. Hierbei konnten qualitative Angaben zu den Untersuchungsmethoden „Demonstration“, „Forschung und (Weiter-)Entwicklung“ und „Technologiebewertung“ gemacht werden. Bei der Aufteilung in diese drei Kategorien wurde berücksichtigt, dass Forschung auch bei der Bewertung von Technologien eine Rolle spielen kann, z. B. bei der Entwicklung und Anpassung von Bewertungskriterien und -verfahren. In der Fragestellung im Fragebogen wurde jedoch gebeten, die forschersischen Aktivitäten im Sinne der „(Weiter-)Entwicklung“ von Technologien zu berücksichtigen. Manche Technologien werden in den DEF zwei oder drei Kategorien von Untersuchungsmethoden zugeordnet. Die Anzahl der Angaben der drei Bereiche übersteigt somit die Gesamtanzahl der untersuchten 181 Technologien (Abb. 3).

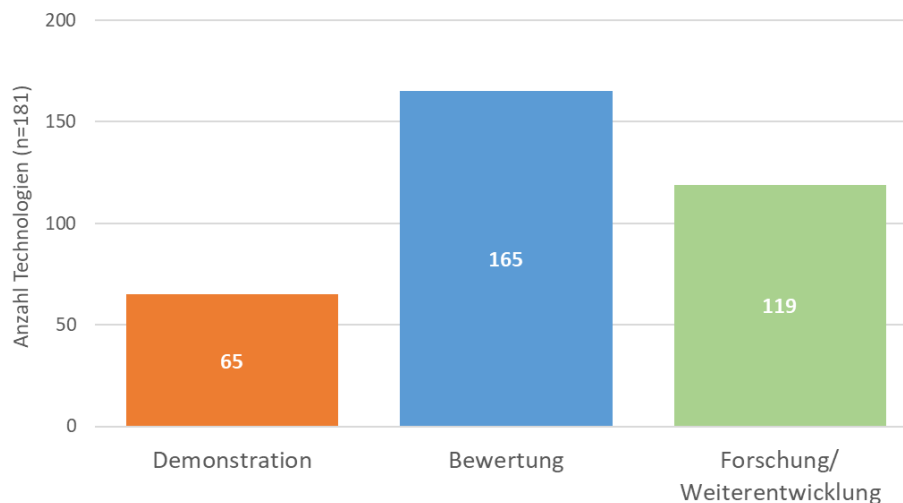


Abb. 3: Übersicht über die Angaben zu den angewandten Untersuchungsmethoden bei den Technologien in den DEF

In der Gesamtschau werden 65 Technologien auch nach außen demonstriert und kommuniziert. Sie werden z. B. auf Feldtagen oder Messeveranstaltung einem fachlichen oder breiteren Publikum vorgeführt. Ein Großteil der Technologien (165) werden auch in einer bestimmten Form bewertet, um evtl. Empfehlungen für Praxis, Industrie oder Politik ableiten zu können. An rund zwei Dritteln der untersuchten Technologien werden Prozesse modelliert, Technologien an alternative Gegebenheiten angepasst oder an Weiterentwicklungen zusammen mit den Herstellerfirmen gearbeitet. Dies erfolgt sowohl bei marktreifen Technologien und Anwendungen als auch bei Produkten im Prototyp-Stadium. Bei der Unterteilung der Untersuchungsmethoden innerhalb der Oberkategorien zeigen sich bestimmte Schwerpunktsetzungen (Abb. 4). Die Werte in der Abbildung repräsentieren die absoluten Zuordnungen. Da einzelne Technologien in den DEF gleichzeitig mehreren Untersuchungsmethoden

zugeordnet sein können, übersteigt die Gesamtsumme der Zuordnungen die Anzahl der untersuchten Technologien pro Oberkategorie (Werte in Klammern). In allen fünf Oberkategorien werden nahezu alle untersuchten Technologien auch einer Bewertung unterzogen. Die Demonstration von Technologien wird anteilig häufiger bei Technologien in den Oberkategorien „Automatisierung und Robotik“, „Datenmanagement und Analyse“ und bei „spezifischen Anwendungen“ angewandt. Im Vergleich zu anderen Technologiebereichen ist hier eher Hardware oder physisches Gerät vorhanden, das sich leichter demonstrieren lässt. Auch der relative Anteil an Aktivitäten in der „Forschung- und (Weiter-)Entwicklung“ ist bei der Automatisierung und „spezifischen Anwendungen“ etwas höher als beispielsweise bei „Kommunikation und Vernetzung“ oder „Entscheidungs- und (Weiter-)Entwicklung“. Im Vergleich zu den anderen Oberkategorien findet die Bewertung von Technologien bei diesen beiden Oberkategorien ebenfalls häufiger statt.

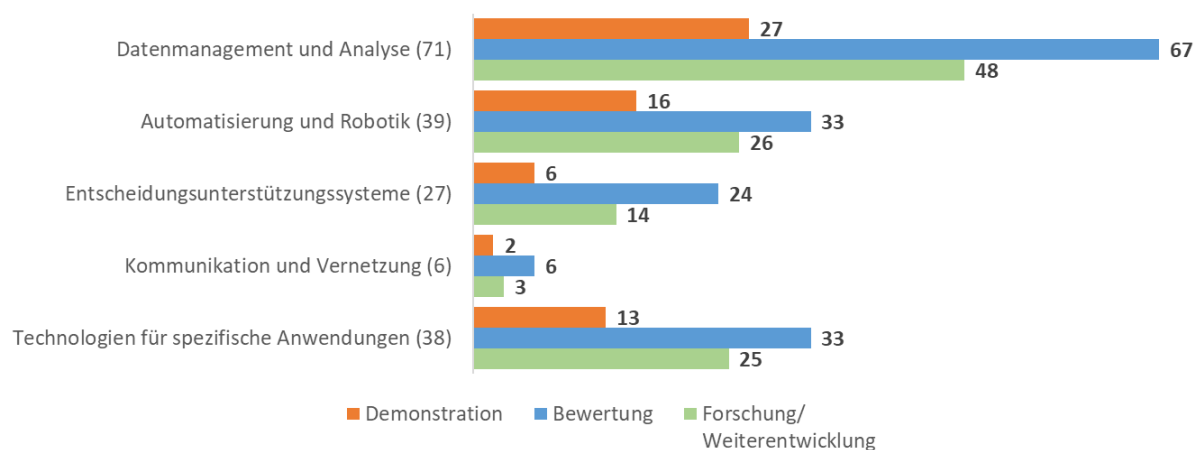


Abb. 4: Zuordnung der Oberkategorien zu den drei angewandten Untersuchungsmethoden (angegebene Werte als absolute Zahlen)

3.3 Detailüberblick über genannte Bewertungskriterien und -verfahren

Ergänzend zu der Nennung an Technologien und den Untersuchungsmethoden, die in den DEF behandelt werden, wurden die Projektverantwortlichen gefragt, welche Bewertungskriterien angelegt werden bzw. welche Bewertungsverfahren angewandt werden, um die einzelnen Technologien zu evaluieren. Wie bereits gezeigt, werden nahezu alle untersuchten Technologien in einer oder mehreren Formen bewertet. Um eine sinnvolle Übersicht über diese Kriterien und Verfahren zu erhalten, wurden die Textangaben der insgesamt 27 Teilnehmenden der Befragung aus 13 Experimentierfeldern fünf Bewertungsbereichen zugeordnet: (1) der agronomischen Bewertung, der ökonomischen (2) und ökologischen (3) Bewertung, der Bewertung der sozialen Auswirkungen (4) sowie der Evaluierung der Verlässlichkeit der Technologien (5). Aspekte zum Tierwohl und Tierschutz sind im Nachgang der Befragung dem ökologischen Bewertungsbereich zugeordnet worden. Um die Ergebnisse zu quantifizieren und die Intensität der berücksichtigten Bewertungskriterien in den

einzelnen Experimentierfeldern einzuschätzen, wurden die Angaben anhand ihres Detailgrades und der Nennung konkreter Kriterien und Verfahren ausgewertet. So sind Angaben zu konkreten Projektaktivitäten wie beispielsweise „Betriebswirtschaftliche Analysen und Folgen der digitalisierten Wertschöpfungsketten: Einsparpotenziale von Arbeitskraft und Handarbeitskraft“ oder die Nennung mehrerer konkreter Verfahren („Selektion von Wildkräutern; Bewertung Energieverbrauch von Pflanzenschutzverfahren Sonderkulturen“) als „hoch“ eingestuft worden. Einzelnennungen wie „Einsparpotenziale Pflanzenschutzmittel“ oder „Ertragsmessung“ wurden als „mittel“ oder „niedrig“ eingestuft. Insgesamt wurden vier Intensitätslevel für die Einteilung angelegt („hoch“, „mittel“, „niedrig“, „keine Angabe (k.A.)“). Die Nennungen von mehreren Verantwortlichen aus einem DEF wurden zusammengefasst ausgewertet. Die Quantifizierung der Zuordnungen ermöglichen es, die Gewichtung und Bedeutung der verschiedenen Bewertungskriterien über alle Experimentierfelder hinweg zu verstehen und Schlussfolgerungen für zukünftige Entwicklungen und Anwendungen zu ziehen. Im Durchschnitt der Experimentierfelder werden die digitalen Technologien relativ umfassend bewertet (Abb. 5). Schwerpunkte liegen in den Bereichen Verlässlichkeit und Wirtschaftlichkeit. Die Evaluierung sozialer Kriterien, wie z. B. der Arbeitsorganisation oder Arbeitsqualität durch den Einsatz digitaler Technologien, werden tendenziell im Vergleich weniger intensiv bewertet als die restlichen Bewertungsbereiche. In den folgenden Abschnitten werden die genannten Angaben und Aspekte der fünf Bewertungsbereiche jeweils zusammengefasst.

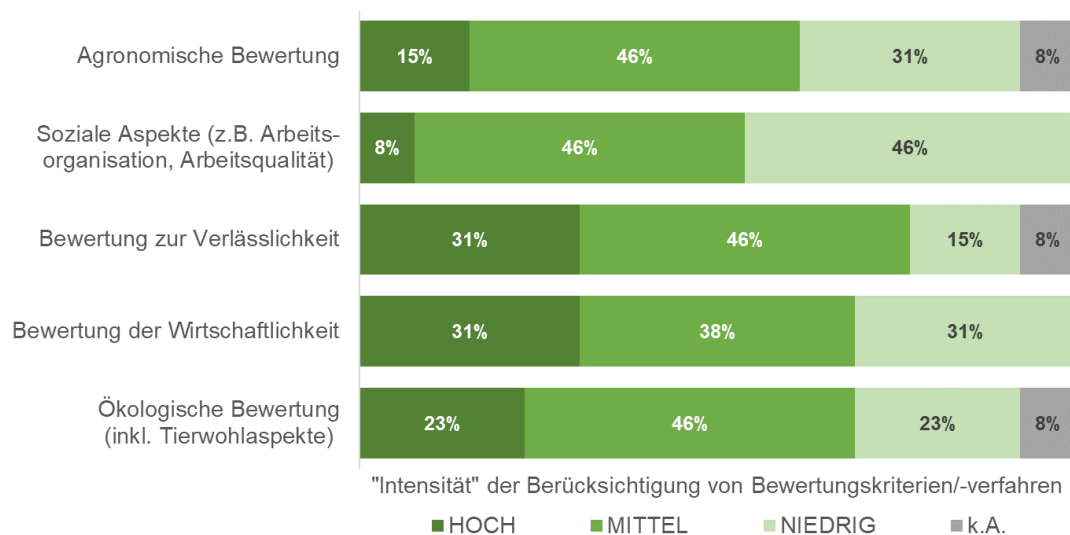


Abb. 5: Verteilung der „Intensitäten“ angewandter Bewertungskriterien und -verfahren bei 13 Experimentierfeldern

3.3.1 Agronomische Bewertungskriterien und -verfahren

Insgesamt zwölf DEF machten Angaben zu Untersuchungen zu agronomischen Bewertungskriterien bzw. Angaben zu angewandten Bewertungsverfahren. Diese lassen sich wiederum aufteilen in „Planung und Prozessoptimierung“ und „Gesundheit und Leistungsfähigkeit von Pflanzen und Tieren“.

Beide Unterteilungen umfassen verschiedene Aspekte der Bewertung von landwirtschaftlichen Technologien, von der Planung und Optimierung von Prozessen bis hin zur Überwachung und Verbesserung der Gesundheit und Leistungsfähigkeit der Pflanzen.

1. Planung und Prozessoptimierung

- Bewertungen zum Erkenntnisgewinn/Vorteile für agronomische Planungen
- Erfassung notwendiger Arbeitsschritte im Anbau
- Unterstützungshilfen bei der Standortbeurteilung
- Beurteilung, Verortung und digitale Erfassung von boden- und reliefbedingten (potenziellen) Minderertragsflächen
- Untersuchung der optimalen Terminierung im Wachstumsverlauf zur Detektion von unterschiedlichen praxisrelevanten Phänomenen
- Validierung sensorbasierter Methoden (z. B. im Weinbau)
- Verluste im Nährstoffkreislauf im Bereich Fütterung (anhand von Sensordaten)
- Integration entwickelter Prozessketten in den konventionellen Arbeitsablauf

2. Gesundheit und Leistungsfähigkeit von Pflanzen und Tieren

- Einfluss digitaler Systeme auf Gesundheits- und Brunsterkennung (Tier)
- Pflanzenbauliche Bewertung der Wirkung von teilflächenspezifischen Maßnahmen
- Biologische Wirksamkeit von Verfahren im Vergleich zu konventionellen Verfahren
- Präzision der Ertragsmessung: Mengen und Ertragsqualität
- Erfassung und Optimierung von Aussaatiefe, Bestandesdichte, Krankheitsbonituren, Nährstoffgehalte, Qualitätsparameter
- Bewertung langfristiger agronomischer Effekte (z. B. Bekämpfungserfolg bei der Unkrautregulierung oder pilzlicher Schaderreger)
- Potenziale zur Verkürzung der Vorernte-Beprobung und umfassende Aussage zum Nitratgehalt für Anbauer und Handel

Aufgrund der detaillierten Angaben der Projektverantwortlichen konnte den Experimentierfeldern DiWenKla und FarmerSpace eine hohe Intensität bei der Bewertung agronomischer Kriterien zugesprochen werden.

3.3.2 Ökonomische Bewertungskriterien und -verfahren

Die Angaben zur Untersuchung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit von digitalen Technologien und Verfahren lassen sich ebenfalls in zwei Teilbereiche einteilen. Der erste, „Wirtschaftlichkeit und Ressourcenoptimierung“, beinhaltet Bewertungsverfahren zu Leistungen und Kosten von Technologien sowie zur Erfassung von ressourcenschonenden Prozessanwendungen. Der zweite

Bereich beinhaltet Verfahren und Kriterien zur Erfassung und Bewertung von ökonomischen Parametern.

1. Wirtschaftlichkeit und Ressourcenoptimierung

- Wirtschaftlichkeitsberechnungen (z. B. Betriebskosten, Zeit)
- Prozesskostenberechnungen (z. B. Erfassung des IST-Zustandes)
- Ökonomische Systemvergleiche
- Modellierung der Eingriffsminimierung im Pflanzenbestand (u. a. Sprühdrohnenanwendungen)
- Berechnungen zu Flächenleistungen und Einsatzkosten für bedarfsgerechte Ausbringung von Betriebsmitteln
- Erfassung von Zeitbedarfen und Arbeitserledigungskosten (nach KTBL)
- Installations- und Wartungsaufwand von Technologien
- Berücksichtigung und Bewertung zu Dienstleistungskosten
- Gegenüberstellung von Kosten gegenüber Mehrwert, Nutzwertanalysen (z. B. durch die erhaltenen Daten)
- Total Cost of Ownership: Überblick über anstehende Investitionen
- Teilflächenspezifische Bewässerungskalkulation
- Potenzialanalysen von Low-Cost-Sensorik
- Arbeitszeiterparnis im Öko-Anbau

2. Datenerfassung und -bewertung

- Bewertung von Möglichkeiten der Erfassung von Zeitbedarfen und Kosten
- Analyse von UAV Flugzeiten
- Optimierung der Datenaufbereitung und Datenanalyse
- Bewertung von Fragen zum Deployment, Support und der Akquise von Daten
- Entscheidungshilfen zur Findung geeigneter Bonitur-Standorte

Aufgrund des Detailgrades der Rückantworten im Fragebogen lässt sich bei den Experimentierfeldern AgriSens-DEMMIN 4.0, Agro-Nordwest, DiWenkLa und EXPRESS auf eine hohe Intensität der Bewertung ökonomischer Kriterien und Verfahren schließen. Dass alle 13 Projekte Angaben zur Wirtschaftlichkeitsbewertung machten, lässt auf die hohe Bedeutung von ökonomischer Evaluierung bei der Implementierung und Anwendung digitaler Technologien schließen.

3.3.3 Ökologische Bewertungskriterien und -verfahren (inkl. Tierwohlaspekte)

Im Folgenden sind die Angaben für die in den DEF angewandten Verfahren zur Bewertung ökologischer Effekte gelistet, erneut eingeteilt in zwei Unterbereiche.

1. Angewandte Bewertungsverfahren zur ökologischen Effizienz und technischen Optimierung

- Reduktionspotenziale von Düngemitteln und Pestiziden (u. a. Verfahren zur gezielten Ausbringung)
- Managementempfehlungen bestandsschonender Flächenbearbeitung
- Bedarfsorientierte Tier- und Pflanzenbehandlungen; Feststellen von Nährstoffüber- und Unterversorgung anhand von Ertragsdaten
- Fragestellungen zum Energie- und Wasserverbrauch der Systeme und Vergleiche mit konventionellen Systemen
- Erfassung umweltrelevanter Vorgänge zum Nährstoffverbrauch, Messung Ressourcenverbrauch (Akkus, Wasser) und Wechselwirkungen mit anderen Systemen im Betrieb

2. Angewandte Bewertungsverfahren zur Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit

- Erfassung von Mengen und Genauigkeit eingesetzter Betriebsmittel (z. B. Saatgut, Wachstumsregler, Dünger)
- Minimal-destruktive Verfahren, Einsatzmöglichkeiten und Präzision von Feldmessinstrumenten
- Messung von Abdrift, Überfahrten (Bodenverdichtung)
- Wasserbilanzierung auf Betriebsebene
- Monitoring von Schadgasemissionen
- Identifizierung von Tierwohlparametern und Prüfung der Einflüsse durch die Technologien selbst
- Bewertung von Wechselwirkungen mit anderen Systemen (ohne genaue Angaben zu konkreten Bewertungsmethoden)
- Erfassung von Insektenbiomasse mit Kamerasystemen; Bewertung ausgewählter Biodiversitätsparameter (z. B. Beikrautarten, Regenwurmart)

Beide Teilbereiche der ökologischen Bewertung repräsentieren die verschiedenen Aspekte, die bei der Bewertung landwirtschaftlicher Technologien im Hinblick auf ihre Effizienz, Nachhaltigkeit und Auswirkungen auf die Umwelt berücksichtigt werden können. Anhand der Angaben der befragten Verantwortlichen in den einzelnen Projekten konnte die Intensität der Anwendung ökologischer Bewertungsverfahren bei drei der 13 Experimentierfelder höher eingestuft werden (DigiSchwein, DIWAKOPTER, DiWenkLa).

3.3.4 Soziale Bewertungskriterien und -verfahren

Die genannten Bewertungskriterien und -verfahren können in die beiden Teilbereiche „Benutzerfreundlichkeit und Arbeitsprozessoptimierung“ (für den Landwirt) sowie „Kundenorientierung und Qualitätssicherung“ (für den Endkunden bzw. Abnehmer) eingeteilt werden.

1. Benutzerfreundlichkeit und Arbeitsprozessoptimierung

- Bewertung der Ergonomie und körperliche Arbeitsbelastung in der Handhabung der Technologie für den Anwender bzw. Landwirt
- Optimierung von Arbeitsabläufen (z. B. durch Zeiterfassung einzelner Arbeitsschritte)
- Zugänglichkeit zu ortspezifischem Wissen für neue Mitarbeiter
- Anwenderfreundliche Datenverarbeitung
- Optionen zur Attraktivitätserhöhung am Arbeitsplatz
- Bewertung und Verbesserung der Arbeitssicherheit (z. B. Pflanzenschutzmittel-Exposition, Unfallverhütung)
- Einsparung von arbeitsintensiven Prozessen zur Reinvestierung in andere Betriebsbereiche; Umstrukturierung von Arbeits- und Betriebsabläufen
- Priorisierung von Arbeitsabläufen durch Alarmfunktionen von Sensorsystemen
- Bewertung der notwendigen Kompetenzen und Fähigkeiten von Mitarbeitern (z. B. korrekte Bedienung, Interpretation von Dashboards und Ergebnissen); Identifizierung neuer Qualifikationsvoraussetzungen

2. Kundenorientierung und Qualitätssicherung

- Bereitstellung zusätzlicher Services zur zeitextensiven Erstellung von Ergebnissen
- Attraktivitätserhöhung des Arbeitsplatzes
- Bewertungen der Imageverbesserung durch den Einsatz neuer Technologien in der Praxis (ohne genaue Angaben zu konkreten Bewertungsmethoden)
- Bewertung des sensiblen Umgangs mit betriebs- oder personenbezogenen Daten; Verbesserung der Rechtssicherheit
- Möglichkeiten der Entbürokratisierung

Einige Verantwortliche der DEF berichteten, dass die Bewertung der sozialen Kriterien in den Planungs-, Entwicklungs- und Testphasen nicht selten über eine Partizipation der Zielgruppe (Landwirte, landwirtschaftliche Berater und Interessierte) bzw. durch Einschätzungen von Akteuren im vor- und nachgelagerten Bereich unterstützt wird (z. B. AgriSens-DEMMIN 4.0, Agro-Nordwest, DigiMilch, EXPRESS). Insbesondere das Experimentierfeld AgriSens-DEMMIN 4.0 gab hierzu detaillierte Hinweise auf eine intensive Betrachtung dieses Bewertungsbereiches.

3.3.5 Bewertungskriterien und -verfahren zur Verlässlichkeit digitaler Technologien

Die Angaben der Befragten der 13 DEF zu angewandten Bewertungskriterien und -verfahren hinsichtlich der Verlässlichkeit von Technologien sind sehr unterschiedlich und lassen sich erneut in zwei Teilbereiche einteilen. Der zweite Teilbereich „Nutzerfreundlichkeit und Praxistauglichkeit“ geht insbesondere auf Kriterien zur Technologie-Nutzer-Interaktion ein.

1. Technische Zuverlässigkeit und Performance:

- Reifegrad von Produkten und Technologien
- Sichere Abschätzung der Genauigkeiten bzw. Unsicherheiten
- Störanfälligkeit, Datenverluste
- Hohe Verlässlichkeit bei der Probenentnahme
- Reproduzierbarkeit von Messdaten
- Notwendige Datengüte und -dichte, Datenplausibilität
- Möglichkeiten der Ergebnisvalidation
- Testen von Konnektivitäten (z. B. mit anderen Systemen)
- Ausfallquoten/Robustheit, Wartungsaufwand und -komplexität
- Häufigkeit von notwendigen Software-Updates
- Möglichkeit bei der Überprüfung von Lizenzierungsverfahren
- Wetterunabhängigkeit der Technologie
- Identifikation der Art möglicher Funktionseinschränkungen und -einstellungen
- Übertragbarkeit der Konzepte; "Ready for Autonomy"

2. Nutzerfreundlichkeit und Praxistauglichkeit:

- Verfügbarkeit der Technologie und Zugang
- Bewertung des Praxiseinsatzes von technisch niederschwelligen Methoden
- Vorhandensein und Verständlichkeit von Produktbeschreibungen
- Komplexität der Technik – „können angelernte Personen Störungen beheben?“
- Service-Labels und Kennzeichnungen
- Bewertung benötigtes Knowhow des Nutzers, Plug-and-Play-Praxistauglichkeit
- Korrektur- und Nachrüstaufwand
- Zusätzlicher (zeitlicher) Wartungsaufwand und Auswirkungen der Störanfälligkeit

Die DEF decken die verschiedenen Aspekte der Bewertung von landwirtschaftlichen Technologien hinsichtlich ihrer technischen Zuverlässigkeit, Leistungsfähigkeit sowie Nutzerfreundlichkeit und Praxistauglichkeit sehr umfangreich ab. Anhand der detaillierten Angaben zu den Aktivitäten in den Projekten konnte den Projekten AgriSens-DEMMIN 4.0, Agro-Nordwest, DiWenkLa und EXPRESS eine stärkere Betrachtung der Verlässlichkeit der behandelten Technologien zugeschrieben werden. Die

acht weiteren Experimentierfelder gaben zumindest grobe Hinweise auf die Anwendung gesonderter Bewertungskriterien und -verfahren zur Verlässlichkeit im Projekt

3.3.6 Beurteilung der Intensität der Bewertungsbereiche

Die folgende Übersicht zeigt die Verteilungen der aus den Rückantworten abgeleiteten Intensitäten, mit der die einzelnen Experimentierfelder die fünf Bewertungsbereiche bearbeiten (Abb. 6). Die Länge der Balkenteile in der Abbildung zeigt dimensionslos die jeweiligen Einschätzungen zu der Intensität der Bewertungen. Es wird an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass diese qualitative Einstufung der Intensität der Bewertungsbereiche subjektiv anhand der Qualität und des Umfangs der Antworten im Fragebogen erfolgte und nicht zwangsläufig einen Rückschluss auf die tatsächlich durchgeführten Aktivitäten zulässt. Ein direkter Vergleich einzelner DEF ist nicht möglich, zeigt aber übersichtlich die Schwerpunktsetzung bei der Anwendung von Bewertungsverfahren und -kriterien. DEF, die stärker in den Untersuchungsmethoden „Demonstration“ und „Forschung und (Weiter-)Entwicklung“ tätig sind, haben z. T. weniger Angaben zu angewandten Bewertungsverfahren gemacht. Projekte wie AgriSens, DiWenkLa oder FarmerSpace nennen umfangreiche Bewertungsaktivitäten in mehreren der fünf Bereiche. Die Experimentierfelder DigiSchwein und DIWAKOPTER sind insbesondere in der Bewertung ökologischer Auswirkungen sehr aktiv, während beispielsweise AgroNordwest eine Schwerpunktsetzung bei ökonomischen Bewertungen oder der Bewertung der Verlässlichkeit der Technologien aufweist.

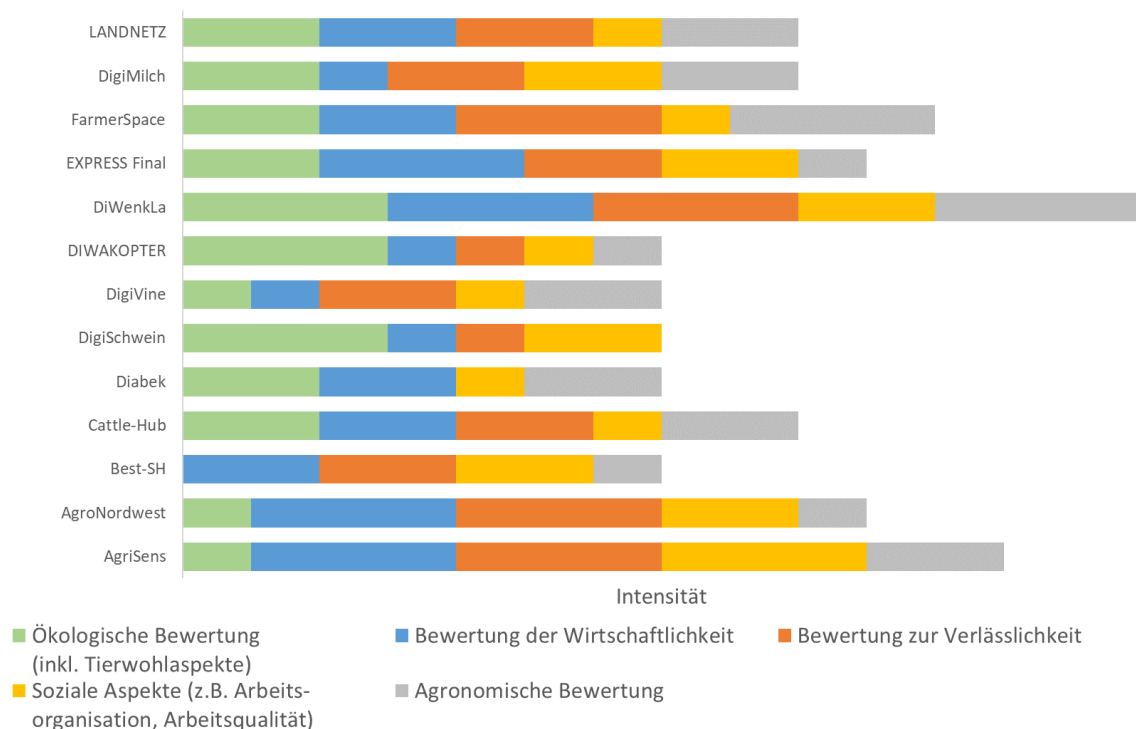


Abb. 6: Qualitative Einschätzung der Intensität der Bewertungsbereiche, aufgeschlüsselt auf die Experimentierfelder

3.4 Chancen, Herausforderungen und Mindestanforderungen für digitale Technologien – Erfahrungen aus den Experimentierfeldern für zwei beispielhafte Technologien

Zwei digitale Technologien, die in den DEF intensiv untersucht wurden, werden im Folgenden als Anwendungsfälle ausgewählt und detailliert analysiert. Ziel ist es, Potenziale und Mindestanforderungen abzuleiten, die bei einer Bewertung der Technologien berücksichtigt werden sollten. Chancen, Herausforderungen und Mindestanforderungen werden anhand der qualitativen Angaben der jeweiligen Befragten strukturiert und zusammengefasst. Details zu den Anwendungsbereichen und Informationen zu den beiden ausgewählten Technologien „Automatisierte Fütterungstechnik“ und „Feldrobotik“ sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Ausgewählte Technologien und Anwendungsbereiche

Technologie	Anwendungsbereiche der untersuchten Technologien in den Experimentierfeldern	Experimentierfelder
1. Automatisierte Stalltechnik: Fütterung (8 Anwendungsfälle)	Trockenfütterungsanlage, Futtermischwagen, programmierbare Waagen, automatisierte Stalltechnik (M2M)	Agro-Nordwest, DigiMilch, DigiSchwein, LANDNETZ
2. Feldrobotik (6 Anwendungsfälle)	Agrarrobotik (Säen, Pflanzung, Düngen, Unkrautregulierung); Autonome Hackroboter; Autonome Trägerplattformen	Agro-Nordwest, Farmerspace, DiWenkLa, LANDNETZ

3.4.1 Automatisierte Fütterungstechnik

Die Mindestanforderungen an automatisierte Fütterungstechnologien, einschließlich Futtermischwagen und programmierbare Waagen an der Futtertechnik, lassen sich aufteilen in grundsätzliche Basisanforderungen und spezifische Zusatzanforderungen an die Technologien. Bei der Ableitung dieser Anforderungen waren die Angaben aus dem Experimentierfeld Agro-Nordwest in der Umfrage hervorzuheben, insbesondere die Ergebnisse aus den dort durchgeführten Fokusgruppendifkussionen des Experimentierfeldes mit Landwirten und Lohnunternehmen, die sich auf Futtermischwagen konzentrierten.

Basisanforderungen:

- Möglichkeit der Evaluierung automatischer Technologien hinsichtlich Anwendung und Robustheit
- Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der Systeme im Stall, hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit

- Papierlose und direkte Dateneingabe über Apps.
- Übertragbarkeit auf andere Höfe bzw. zweite Betriebsstelle bzw. Integration in einen bestehenden Betrieb ("Ready for Autonomy")
- Funktionssicherheit des Systems und adäquater Herstellerservice

Spezifische Zusatzanforderungen an die Technologien:

- Unterstützung von Managemententscheidungen und Vernetzung entlang der Wertschöpfungskette (Datenaustausch)
- Zulassung von verlässlichen Sicherheitssensoren für den autonomen Betrieb

Chancen der automatisierten Fütterungstechnik: Es lassen sich mehrere Chancen in Bezug auf die automatisierte Fütterungstechnik ausmachen, die sich positiv auf ihre Betriebe auswirken können: Eine der Möglichkeiten liegt in der Optimierung und Präzisierung des Fütterungsprozesses, was zu einer verbesserten Tierversorgung führt. Die Individualisierung der Fütterung ermöglicht es, die Bedürfnisse jedes Tieres gezielter zu erfüllen und so die Tiergesundheit und das Tierwohl zu verbessern.

Darüber hinaus bietet die automatisierte Fütterungstechnik Möglichkeiten, die Tierbeobachtung zu unterstützen und die Tierleistung zu steigern. Durch häufigeres Füttern kann z. B. die Milchproduktion positiv beeinflusst werden. Die Flexibilität in der Zeiteinteilung für Landwirte und Mitarbeiter wird ebenfalls als Vorteil gesehen, da autonome Systeme repetitive Fütterungsaufgaben übernehmen können. Ein weiterer wesentlicher Vorteil besteht in der Einsparung von Arbeitszeit durch den Einsatz von Fütterungsrobotern oder autonomen Futtermischwagen. Dies trägt zur Effizienzsteigerung bei und ermöglicht es den Betrieben, Ressourcen effektiver einzusetzen. Zusätzlich bietet die automatisierte Fütterungstechnik Transparenz, Prozesskontrolle und Ressourceneffizienz in der Produktion. Dies unterstützt betriebliche Entscheidungen und fördert die Vernetzung entlang der Wertschöpfungsketten, was zu einer ganzheitlichen Verbesserung der Betriebsabläufe führen kann. Insgesamt wird die automatisierte Fütterungstechnik als Chance gesehen, die Produktivität, Effizienz und Nachhaltigkeit in der Tierhaltung zu steigern.

Aktuelle Herausforderungen: Die automatisierte Fütterungstechnik steht vor einer Reihe von aktuellen Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt. Dazu gehören unter anderem hohe Investitionskosten für Futtermischwagen, die insbesondere kleinere Betriebe mit begrenzten finanziellen Ressourcen vor Herausforderungen stellen können. Zudem fehlen oft einheitliche Standards und Schnittstellen zwischen verschiedenen Technologien, was die Integration und Vernetzung von automatisierten Fütterungssystemen erschwert. Die Klärung rechtlicher Rahmenbedingungen und Haftungsfragen für den autonomen Betrieb ist eine weitere

Herausforderung, die überwunden werden muss, um rechtliche Unsicherheiten zu beseitigen und den Einsatz der Technologien zu erleichtern. Gleichzeitig ist es wichtig, die wirtschaftliche Rentabilität der automatisierten Fütterung sicherzustellen und potenzielle Mehrwerte durch Beispielrechnungen und Wirtschaftlichkeitsanalysen transparent darzustellen.

Die begrenzte Verfügbarkeit von Einzeltierkennzeichnungssystemen und die Herausforderungen bei der Datenerfassung erschweren die Überwachung und Optimierung der Fütterung auf individueller Ebene. Eine angemessene Schulung und eine gute Qualifikation der Nutzer sind unerlässlich, um die Technologien der automatisierten Fütterung effektiv zu nutzen und mögliche Risiken zu minimieren. Zusätzlich sind eine Ausfallsicherheit der Technik sowie eine zuverlässige Internetanbindung wichtig, um einen unterbrechungsfreien Betrieb zu gewährleisten und Datenverluste zu vermeiden. Schließlich besteht Bedarf an effizienten Softwarelösungen, um die gesammelten Daten aus den automatisierten Fütterungstechnologien zu analysieren und Erkenntnisse für eine optimierte Fütterungspraxis zu gewinnen. Die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Landwirten, Technologieanbietern, Behörden und anderen Interessengruppen, um die Einführung und Nutzung automatisierter Fütterungssysteme voranzutreiben und ihre Potenziale voll auszuschöpfen.

3.4.2 Feldrobotik

Der Nutzen von Feldrobotik wird insbesondere in Anwendungen wie Unkrautregulierung in Sonderkulturen und in der ökologischen Landwirtschaft gesehen. Aus den Antworten der Verantwortlichen der DEF, die sich mit Feldrobotik beschäftigen, können mehrere **Mindestanforderungen** der Praxis an die Technologie abgeleitet werden. Sehr aufschlussreich sind hierbei auch die Angaben aus dem Experimentierfeld Agro-Nordwest über die Ergebnisse aus den Fokusgruppendifkussionen mit Landwirten und Lohnunternehmen.

- **Nutzenorientierung:** Feldrobotik sollte den Nutzen für die Landwirte maximieren und interdisziplinäre Aspekte wie Nutzerqualifikation, Herstellerservice und gesellschaftliche Auswirkungen berücksichtigen.
- **Zugänglichkeit:** Eine breite Zugänglichkeit der Systeme für Landwirte ist wichtig, um den Einsatz der Technologien zu fördern. Dies kann beispielsweise auch durch Co-Creation-Ansätze erreicht werden, bei denen die Landwirte aktiv an der Weiterentwicklung der Technologien beteiligt sind.
- **Sensibilisierung und Schulung:** Landwirte müssen für die neuen Technologien sensibilisiert und geschult werden können, um eine erfolgreiche Anwendung zu gewährleisten.
- **Standardisierung des Datenflusses:** Ein optimaler Informations- und Datenfluss zwischen Maschine und Mensch über standardisierte Softwareanwendungen sollte gegeben sein, um eine effiziente und nahtlose Integration im Praxisbetrieb zu ermöglichen.

- **Integration in den landwirtschaftlichen Betrieb:** Die Technologien sollten leicht in einen landwirtschaftlichen Betrieb integrierbar sein. Dies erfordert robuste Systeme, die unter den üblichen Feldbedingungen funktionieren, sowie eine Bereitstellung des erforderlichen Know-hows für den Betrieb.

Chancen der Feldrobotik: Die Feldrobotik bietet zahlreiche Chancen und Möglichkeiten, um aktuelle Herausforderungen in der Landwirtschaft zu bewältigen. Angesichts des Mangels an qualifizierten Fachkräften besteht ein großes Interesse an automatisierten Lösungen, die Arbeitszeit und Betriebsmittel einsparen können. Insbesondere in der Unkrautregulierung zeigt sich ein hohes Potenzial: Autonome Feldrobotik überzeugt zunehmend durch eine immer präzisere Unkrauterkennerung, hohe Arbeitsgenauigkeit und die Möglichkeit, schwere körperliche Arbeit zu ersetzen. Ihre lange Einsatzdauer ohne Ermüdung sowie die Reduzierung des Bedarfs an Saisonarbeitskräften machen sie zudem auch für kleinere Betriebe attraktiv. Auch für konventionelle Landwirte gewinnt der Ersatz chemischer Pflanzenschutzmittel durch mechanische Verfahren zunehmend an Bedeutung. Zusätzlich kann Feldrobotik eine Vielzahl relevanter Felddaten generieren, wie z. B. Informationen zur Bodentemperatur, welche die Entscheidungsfindung unterstützen. Die Digitalisierung eröffnet neue Wege zur Optimierung von Anbauprozessen. Kamerabasierte Analysen ermöglichen eine immer präzisere Datenerfassung, die zunehmend auf neuronalen Netzen basiert. Diese Technologien haben in den letzten Jahren in puncto Effizienz, Genauigkeit und Nutzerfreundlichkeit erhebliche Fortschritte gemacht. Dadurch werden kostengünstige und vielseitige Anwendungen möglich. Neben der Steigerung der Ertragsfähigkeit rücken auch die Ertragsqualität und die Ressourceneffizienz des Anbauprozesses stärker in den Fokus. Autonome Technologien wie die Feldrobotik können hier bislang ungenutzte Optimierungspotenziale erschließen und die Arbeitsqualität sowie Produktivität verbessern.

Aktuelle Herausforderungen: Die Feldrobotik steht vor einer Reihe an Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt. Dazu zählen ein zuverlässiger und störungsfreier Betrieb über längere Zeit, die Robustheit gegenüber Fremdeinwirkungen und Wetterbedingungen sowie die Klärung von Zulassungs- und Haftungsfragen. Weitere wichtige Herausforderungen sind die Integrationsfähigkeit in den landwirtschaftlichen Arbeitsprozess, die transparente Kommunikation sowie die Nutzung der dabei generierten Daten. Besonders in Sonderkulturen wie dem Gemüseanbau, in landwirtschaftlichen Reihenkulturen und in der ökologischen Landwirtschaft werden erste Anwendungsfelder für autonome Feldrobotik gesehen. In großen Betrieben und bei Lohnunternehmen bleibt jedoch die Sicherstellung einer ausreichenden Flächenleistung eine bedeutende Herausforderung.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Auswertung der Umfrageergebnisse der DEF nach der ersten Förderrunde bietet einen umfassenden Einblick in die Bewertung von landwirtschaftlichen Technologien durch die Verantwortlichen der Projekte und ermöglicht es, Trends und Muster in Bezug auf ökologische, wirtschaftliche, soziale und agronomische Aspekte zu identifizieren. Diese Erkenntnisse sind von Bedeutung für die Weiterentwicklung und den Einsatz von Technologien, um eine nachhaltige und effiziente Landwirtschaft zu fördern. Die Schwerpunkte der behandelten Technologien in den Experimentierfeldern konzentrieren sich auf Sensoren (wobei NIRS gesondert betrachtet wurde), Technologien für den Pflanzenschutz sowie zur Automatisierung betrieblicher Abläufe (z. B. in der Stalltechnik, durch Drohnen und Feldrobotik). Die Experimentierfelder tragen vielfältig zum Wissenstransfer bei, sowohl durch externe Kommunikation und Demonstration der Technologien als auch durch vielseitige Bewertung der Technologien. Zusätzlich zu ihren praktischen Anwendungen liefern sie wertvolle Forschungsbeiträge.

Sensoren spielen dabei eine zentrale Rolle, entweder als spezifische Untersuchungsbereiche (z. B. NIRS zur Futterwertbestimmung) oder als Grundlage für weiterführende Studien (z. B. teilflächenspezifische Bewirtschaftung basierend auf UAV-Daten). Bei NIRS liegt der Fokus auf der Analyse von Inhaltsstoffen in Futtermitteln und organischen Düngemitteln. Zudem hat die Vernetzung von Sensoren und ihre Integration in Farm-Management-Informationssysteme und Anwendungen zur Entscheidungsunterstützung eine größere Bedeutung in mehreren DEF. Fernerkundungstechnologien mittels Satelliten oder UAV sind in den einzelnen Projekten stark verbreitet und werden nach außen kommuniziert, insbesondere für die Erfassung von Bestandszuständen im Pflanzenbau. Im Bereich Pflanzenschutz führen mehrere Experimentierfelder zahlreiche Aktivitäten durch, darunter die Erforschung von Kombinationen aus chemischen und mechanischen Pflanzenschutzmaßnahmen, Entwicklungen im Bereich des Spot-Spraying oder teilflächenspezifische Maßnahmen. In der Stalltechnik zeigt sich ein zunehmender Schwerpunkt auf Automatisierung. Im Bereich der Feldrobotik wird sich mit Trägerplattformen im Allgemeinen und speziell mit Pflanzenschutztechnik befasst.

Über alle Experimentierfelder hinweg werden die digitalen Technologien relativ umfassend bewertet. Dies zeigen die umfangreichen Angaben zu angelegten Bewertungskriterien und angewandten Bewertungsverfahren für einen Großteil der untersuchten Technologien. Die Untersuchung der Intensität, mit der die befragten Verantwortlichen einzelner Arbeitspakete Aussagen zu den fünf Bewertungsbereichen "Agronomische Bewertung", "Bewertung sozialer Aspekte", "Bewertung der Verlässlichkeit", "Bewertung der Wirtschaftlichkeit" und "Ökologische Bewertung" machten, zeigt auch hier die Schwerpunktsetzung in den einzelnen Projekten. Die Einschätzung erfolgte anhand des Umfangs und Detailgrades der Antworten zu angewandten Bewertungskriterien und -verfahren und

unterliegt somit einer gewissen Subjektivität der Autoren („Bias durch Interpretation“; siehe NARDI 2018). Die Analyse zeigt dennoch, dass im Durchschnitt der befragten DEF die digitalen Technologien relativ umfassend bewertet werden, wobei die Schwerpunkte in den Bereichen Verlässlichkeit und Wirtschaftlichkeitsbewertung liegen. Der Bewertungsbereich der sozialen Aspekte, wie beispielsweise Arbeitsorganisation, Arbeitsqualität, Ergonomie und Handhabung, fällt dagegen leicht ab und könnte zukünftig noch ausgebaut werden.

Die Befragung der DEF im Rahmen der Arbeitsgruppe, die sich mit der Qualitätsbewertung digitaler und technischer Lösungen in der Landwirtschaft beschäftigt hat, verfolgte das Ziel, Chancen, aktuelle Herausforderungen und Mindestanforderungen an digitale Technologien in der Landwirtschaft zu erfassen. Dieser Beitrag bietet exemplarisch eine strukturierte Zusammenfassung der Angaben der Befragten zu den Technologien „Automatisierte Fütterungstechnik“ und „Feldrobotik“. Die Zusammenführung aller Angaben zu den in der DEF behandelten Technologien ermöglicht eine Verdichtung der Mindestanforderungen an praxisrelevante Technologien in der Landwirtschaft auf mehrere Schlüsselkriterien (siehe dazu auch BENEKE et al. 2024). Zunächst ist die technische Leistungsfähigkeit zentrales Kriterium, mit höchsten Anforderungen an Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Robustheit, Batterielaufzeit und der Automatisierung von Prozessen. Finanziell spielen die Kosten-Nutzen-Relation und die Wirtschaftlichkeit eine entscheidende Rolle, einschließlich der Investitions- und Betriebskosten. Die Integration und Kompatibilität neuer Technologien in bestehende Systeme sowie ihre Vernetzungsfähigkeit sind ebenfalls essenziell, ebenso wie Benutzerfreundlichkeit, einfache Wartung und gute Herstellerunterstützung. Weitere wichtige Aspekte betreffen die betriebliche Effizienz, etwa durch Zeiteinsparungen, Arbeitserleichterung und Unterstützung bei der Dokumentation. Datensicherheit und -management, insbesondere Standards, langfristiger Zugriff und Datenschutz, sind unverzichtbar. Schließlich müssen rechtliche Rahmenbedingungen und Qualifikationsanforderungen berücksichtigt werden, während der direkte Nutzen, wie die Optimierung von Betriebsprozessen, die Verbesserung der Tiergesundheit und die Flexibilisierung des Arbeitsalltags, die Akzeptanz und den Erfolg solcher Technologien maßgeblich beeinflusst.

Nach Abschluss der 14 DEF wird auch zukünftig u. a. durch die Richtlinie über die Förderung der Einrichtung von Experimentierfeldern zur Digitalisierung und KI in der Landwirtschaft vom 10. Oktober 2023 sowie durch das Kompetenznetzwerk „Digitalisierung in der Landwirtschaft“ das Aufgreifen offengebliebener, aber auch neuer Aspekte ermöglicht.

Zusammenfassung

Bewertung von digitalen Technologien in den Digitalen Experimentierfeldern

Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) förderte 14 digitale Experimentierfelder, um die digitale Transformation in der Landwirtschaft zu unterstützen, nachhaltige Lösungen zu entwickeln und den Praxistransfer zu stützen. Eine Umfrage unter den Experimentierfeldern im Rahmen der Arbeitsgruppe „Qualitätsbewertung digitaler Techniken“ des Kompetenznetzwerks „Digitalisierung in der Landwirtschaft“ identifizierte die in den Projekten behandelten Technologien, Untersuchungsmethoden und Bewertungsbereiche. Insgesamt wurden 181 Technologien analysiert, darunter Technologien zur Sensorik, Automatisierung und Robotik, die in fünf Kategorien wie z. B. Datenmanagement, Entscheidungsunterstützung und spezifische Anwendungen eingeordnet wurden. Untersuchungsmethoden umfassten Demonstration, Bewertungsverfahren und Forschung und (Weiter-)Entwicklung der Technologien. Die Bewertungsbereiche in den Projekten konzentrierten sich auf agronomische, ökonomische, ökologische und soziale Kriterien sowie Kriterien zur Verlässlichkeit der Technologien. Schwerpunkte über alle Experimentierfelder hinweg lagen auf Verlässlichkeit und Wirtschaftlichkeit, während soziale Aspekte insgesamt weniger detailliert berücksichtigt wurden. Zwei exemplarische Technologien verdeutlichen die Ergebnisse: Automatisierte Fütterungssysteme optimieren Fütterungsprozesse und reduzieren den Arbeitsaufwand, stehen jedoch vor Herausforderungen wie hohen Investitionskosten und fehlender Standardisierung. Feldrobotik bietet Potenziale für mechanische Unkrautregulierung und präzise Datenerfassung, muss jedoch hinsichtlich Robustheit und Integration in landwirtschaftliche Arbeitsprozesse verbessert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass in den Experimentierfeldern Technologien praxisnah untersucht wurden und dass ihre Potenziale sowie Herausforderungen gezielt adressiert werden konnten. Zugleich lieferten die Experimentierfelder wertvolle Beiträge zum Wissenstransfer und zur weiteren Forschung und Entwicklung nachhaltiger, effizienter Anwendungen. Der vorliegende Beitrag liefert wertvolle Erkenntnisse für Politik, Forschung und Praxis.

Summary

Evaluation and Assessment of Digital Technologies in the Digital Trial Fields

The German Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL) supported fourteen digital trial fields to advance digital transformation in agriculture, foster sustainable solutions, and strengthen knowledge transfer into practice. A survey among the responsible project managers of all fourteen funded projects, conducted within the working group “Quality Assessment of Digital Technologies” of the Competence Network on Digitalization in Agriculture, mapped the technologies, research methods, and evaluation criteria addressed in the projects. In total, 181 technologies, addressed in the projects, were analysed, ranging from sensors and automation to robotics, and classified into five categories such as data management, decision support, and specific applications. Applied methods in the digital trial fields included demonstrations, evaluation procedures, and further research and development. The assessment focused on agronomic, economic, ecological, and social dimensions, with particular emphasis across all projects on reliability and economic viability, while social aspects received less attention. Two examples illustrate the findings: automated feeding systems can optimize processes and reduce labour, though they face challenges such as high investment costs and lack of standardization; field robotics shows potential for mechanical weed control and precise data collection but requires greater robustness and integration into farm operations. Overall, the digital trial fields enabled practice-oriented testing and technology assessment, identified both potentials and challenges, and contributed significantly to knowledge transfer as well as to the development of sustainable and efficient agricultural applications.

Literatur

- Beneke, F., Gabriel, A., Gabriel, D., Howind, K. H., Kalmar, R., Meierhöfer, J., ... & Wrenger, B. (2024). Wege zu einer Qualitätsbewertung digitaler und technischer Lösungen in der Landwirtschaft (No. 246). Thünen Working Paper. DOI:[10.3220/WP1725352600000](https://doi.org/10.3220/WP1725352600000)
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (2025): Experimentierfelder der Digitalisierung. Online verfügbar: https://www.ble.de/DE/Projektfoerderung/Foerderungen-Auftraege/Digitalisierung/Experimentierfelder/Experimentierfelder_node.html (zuletzt abgerufen: 21.09.2025).
- BMEL (2023). Digitale Experimentierfelder – ein Beitrag zur Digitalisierung in der Landwirtschaft. Online verfügbar: <https://www.bmel.de/DE/themen/digitalisierung/digitale-experimentierfelder.html>. (zuletzt abgerufen: 22.9.2024).
- DeepL SE (2025): *DeepL Translator*. Machine translation tool. Verfügbar unter: <https://www.deepl.com/>
- Gandorfer, M., Schleicher, S., Heuser, S., Pfeiffer, J., Demmel, M. (2017). Landwirtschaft 4.0 – Digitalisierung und ihre Herausforderungen, In: Ackerbau: Technische Lösungen für die Zukunft - Landtechnische Jahrestagung 2017 (Hrsg. Wendl, G.), Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, S. 9-19.
- OpenAI (2025): *ChatGPT (GPT-4)*. Large language model. Verfügbar unter: <https://chat.openai.com/>
- Oppenheim, A. N. (2000). Questionnaire design, interviewing and attitude measurement. Continuum International Publishing Group.
- Nardi, P. M. (2018). Doing survey research: A guide to quantitative methods. Routledge.
- Schleicher, S., Gandorfer, M. (2018). Digitalisierung in der Landwirtschaft: Eine Analyse der Akzeptanzhemmnisse. Referate der 38. GIL-Jahrestagung in Kiel: Digitale Marktplätze und Plattformen, A. Ruckelshausen et al. (Hrsg.), S. 203-206.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr. Andreas Gabriel

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Arbeitsgruppe
Digital Farming

Hans-Loher-Str. 32

94099 Ruhstorf a. d. Rott

und

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Fakultät für Gartenbau und Lebensmitteltechnologie

Am Staudengarten 10

85354 Freising

E-Mail: andreas.gabriel@hswt.de

Prof. Dr.-Ing. Frank Beneke

Georg-August-Universität Göttingen, Abteilung Agrartechnik

Gutenbergstr. 33

37075 Göttingen

E-Mail: uaat@gwdg.de

PD Dr. Markus Gandorfer

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Arbeitsgruppe
Digital Farming

Hans-Loher-Str. 32

94099 Ruhstorf a.d. Rott

E-Mail: markus.gandorfer@lfl.bayern.de

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Kompetenznetzwerks „Digitalisierung in der Landwirtschaft“ unter der Begleitung des BMEL (Dr. Steffen Beerbaum) und der BLE (Dr. Matthias Leenen, Dr. Antje Fiebig, Olga Luzius-Lang). Die Mitglieder der Unterarbeitsgruppe „Verlässlichkeit“ der übergeordneten Arbeitsgruppe „Qualitätsbewertung digitaler Techniken“ – Dr. Doreen Gabriel, Andreas Herbst, Kai-Hendrik Howind, Ralf Kalmar, Johann Meierhöfer, Prof. Dr. Patrick Noack, Prof. Dr. Yves Reckleben, Ingolf Römer, Dr. Ulrich Rubenschuh, Dr. Oliver Schmittmann, Dr. Nikolaus Staemmler, Prof. Dr. Christina Umstätter, Martin Weis und Prof. Dr. Burkhard Wrenger – haben maßgeblich zur Entwicklung der Umfrage sowie zur Interpretation der Ergebnisse beigetragen. Besonderer Dank gilt den

Verantwortlichen der Digitalen Experimentierfelder für ihre wertvolle Unterstützung bei der Beantwortung der Umfrage und die Bereitstellung von Informationen zu den untersuchten Technologien.

Transparenz

Im Rahmen der Erstellung dieses Beitrags wurden verschiedene KI-gestützte Werkzeuge unterstützend eingesetzt. Sie dienten ausschließlich der Texterstellung, sprachlichen Überarbeitung und Übersetzung. Konkret kamen ChatGPT-4 (OPENAI 2025) sowie DeepL.com (DEEPL SE 2025) für Übersetzungen (z. B. des Abstracts) zum Einsatz. Für die Erstellung zusammenfassender Listen in Kapitel 3.3.1 bis 3.3.5 wurden Textentwürfe mit ChatGPT-5 überprüft und gegebenenfalls ergänzt. Inhaltliche Entscheidungen, Strukturierung und finale Verantwortung für den Text lagen ausschließlich bei den Autoren.